



L'AGRICULTURE ET LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DU MONDE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coord.

éditions
Quæ

L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coordinateurs

Éditions Quæ

Sur la même thématique aux Éditions Quæ

Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation

Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin, David Renaudeau, Éric Sauquet, coord. Collection Synthèses, 2025, 398 p.

Forêts et changement climatique.

Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres

François Courbet, Claude Doussan, Jean-Marc Limousin, Nicolas Martin-StPaul, Guillaume Simioni. Collection Synthèses, 2022, 144 p.

Les productions fruitières à l'heure du changement climatique.

Risques et opportunités en régions tempérées

Jean-Michel Legave, coord. Collection Synthèses, 2022, 464 p.

Pour citer cet ouvrage :

Blanfort V., Demenois J., Hrabanski M., 2025. *L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds*, Versailles, éditions Quæ, 416 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4009-8>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication (<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism

(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la Direction générale à la recherche et à la stratégie (DGD-RS) du Cirad.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4008-1
ISBN epub : 978-2-7592-4010-4

ISBN PDF : 978-2-7592-4009-8

Sommaire

Préface de Laurence Tubiana	11
Préface d'Élisabeth Claverie de Saint Martin	13
Avant-propos. Encore un livre sur le changement climatique?	17
Introduction. Les systèmes agricoles et alimentaires, contributeurs, victimes du changement climatique et porteurs de solutions	19
<i>Marie Hrabanski, Vincent Blanfort, Julien Demenois, Emmanuel Torquebiau</i>	
Le secteur des terres et les systèmes alimentaires face au changement climatique : enjeux sémantiques et épistémologiques.....	21
Une accélération de la climatisation des questions agricoles et alimentaires dans les arènes scientifiques et politiques.....	25
Les systèmes agricoles et alimentaires, à la fois contributeurs et victimes du changement climatique.....	26
Les systèmes agricoles et alimentaires : des solutions pour faire face au changement climatique.....	27
Références bibliographiques.....	28

PARTIE 1

LES SYSTÈMES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ÉTAT DES LIEUX GLOBAL

Chapitre 1. À l'échelle mondiale, un panorama global des systèmes agricoles et alimentaires dans un contexte de changement climatique	32
<i>Vincent Blanfort, Julien Demenois, Adèle Gaveau</i>	
L'évolution de la question du secteur des terres et de la question agricole au sein des rapports du Giec.....	32
Les effets du changement climatique sur le secteur des terres.....	36
L'impact des systèmes agricoles et alimentaires sur le changement climatique.....	41
Références bibliographiques.....	44
Chapitre 2. Les questions agricoles, alimentaires et forestières dans les négociations climatiques : mise à l'agenda et enjeux	45
<i>Marie Hrabanski, Valérie Dermaux, Alexandre K. Magnan, Adèle Tanguy, Anaïs Valance, Roxane Moraglia</i>	
De 1992 à 2022 : la difficile mise à l'agenda de l'agriculture dans les négociations sur le climat.....	46
Les marchés du carbone pour l'agriculture et les forêts : quels enjeux, quelles avancées?.....	49
Évaluer les efforts d'adaptation pour le secteur agricole au sein des négociations internationales sur le climat.....	53
Conclusion.....	54
Références bibliographiques.....	55

Chapitre 3. Tensions et synergies entre les concepts d'agriculture climato-intelligente, d'agroécologie et de solutions fondées sur la nature	57
<i>Nadine Andrieu, Audrey Naulleau, Jean-François Le Coq, Marie Hrabanski</i>	
Origine et définitions	58
Mise à l'agenda politique du changement climatique avec les trois concepts	59
Coconception de pratiques innovantes pour faire face aux enjeux climatiques	60
Une impossible intégration des concepts pour l'action climatique ?	61
Références bibliographiques	62
Chapitre 4. Atlas des agricultures du monde et des systèmes alimentaires face au changement climatique	64
<i>Vincent Blanfort, Julien Demenois, Marie Hrabanski, Nicolas Viovy, Jacques André Ndione, Moussa Waongo, Maguette Kaire, Lilian Blanc, Sylvain Schmitt, Séverine Bouard, Catherine Sabinot, Pierre-François Duyck, Philippe Birnbaum, Audrey Leopold, Julien Drouin, Fabian Carriconde, Laurent L'Huillier, Christophe Menkès</i>	
Introduction et méthodes.....	64
Atlas des émissions de gaz à effet de serre des systèmes agri-alimentaires	68
Carte des impacts du changement climatique sur le secteur des terres.....	81
Atlas du carbone des terres émergées et de ses évolutions	86
Évolutions et impacts du changement climatique par grande région sur le secteur des terres.....	95
Références bibliographiques	125
PARTIE 2	
LES SYSTÈMES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES, ET LE SECTEUR DES TERRES : CONTRIBUTEURS ET VICTIMES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	
Section 1. Les grandes problématiques de l'agriculture, des systèmes alimentaires et des forêts face au changement climatique	130
Chapitre 5. Les agricultures familiales face au changement climatique : un potentiel d'adaptation par l'agroécologie	130
<i>Jean-Michel Sourisseau, Jean-François Le Coq</i>	
Par quel bout prendre la question ? Le choix de l'agroécologie familiale	130
L'agroécologie familiale et son potentiel d'adaptation au changement climatique au prisme des éléments de l'agroécologie	133
Conclusion	140
Références bibliographiques	141
Chapitre 6. Changement climatique, (im)mobilités et foncier : quels enjeux pour les agricultures familiales aux Suds ?	143
<i>Sara Mercandalli, Hadrien Di Roberto, Pierre Girard</i>	
Les relations entre changement climatique et dynamiques foncières et migratoires au cœur des moyens d'existence des agricultures familiales.....	144
Le foncier et les mobilités dans les politiques d'atténuation et d'adaptation.....	147
Références bibliographiques	151
Chapitre 7. Eau, agriculture et changement climatique : perspectives globales	155
<i>Magalie Bourblanc, Caroline Lejars, Pierre-Louis Mayaux</i>	
Des pressions croissantes sur les ressources en eau : des systèmes au bord de la rupture	156

De la crise aux conflits, puis aux guerres de l'eau ?	159
Des politiques standardisées et généralisées à l'échelle internationale	161
Un nécessaire changement des politiques vers des modèles moins intensifs et moins gourmands en eau	164
Conclusion.....	165
Références bibliographiques	166
Chapitre 8. Les systèmes alimentaires : à la fois responsables et victimes du changement climatique	168
<i>Hélène David-Benz, Arlène Alpha, Victoria Bancal, Carine Barbier, Yannick Biard, Damien Beillouin, Daniel Fonceka, Franck Galtier, Sandra Payen, Ninon Sirdey, Mathieu Weil</i>	
Des systèmes alimentaires hétérogènes, responsables de près d'un tiers des émissions de GES.....	169
Les systèmes alimentaires affectés par le changement climatique.....	172
Conclusion.....	175
Références bibliographiques	176
Chapitre 9. Forêts et changement climatique	179
<i>Jacques Tassin, Alexandre Caron, Vincent Freycon, Bruno Hérault, Bruno Locatelli, Marie Ange Ngo Bieng, Régis Peltier, Camille Piponiot</i>	
La forêt comme maillon fondamental du climat mondial.....	179
Liens actifs et rétroactifs entre changement climatique et forêts.....	180
Facteurs de variabilité de la vulnérabilité des forêts au changement climatique	181
Pratiques forestières et autres mesures adaptatives	182
Instances internationales, incitations économiques et animations sciences-sociétés.....	185
Conclusion.....	186
Références bibliographiques	186
Chapitre 10. Les débats « agriculture et changement climatique » : le cas des productions animales	189
<i>Christian Corniaux, Vincent Blanfort, Mathieu Vigne, Jonathan Vayssières, Guillaume Duteurtre</i>	
L'élevage, une activité controversée	189
Quelles contributions de l'élevage au changement climatique ?	191
Quelles options pour des systèmes alimentaires durables ?	193
Conclusion : l'élevage, un problème, mais aussi une solution pour la planète	196
Références bibliographiques	196
Chapitre 11. Agriculture, santé et changement climatique : vers une vision « une seule santé »	198
<i>Marisa Peyre, Didier Lesueur, Flavie L. Goutard, Alexandre Hobeika, Alexis Delabouglise, Maxime Tesch, Daan Vink, François Roger</i>	
L'agriculture, le changement climatique et la santé.....	200
Dégradation des écosystèmes naturels et émergences de maladies.....	201
L'urgence d'une approche intégrée « une seule santé » pour limiter le changement climatique et réduire les risques de pandémies.....	202
Conclusion.....	203
Références bibliographiques	204

Chapitre 12. Ce que le pastoralisme nous dit du réchauffement climatique	207
<i>Véronique Ancey, Saverio Krättli, Der Dabire</i>	
Introduction	207
L'histoire des politiques d'élevage appliquées au pastoralisme, à la lumière du changement climatique.....	210
Les facteurs clés permettant ou entravant la résilience des systèmes pastoraux face au réchauffement climatique	214
En conclusion, les leçons du pastoralisme face au dérèglement climatique	217
Références bibliographiques	217
Section 2. Analyse par filière	221
Chapitre 13. Les grandes cultures et le changement climatique : les cas des filières riz, sorgho, canne à sucre et coton	221
<i>Alexia Prades, Patricio Mendez del Villar, Didier Tharreau, Edward Gérardeaux, Raphaëlle Ducrot, Aude Ripoche, David Pot, Mohamed Lamine Tekete, Cyril Diatta, Laurent Laplaze, Boris Parent, Isabelle Basile-Doelsch, Christine Granier, Myriam Adam, Julie Dusserre, Michel Vaksmann, Mathias Christina, Christophe Poser, Bruno Bachelier, Romain Loison</i>	
Introduction : les filières tropicales face au changement climatique, de grands défis pour des agricultures majoritairement familiales.....	221
Pour une riziculture adaptée aux changements globaux.....	222
Sorgho et changement climatique : des besoins d'adaptation, mais aussi un vecteur d'atténuation	225
La canne à sucre face au changement climatique	228
Le coton face au changement climatique	232
Conclusion : les filières tropicales face au changement climatique, des connaissances à partager, des temporalités à gérer, une gouvernance à repenser.....	236
Références bibliographiques	237
Chapitre 14. Palmier à huile : construire la résistance climatique	241
<i>Alain Rival, Cécile Chéron-Bessou</i>	
Situation de la filière.....	242
Les impacts du changement climatique dans le cas du palmier à huile	243
Bilan carbone et solutions d'atténuation.....	245
Évolution prédite de la zone de production.....	246
Conclusion.....	248
Références bibliographiques	248
Chapitre 15. Les productions horticoles face au changement climatique	251
<i>Éric Malézieux, Damien Beillouin, Raphaël Belmin, Isabelle Grechi, Rémi Kahane, Thibaud Martin, Fabrice Le Bellec</i>	
Introduction : le changement climatique, une menace pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale.....	251
Les impacts du changement climatique sur les productions horticoles.....	251
S'adapter au changement climatique : les innovations en marche	254
Les stratégies d'atténuation	258
Conclusion.....	258
Références bibliographiques	259

Chapitre 16. Les systèmes d'élevage face aux défis du changement climatique	261
<i>Vincent Blanfort, Christian Corniaux, Véronique Alary, Guillaume Duteurtre</i>	
Dynamique des filières animales dans le monde	261
Les conséquences du changement climatique sur le secteur de l'élevage	264
Les capacités d'adaptation des différents systèmes d'élevage.....	264
Vers des systèmes d'élevage respectueux du climat.....	267
Conclusion.....	271
Références bibliographiques	272

PARTIE 3

ATTÉNUER ET ADAPTER LES SYSTÈMES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES : QUELLES SOLUTIONS, QUELLES SYNERGIES ?

Section 1. Les solutions au prisme des ressources	276
--	-----

Chapitre 17. Séquestration du carbone dans le sol : une solution pour atténuer le changement climatique et s'y adapter ?	276
---	-----

*Julien Demenois, Damien Beillouin, David Berre, Vincent Blanfort, Rémi Cardinael,
Abigail Fallot, Frédéric Feder, Christophe Jourdan, Dominique Masse, Tom Wassenaar*

L'impact des activités humaines sur le carbone organique du sol et ses implications pour la régulation du climat	277
En Afrique de l'Ouest semi-aride et subhumide, les approches territoriales pour penser l'usage de la biomasse et les flux de nutriments.....	281
La séquestration du carbone dans le sol et le risque de maladaptation	283
Conclusion.....	285
Références bibliographiques	285

Chapitre 18. Quelles solutions pour la gestion de l'eau agricole face au changement climatique ?	288
---	-----

Caroline Lejars, Koladé Akakpo, Magalie Bourblanc, Emeline Hassenforder, Pierre-Louis Mayaux

Des solutions techniques et agroécologiques diversifiées, mais aux impacts mal évalués et parfois pervers	289
Des solutions de gouvernance autour du partage de l'eau qui s'avèrent de plus en plus inefficaces.....	290
La nécessité de développer des approches territoriales concertées vers une transition agroécologique intégrant la question de l'eau	292
Conclusion.....	295
Références bibliographiques	296

Chapitre 19. La production d'énergie par l'agriculture pour faire face au changement climatique	298
--	-----

François Pinta, Antoine Ducastel, Patrice Dumas, Marie Hrabanski, Grâce Chidikofan

Production d'énergie à partir de biomasses agricoles	298
Production d'énergie et conflits d'usage de l'agrivoltaïsme.....	303
Conclusion : une concurrence accrue entre production alimentaire et énergétique.	305
Références bibliographiques	306

Section 2. Solutions et innovations	307
Chapitre 20. Adaptation au changement climatique : quelles pratiques innovantes dans les systèmes de production tropicales ?	307
<i>Éric Justes, Benoit Bertrand, Hervé Etienne, Frédéric Gay, Bruno Rapidel, Philippe Thaler, François-Xavier Côte</i>	
L'adaptation au changement climatique des cultures tropicales	308
Exemples d'adaptation au changement climatique de cultures pérennes tropicales	313
Conclusion.....	316
Références bibliographiques	316
Chapitre 21. S'adapter et innover en matière d'espèces et de variétés cultivées : un rôle clé pour la diversité cultivée et naturelle ?	320
<i>Sophie Lérain, Myriam Adam, Mathieu Gonin, Cécile Grenier, Pierre Marraccini, Fabienne Micheli, Maria Camila Rebolledo, Clément Rigal, Mohamed Lamine Tékété, Michel Vaksman, Hervé Étienne, Delphine Luquet</i>	
La diversification des systèmes de culture comme levier durable d'adaptation au changement climatique.....	321
L'agrobiodiversité comme ressource pour alimenter les programmes de sélection et d'amélioration des plantes face au changement climatique	322
Conclusion et perspectives.....	325
Références bibliographiques	330
Chapitre 22. Territorialiser la lutte contre le changement climatique	333
<i>Camille Jahel, Amandine Adamczewski, Jérémy Bourgoïn, Guillaume Lestrelin, Ronan Mugelé, René Pocard Chapuis, Fatma Rostom, Tiago Teixeira Da Silva Siqueira, Elodie Valette</i>	
Le territoire, arène de concertation et de négociation collective	334
Vers des initiatives multisectorielles et basées sur les complémentarités spatiales.....	334
Les approches territoriales pour une justice climatique.....	337
Les approches territoriales à l'intersection des échelles d'action	339
Conclusion.....	341
Références bibliographiques	342
Section 3. Solutions multiniveaux	344
Chapitre 23. Systèmes alimentaires et changements climatiques : atténuation et adaptation dans les chaînes agri-alimentaires et dans la consommation..	344
<i>Marie Walser, Carine Barbier, Nicolas Bricas, Patrice Dumas</i>	
Atténuation et adaptation aux étapes de la transformation, du stockage, du transport et de la distribution	345
Atténuation et adaptation aux changements climatiques dans la consommation.....	348
Accompagner les acteurs et les mangeurs : réponses politiques face aux changements climatiques.....	350
Références bibliographiques	352
Chapitre 24. Le méthane agricole : un levier de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour respecter l'accord de Paris	354
<i>Rémi Prudhomme, Myriam Adam, Mohamed Habibou Assouma</i>	
Politiques de réduction des émissions de méthane	356
Technologies de réduction de méthane en agriculture.....	359
Conclusion : l'aspect multidimensionnel du méthane	362
Références bibliographiques	363

Chapitre 25. L'hétérogénéité des voies d'institutionnalisation des politiques et des instruments climatiques pour l'agriculture : une comparaison entre le Sénégal, la Colombie, le Brésil et la France	365
<i>Marie Hrabanski, Jean François Le Coq, Gilles Massardier, Carolina Milhorance, Yves Montouroy, Éric Sabourin</i>	
Institutionnalisation des politiques de transition agricole : cadrage, degré d'extraversion et d'intégration	366
L'institutionnalisation politique du problème climatique analysée selon le type d'instrument et leur degré d'innovation	370
Constats et pistes pour des politiques transformatives	373
Références bibliographiques	374
Chapitre 26. Finance, agriculture et climat	377
<i>Antoine Ducastel</i>	
Mesurer le <i>financial gap</i> pour mieux le combler?	377
Promouvoir des instruments financiers innovants pour attirer les capitaux privés... ..	379
« Verdir » les financements publics existants	382
Conclusion	384
Références bibliographiques	385
Chapitre 27. Les interfaces entre science et décision politique face au défi du changement climatique	387
<i>Carolina Milhorance, Antoine Perrier, Julien Demenois, Vincent Freycon, Camille Piponiot, Paul Luu, Adèle Gaveau, Marie Hrabanski, Sélim Louafi</i>	
Repenser les relations entre science et décision politique	388
L'interface science-politique au croisement des enjeux climatiques, alimentaires et écologiques	392
Conclusion	395
Références bibliographiques	396
Conclusion. Renforcer les institutions scientifiques nationales indépendantes dans un monde sous tension géopolitique et financière	399
<i>Michel Eddi, Sébastien Treyer</i>	
Une mise à l'agenda réussie de transformations réellement systémiques	399
Conflits et compétition : un contexte politique entièrement différent de l'esprit de coopération de la COP21	399
Le rôle clé des référentiels des acteurs financiers pour évaluer les cobénéfices au-delà du carbone	400
Définir des trajectoires nationales de transformation	400
Nourrir un dialogue international sur les investissements pour la transformation	401
Références bibliographiques	401
Postface de Stéphane Le Foll	403
Remerciements	406
Abréviations	407
Liste des auteurs	409

Préface de Laurence Tubiana

*Présidente et directrice générale de la Fondation européenne pour le climat
Fondatrice de l'Institut du développement durable
et des relations internationales (Iddri)
Professeure et directrice de la chaire « développement durable » de Sciences Po.*

Dans un contexte géopolitique complexe et incertain, la COP30, qui se tiendra au Brésil en novembre 2025, constitue une occasion importante pour revitaliser l'engagement multilatéral dans la lutte pour le climat. Sous la présidence de Lula, le Brésil cherche en effet à se positionner comme un leader climatique et à montrer que le multilatéralisme reste essentiel pour faire face aux défis globaux.

Le Brésil incarne à la fois les conséquences du dérèglement climatique et les opportunités économiques, sociales et financières inhérentes à l'action climatique. Le pays subit déjà de lourdes pertes liées aux catastrophes naturelles ; les inondations, incendies et sécheresses affectent son PIB et sa stabilité financière. En outre, l'accueil de la COP30 à Belém symbolise la volonté du Brésil de mettre la forêt amazonienne et ses habitants au centre des débats. La déforestation en Amazonie est une préoccupation majeure, et la forêt tropicale est proche d'un point de bascule qui pourrait avoir des répercussions catastrophiques pour l'ensemble de la planète. Le président Lula souhaite que le monde considère l'Amazonie non seulement comme un puits de carbone crucial, mais aussi comme une région habitée par des millions de personnes dont la survie dépend de la protection de l'écosystème. Politiquement, le Brésil illustre également l'impact du leadership gouvernemental sur l'action climatique. Après plusieurs années d'augmentation des émissions des gaz à effet de serre, le retour du président Lula a marqué un engagement en faveur de la réduction de ces émissions et de la préservation de l'Amazonie. Enfin, le Brésil, en tant que membre du G20 et des Brics, joue un rôle diplomatique clé et pourrait aider à faire progresser l'agenda climatique malgré les tensions géopolitiques entre les États-Unis et la Chine.

Le défi de la COP30 sera de replacer le climat au centre des préoccupations internationales. L'histoire des COP montre que l'engagement des citoyens et des acteurs non gouvernementaux est essentiel pour faire avancer les décisions politiques. Or, les récentes COP, notamment celles de Bakou et Dubai, ont marginalisé la société civile. Le Brésil veut inverser cette tendance en intégrant les citoyens dans le processus décisionnel, tout en plaçant la justice sociale au cœur des débats. L'opinion publique mondiale reste massivement favorable à une action climatique forte, et les savoirs autochtones et scientifiques doivent contribuer à éclairer les débats. Plus que jamais, les connaissances scientifiques, qui pourtant font aujourd'hui l'objet d'une offensive inédite à l'échelle internationale, doivent continuer à guider les orientations politiques.

À l'interface entre les enjeux climatiques, énergétiques, de sécurité alimentaire, de développement et de biodiversité, les questions agricoles, alimentaires et forestières sont désormais devenues des sujets incontournables au sein des COP. Parce qu'il rassemble des connaissances scientifiques émanant de chercheurs spécialistes de ces problématiques et produites dans les territoires diversifiés du Sud particulièrement affectés par le changement climatique (Afrique, Amérique latine et centrale, Asie, etc.), cet ouvrage constitue une référence essentielle pour comprendre une partie des enjeux de la COP30 et des négociations climatiques à venir.

Préface d'Élisabeth Claverie de Saint Martin

Présidente-directrice générale du Cirad

Cet ouvrage arrive dix ans après la parution du livre collectif coédité par le Cirad et intitulé *Changement climatique et agricultures du monde*¹, dans un contexte similaire caractérisé par la publication d'un rapport du Giec². Le renouvellement de cet ouvrage est motivé par les conclusions du 6^e rapport du Giec, qui réaffirment l'urgence de lutter contre le réchauffement de la planète et la nécessité de s'y adapter rapidement. Les secteurs de l'agriculture, des systèmes alimentaires et des forêts sont tout particulièrement concernés par les dérèglements climatiques en cours et à venir, notamment dans les pays du Sud, plus vulnérables que les pays industrialisés. Il est important pour le Cirad et ses partenaires de partager les connaissances récentes produites sur ces questions dans les pays tropicaux et méditerranéens, où les incertitudes sont bien plus fortes que dans les pays industrialisés. Cet ouvrage arrive à un moment singulier de l'histoire du Cirad qui célébrait ses quarante ans en 2024 avec des conférences autour du thème : « 40 ans de recherche agricole au Sud pour nourrir la planète en 2050 ». Le sens premier et universel de l'agriculture est bien de permettre à l'humanité de se nourrir et d'être en bonne santé, et donc d'assurer la sécurité alimentaire. Pour ce faire, croiser les enjeux sociaux, économiques et politiques et intégrer la dimension du dérèglement climatique est crucial.

À l'échelle mondiale, les systèmes agricoles, alimentaires et forestiers sont des contributeurs majeurs aux changements climatiques en produisant plus du tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES), lorsqu'on inclut la déforestation et les chaînes d'approvisionnements en amont et en aval. Ils sont aussi victimes des effets de ces changements, notamment dans les pays du Sud. Cependant, le secteur des terres se distingue d'autres secteurs par des capacités d'adaptation multiples, combinées à un potentiel d'atténuation très significatif avec la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse. Le secteur des terres joue donc un rôle crucial pour assurer le développement des sociétés et leur transition dans un contexte dominé par le changement climatique, même si ce dernier menace régulièrement la production agricole, fragilisant ainsi les systèmes alimentaires mondiaux, tout particulièrement dans les pays du Sud. Paradoxalement, l'agriculture a été officiellement absente des négociations climatiques internationales jusqu'en 2011. Depuis, la prise en compte des enjeux agricoles y est croissante, mais ces derniers ne sont pas considérés ni traités de la même manière dans les pays du Nord et dans ceux du Sud.

1. Torquebiau E. (coord.), 2015. *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, éditions Quæ, 328 p.

2. Giec : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Dans les pays du Sud, la priorité est principalement donnée à l'adaptation au changement climatique, en raison des enjeux liés à la sécurité alimentaire. Dans les pays du Nord, qui sont majoritairement responsables des émissions historiques de GES et qui disposent *a priori* de meilleures capacités techniques d'adaptation, l'accent est mis sur l'atténuation dans le cadre de la gouvernance climatique mondiale. Au-delà de ces différences, l'histoire globale de l'agriculture peut apparaître comme une adaptation permanente à une variabilité climatique « naturelle » intra et interannuelle. Mais le changement climatique en cours, lié à l'augmentation de la concentration en carbone atmosphérique, est d'une tout autre ampleur, il introduit des aléas de plus en plus intenses et fréquents : saisonnalité irrégulière, précipitations décalées dans le temps ou réparties différemment, événements extrêmes, températures modifiant les dates des récoltes, bioagresseurs nouveaux ou plus actifs. Ces divers impacts ont des conséquences fortes sur la sécurité alimentaire, constituant globalement une contrainte nouvelle pour les agriculteurs et pour les éleveurs du monde, même si dans certaines régions des impacts peuvent s'avérer positifs actuellement (augmentation des rendements sous certaines latitudes notamment). Dans les pays du Sud, les effets du changement climatique sur le secteur agricole sont particulièrement graves. Par exemple, la grande majorité des surfaces agricoles en Afrique ne sont pas irriguées et dépendent totalement des précipitations. L'usage des engrais minéraux est peu présent, ce qui implique de ne pouvoir compter que sur la fertilité naturelle des sols ou sur celle que peuvent apporter les arbres, ou souvent, sur des amendements organiques lorsque des activités d'élevage sont présentes. Au-delà de ces vulnérabilités agronomiques et écologiques, c'est l'ensemble des systèmes agricoles et alimentaires qui doit s'adapter, ce qui nécessite aussi des innovations en matière économique, sociale, politique et financière à l'échelle des territoires. Conjointement, les systèmes agricoles et alimentaires contribuent aux efforts d'atténuation du changement climatique en influençant la diminution des émissions de GES et/ou en augmentant la séquestration (capture et stockage) du carbone.

Face aux enjeux majeurs et aux changements globaux qui se déclinent diversement aux échelles régionales, nationales et territoriales, de nouveaux défis interpellent la recherche et l'invitent à contribuer à la transition des systèmes agricoles et alimentaires. Il s'agit d'analyser, d'évaluer et de concevoir des solutions durables et intégratives pour atténuer le changement climatique et s'y adapter.

Dans ce contexte, le Cirad a fait le choix en 2018, pour la première fois dans son histoire, d'inscrire les enjeux climatiques comme une priorité scientifique stratégique. Cela s'est traduit par la formulation d'engagements concrets dans son document de vision stratégique 2018-2028. Le champ thématique stratégique (CTS) « Accompagner toutes les agricultures du Sud au changement climatique » est jugé prioritaire pour l'établissement et fait l'objet d'une animation scientifique interdisciplinaire, en lien avec les partenaires du Cirad.

La diversité actuelle des actions du Cirad avec ses partenaires se structure notamment à travers cinq fronts de science couvrant plusieurs domaines (agronomie, amélioration génétique, écologie, socio-économie prenant en compte les acteurs du territoire, etc.) : (1) mettre en œuvre des politiques publiques agricoles durables d'adaptation au changement climatique et à son atténuation; (2) diversifier les systèmes de productions agricoles pour plus de durabilité et de résilience face au changement climatique;

(3) comprendre la résilience des forêts tropicales et des hommes qui en vivent face au changement climatique; (4) repositionner l'élevage dans les enjeux du changement climatique; (5) développer des approches intégrées de gestion de l'eau pour plus de résilience face au changement climatique.

Au regard de l'urgence climatique dans les pays du Sud, le seul recours à des modèles issus des pays du Nord s'avère insuffisant voire inadapté. Fort de son implantation dans une cinquantaine de pays d'Afrique, d'Amérique latine, d'Asie et du Pacifique, le Cirad contribue à la production de connaissances sur les systèmes agricoles au Sud, dans des contextes divers, pour répondre à des défis de développement spécifiques identifiés avec ses partenaires. Au vu des projections climatiques alarmantes, l'expertise développée par le Cirad et ses partenaires depuis plus de vingt ans pour les agricultures du Sud est également appelée à bénéficier au développement de solutions durables au Nord. Cela implique de positionner les questions de recherche traitées dans une perspective de partenariat équilibré entre le Nord et le Sud, où l'expertise scientifique du Cirad et de ses partenaires du Sud aura un rôle éclairant.

Cet ouvrage collectif a été conçu dans un esprit de partage des connaissances obtenues par le Cirad et ses partenaires, dans le cadre de l'animation scientifique du CTS « Accompagner toutes les agricultures du Sud au changement climatique ». Ce champ thématique rassemble une communauté interdisciplinaire de cent cinquante scientifiques du Nord et du Sud, porteuse de savoirs et savoir-faire construits avec les partenaires du Sud, en réponse à leurs problématiques climatiques, dans une grande diversité de situations pédoclimatiques et de socio-écosystèmes.

Au-delà de la communauté scientifique, cet ouvrage s'adresse aux décideurs politiques et à la société civile. Il contribue à renforcer le rôle du Cirad comme interlocuteur de référence en recherche sur les questions reliant climat et agriculture.

« Éviter l'ingérable, gérer l'inévitable. »

François Gemenne, coauteur du 6^e rapport du Giec.

Avant-propos

Encore un livre sur le changement climatique ?

Oui. D'abord, parce que dans un contexte où les sciences, celles du climat en particulier, sont souvent ignorées et de plus en plus contestées, voire réduites au rang d'opinion, il est plus que jamais essentiel de marteler ces faits scientifiques en les expliquant et en les rendant accessibles. Avec une dose d'optimisme, gageons qu'ils permettent d'éclairer l'action publique, de guider les pratiques des acteurs concernés, de contribuer à la formation et d'informer tout simplement sur des processus à l'œuvre qui affectent l'ensemble de la société et pas seulement les paysans et les agriculteurs du monde.

Oui, aussi, parce que cet ouvrage met en lumière les spécificités des pays du Sud souvent sous-représentés dans les travaux scientifiques, alors même qu'ils figurent parmi les plus vulnérables au changement climatique. À l'heure où la solidarité internationale est remise en question et le multilatéralisme rediscuté, le monde scientifique se doit de résister. En se focalisant sur les pays du Sud, cet ouvrage, disponible gratuitement en version numérique, contribue à ces engagements.

Enfin, ce travail collectif rassemble l'expertise scientifique de femmes et d'hommes qui ont mené des travaux de terrain au Sud sur les enjeux liés à l'agriculture, à l'élevage, aux forêts et aux systèmes alimentaires.

Face à un défi climatique sans précédent, ces domaines occupent une place particulière. Contrairement à de nombreux autres, ils répondent, tant bien que mal, à un besoin vital et quotidien : nourrir l'humanité. Cette responsabilité cruciale, dans ce contexte d'urgence climatique, exige des solutions durables et scientifiquement fondées. Pour assumer cette responsabilité, il faut élaborer des solutions plus intégrées qui tiennent compte aussi de la diversité et de la complexité croissante de ces systèmes alimentaires et de leurs interactions avec l'environnement et la société. Dans ce contexte, la science a un rôle majeur à jouer en étroite collaboration avec les acteurs concernés.

Introduction

Les systèmes agricoles et alimentaires, contributeurs, victimes du changement climatique et porteurs de solutions

Marie Hrabanski, Vincent Blanfort, Julien Demenois, Emmanuel Torquebiau

L'agriculture, les systèmes alimentaires et les forêts tiennent une place importante dans les dérèglements climatiques en cours et à venir. Le « secteur des terres » (agriculture, foresterie et autres utilisations des terres, ou AFOLU pour l'acronyme anglais signifiant Agriculture, Forestry and Other Land Use) est celui le plus fortement affecté par le changement climatique. Les productions agricoles, animales et forestières doivent déjà faire face à ses effets, en ce qui concerne la fréquence et l'intensité des événements extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses, feux de forêt, inondations), et à cela s'ajoutent des tendances à long terme déjà en œuvre, notamment la hausse des températures et les changements dans le régime des précipitations intra et interannuelles. Ces impacts multiples ont des conséquences sur les ressources (eau, sol, biodiversité, etc.) et déstabilisent fortement les systèmes alimentaires mondiaux, notamment dans les pays du Sud global, plus vulnérables que les pays du Nord global¹.

Dans le même temps, en considérant l'ensemble des systèmes agricoles et alimentaires mondiaux ou *agri-food systems*², c'est-à-dire en intégrant à la fois les activités de production et de postproduction, la production au sein de l'exploitation agricole (*farm gate*) et le changement d'usage des terres, on constate que ces systèmes génèrent près d'un tiers de toutes les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle mondiale (Crippa *et al.*, 2021 ; Rosenzweig *et al.*, 2020 ; Tubiello *et al.*, 2022). Au cours de la période 1990-2019, ces émissions ont déjà augmenté globalement de 17 %, principalement en raison d'un doublement des émissions des processus de pré et de postproduction : au niveau de l'exploitation agricole, les émissions ont augmenté de 9 %, tandis que celles liées à l'utilisation des terres ont diminué de 25 % (Tubiello *et al.*, 2022). On observe cependant de fortes disparités entre les pays industrialisés et les autres.

Les systèmes agricoles et alimentaires et les forêts se distinguent toutefois d'autres secteurs (transport, énergie, etc.) dans la mesure où ils fournissent des services

1. Le « Nord global », ou « pays du Nord », désignait autrefois l'ensemble des pays dits « développés ». L'appellation, « pays du Sud global », ou « pays du Sud », fait référence aux pays autrefois dits « du tiers-monde ». La notion regroupe aujourd'hui des États du Sud, ensemble hétérogène de pays non alignés. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/10/26/le-sud-global-cet-ensemble-heterogene-de-pays-non-alignes_6147333_3232.html.

2. Nous nous référons à la méthodologie FAOSTAT (https://files-faostat.fao.org/production/GT/GT_en.pdf) pour caractériser les émissions de gaz à effet de serre (GES) des différents secteurs des systèmes agricoles et alimentaires ou *agri-food systems*.

indispensables à l'humanité (alimentation, services écosystémiques, services climatiques). Ces systèmes devront donc relever un défi de taille : nourrir une population mondiale croissante (autour de dix milliards en 2100) sous la contrainte du changement climatique, en mobilisant les capacités d'adaptation incontestables qui les caractérisent. Ils présentent en même temps un très fort potentiel de réduction de leurs émissions de GES, auquel s'ajoute l'aptitude du secteur des terres à séquestrer du carbone dans les sols et dans la biomasse, le secteur AFOLU devenant ainsi une partie de la solution au changement climatique. De ce fait, bien que souvent présentées comme antagonistes, les stratégies d'adaptation et d'atténuation agricoles et alimentaires peuvent présenter un potentiel de synergies conséquent. Dans les pays du Sud, la priorité a été largement donnée à l'adaptation, du fait notamment de la question de la sécurité alimentaire, alors que dans les pays du Nord, pays majoritairement responsables des émissions historiques de GES, et aux capacités techniques d'adaptation

Encadré 0.1. Penser l'adaptation et l'atténuation en synergie

Si les enjeux d'atténuation et d'adaptation renvoient à des questions biophysiques et politiques bien distinctes, aujourd'hui ceux-ci se doivent d'être traités conjointement. Le 6^e et dernier rapport du Giec* (IPCC, 2023) confirme que la mise en œuvre conjointe de mesures d'atténuation et d'adaptation et les compromis entre ces mesures favorisent les cobénéfices et les synergies pour la santé humaine et pour le bien-être de l'homme tout en contribuant au développement durable. Le groupe II du Giec travaillant sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité (IPCC, 2022) cite de nombreuses options d'adaptation qui présentent divers degrés de synergies avec l'atténuation, notamment dans le secteur des terres (adaptation basée sur les forêts, agroforesterie, gestion de la biodiversité, gestion améliorée des cultures et des systèmes d'élevage). L'atténuation peut être une des fonctions de l'adaptation, par exemple un itinéraire technique qui améliore la production végétale ou animale tout en augmentant le stock de carbone dans le sol ou dans la biomasse. De même, développer des politiques pour l'atténuation peut aussi permettre de mieux s'adapter, grâce par exemple au développement d'incitations financières pour des pratiques agroécologiques. Il existe donc des solutions biotechniques, institutionnelles et politiques qui peuvent répondre en même temps aux défis de la sécurité alimentaire, de l'atténuation et de l'adaptation. Cet équilibre est complexe et, compte tenu des contraintes de temps et de ressources disponibles pour faire face aux changements climatiques, il importe de s'assurer que les mesures d'adaptation choisies par les décideurs n'alourdissent pas le bilan des émissions. Lorsque c'est le cas, on parle de « maladaptation », un terme utilisé pour décrire les effets néfastes et contraires aux effets positifs attendus de certaines mesures d'adaptation (Boutroue *et al.*, 2022 ; Magnan *et al.*, 2016). Une plantation clonale d'arbres à croissance rapide, par exemple, donnera l'illusion d'une adaptation efficace, mais qui peut épuiser le sol et augmenter la vulnérabilité locale en cas d'attaque par des ravageurs ou des maladies. Pour répondre au risque de maladaptation, il convient de privilégier les stratégies « sans regret », c'est-à-dire celles qui présentent des avantages, quelle que soit la situation future. La protection d'écosystèmes riches en biodiversité et en carbone ou la restauration de milieux dégradés constituent des options sans regret associant efficacement adaptation et atténuation.

* Giec : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. En anglais : IPCC, pour Intergovernmental Panel on Climate Change.

a priori plus élevées, l'attention a porté davantage sur les enjeux d'atténuation dans la gouvernance globale du climat. Toutefois, aujourd'hui, un consensus s'est imposé, de façon à penser ces deux enjeux étroitement imbriqués, en synergie.

Analyser, proposer et trouver des solutions durables visant à l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique et à son atténuation constitue un défi pour la recherche. Cet ouvrage se veut une contribution à ces objectifs; il mobilise des réflexions scientifiques inter et transdisciplinaires à l'interface entre les sciences de l'environnement (agronomie, amélioration génétique, écologie, etc.) et les sciences sociales (économie, géographie, sociologie, sciences politiques, etc.), en intégrant la complexité liée aux dynamiques multiniveaux du dérèglement climatique et à la diversité de ces systèmes et de leur contexte dans le monde. En se nourrissant du dernier rapport du Giec (AR6), les contributions produites par les chercheurs du Cirad et leurs partenaires vont encore plus loin en proposant un ouvrage entièrement consacré aux enjeux biophysiques, génétiques, agronomiques, sociaux, institutionnels et politiques des questions agricoles et alimentaires et des forêts face au changement climatique. Ces différents chapitres contribuent dès lors à développer des systèmes agricoles et alimentaires inclusifs et durables, à des échelles et à des pas de temps variés, notamment pour les pays du Sud qui sont les plus vulnérables.

Ce chapitre introductif s'organise en trois parties à l'image de l'ouvrage, avec un préambule, qui s'attache à définir les termes clés de compréhension des enjeux d'adaptation et d'atténuation des systèmes agricoles, alimentaires et des forêts. La première partie est consacrée à l'analyse de la montée en puissance des enjeux agricoles et alimentaires dans les agendas scientifiques et politiques, à l'échelle internationale. Elle comprend aussi une section intitulée « Atlas des agricultures du monde et des systèmes alimentaires face au changement climatique », dans laquelle des cartes du changement climatique ont été produites pour saisir ces enjeux à différents niveaux, (1) à l'échelle régionale des continents (Europe, Amérique, Afrique, Océanie, Asie), (2) au prisme des émissions de GES (par filière, par pays, etc.), (3) et enfin sur la question des effets du changement climatique et des enjeux d'atténuation. La deuxième partie de l'ouvrage souligne dans quelle mesure les systèmes agricoles et alimentaires (en incluant les forêts) sont à la fois victimes et contributeurs du changement climatique. Enfin, la troisième partie aborde la question essentielle des solutions sous différentes dimensions (techniques, territorialisées, politiques, etc.), avec pour objectif d'adapter les systèmes agricoles et alimentaires au changement climatique et de contribuer à l'atténuation des GES.

1. Le secteur des terres et les systèmes alimentaires face au changement climatique : enjeux sémantiques et épistémologiques

Plusieurs termes et acronymes tentent de rendre compte de la place des systèmes alimentaires, de l'agriculture ou encore des forêts dans les émissions de GES. Afin de préciser ces termes et leurs enjeux, il apparaît nécessaire de les présenter et d'identifier éventuellement leur complémentarité et leurs recouvrements.

La FAO (2024) utilise le terme *agri-food systems* pour appréhender l'ensemble des étapes nécessaires pour nourrir une population : c'est celui que nous mobilisons dans l'ouvrage. Ce terme, en français, correspond à la locution *systèmes agri-alimentaires*

ou *systèmes alimentaires*. Ces systèmes englobent donc ce que la littérature identifie comme les « changements d'usage des terres » (*land use*), les « étapes de pré récolte » (production de fertilisants, irrigation), la « production » (*farm gate*) et les « étapes de post récolte » (le transport, la transformation, la distribution, la consommation et enfin la gestion des déchets). À côté de ce terme, d'autres notions et acronymes cohabitent et renvoient à des enjeux distincts et/ou complémentaires.

Depuis la parution du 5^e rapport du Giec en 2014, le secteur des terres renvoie au secteur AFOLU (tableau 0.1). En ajoutant l'agriculture à l'ancien secteur UTCATF (Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie), ce nouvel

Tableau 0.1. Détails des correspondances entre les secteurs du Giec, de la FAO et leur agrégation utilisée dans la base de données FAOSTAT. Source : FAO (2024).

Catégories Giec pour les inventaires GES		Catégories de la FAO	
LULUCF	AFOLU	Terres forestières	Terres forestières
		Brûlage de biomasse forestière	Feux, autres forêts
			Feux, sols organiques
			Feux, forêt tropicale humide
		Conversion de terre forestière	Conversion nette de forêt
		Drainage de sols organiques	Drainage de sols organiques
Mise en culture d'histosols			
Agriculture	Engrais azotés minéraux	Fertilisants de synthèse	
	Résidus de cultures	Résidus de cultures	
	Apport de fumier dans les prairies et les parcours	Fumier laissé dans les prairies	
	Apport de fumier aux sols	Apport de fumier aux sols	
	Gestion du fumier	Gestion du fumier	
	Fermentation entérique	Fermentation entérique	
	Brûlage dirigé de la savane	Feux de savane	
	Brûlage des résidus de culture	Brûlage des résidus de culture	
	Culture du riz	Culture du riz	
	Énergie		Consommation d'énergie dans l'exploitation agricole
		Production de fertilisants	
		Production de pesticides	
		Consommation alimentaire des ménages	
		Emballage alimentaire	
		Transformation des aliments	
Procédés industriels et utilisation des produits (Ippu)		Transport des denrées alimentaires	
Déchets		Commerce de détail alimentaire	
		Élimination des déchets alimentaires	

acronyme, AFOLU, s'est imposé. Il est néanmoins utile de comprendre ce que couvre le sigle UTCATF (ou LULUCF en anglais, pour Land Use, Land Use Change and Forestry). Pour ce faire, il faut rappeler que les émissions anthropiques de CO₂ ont deux origines principales : la combustion des énergies fossiles et le mode d'utilisation des terres. Les inventaires de GES regroupent les émissions et les absorptions de CO₂ provenant de l'utilisation des terres dans la catégorie des UTCATF. Le solde de ces inventaires GES s'obtient en calculant la différence entre les émissions et les absorptions de CO₂ par les différents réservoirs terrestres (biomasse, sols, etc.) et en les rapportant aux surfaces gérées d'un territoire. Le solde du territoire peut être positif.

Gaz à effet de serre				Agrégats FAO	
CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Gaz fluorés		
●					
	●	●			
●	●			Changement d'usage des terres (<i>land use change</i>)	Terres agricoles
	●	●			
●				Émissions à la ferme (<i>farm gate</i>)	
●					
		●			
		●			
		●			
		●			
		●			
	●	●			
	●				
	●	●			
	●	●			
	●				
●	●	●			
●		●		Postproduction	
●	●	●			
●	●	●			
●	●	●			
●	●	●			
●	●	●			
●	●	●			
●	●	●	●		
●	●	●			

C'est alors une source de GES (par exemple du fait de la déforestation). Si le solde du territoire est négatif, on parle alors de puits de carbone (cas d'une forêt en croissance) ou d'émissions négatives. Le secteur UTCATF est le seul qui à ce jour permet de réaliser de telles émissions négatives grâce aux puits de carbone naturels : la biomasse (forêts, haies, agroforesterie) et les sols (sols agricoles incluant les pâturages).

L'acronyme AFOLU, promu depuis 2014, ajoute donc l'agriculture au précédent secteur UTCATF, et renvoie désormais plus largement au « secteur des terres ». Celui-ci ne recoupe toutefois pas entièrement les systèmes agri-alimentaires (ou *agri-food systems*), puisqu'il ne prend pas en compte les émissions de GES produites aux étapes de post-récolte des systèmes alimentaires (transport, transformation, distribution, consommation, gestion des déchets).

Dans cet ouvrage, nous utiliserons donc le terme *systèmes agricoles et alimentaires*, qui équivaut aussi à la notion de système agri-alimentaire, lorsque nous engloberons le secteur AFOLU et les étapes de post-récolte. *A contrario*, le terme *systèmes agricoles* désigne uniquement le secteur AFOLU.

Enfin, il s'agit de rappeler que les systèmes agricoles et alimentaires sont à l'origine de trois types de GES (encadré 4.1). Le protoxyde d'azote (N_2O) est essentiellement produit lors de la fabrication des engrais et de leur épandage. Le méthane (CH_4) provient du processus digestif naturel des ruminants (méthane entérique), de la gestion des effluents et de la riziculture inondée. Enfin, le dioxyde de carbone (CO_2) a diverses origines dont l'utilisation des combustibles fossiles, la déforestation, la décomposition de la matière organique du sol par les micro-organismes, la respiration des plantes et des animaux. Les systèmes alimentaires et notamment les étapes de post-récolte (transport, transformation, distribution, consommation, gestion des déchets) émettent principalement du CO_2 .

Au-delà de ces précisions et des enjeux sémantiques exposés sur le secteur AFOLU, des controverses fortes traversent l'utilisation même de l'expression *changement climatique*, utilisée dans la plupart des chapitres de cet ouvrage. En effet, certains auteurs y voient un risque de gommer les responsabilités politiques des acteurs et des pays qui en sont à l'origine (Bonneuil et Fressoz, 2013). Autrement dit, l'expression *changement climatique* risque d'euphémiser les facteurs de risques du dérèglement climatique. Le vocabulaire importe pour cerner le problème avant d'en mesurer les risques : il fait partie du cadrage politique qui distribue — ou efface — les responsabilités. Désigner tout le monde — ou personne — comme responsable du réchauffement climatique participe à dire que celui-ci est inéluctable et sans solution. Différents types d'acteurs (pays développés, grandes entreprises, individus les plus riches) contribuent de manière disproportionnée à l'augmentation de la température, surtout si, au-delà des contributions actuelles, on considère le cumul des émissions de CO_2 liées aux activités humaines depuis l'ère industrielle. Il y a là une double peine : ce sont ceux qui contribuent le moins au problème qui risquent de subir le plus les conséquences du changement climatique (Althor *et al.*, 2016; IPCC, 2019) et, réciproquement, ce sont les pays les plus responsables qui sont les moins vulnérables (Guivarch et Taconet, 2020).

Loin de dépolitiser le changement climatique, cet ouvrage, en analysant les enjeux du changement climatique pour les systèmes agricoles et alimentaires dans des contextes politiques variés, notamment dans les pays les plus vulnérables, s'inscrit dans les

réflexions sur la politisation du changement climatique. Il souligne la vulnérabilité des pays du Sud, la responsabilité historique des pays émetteurs passés et celle des pays les plus émetteurs d'aujourd'hui.

2. Une accélération de la climatisation des questions agricoles et alimentaires dans les arènes scientifiques et politiques

À la suite de ces précisions sémantiques et définitionnelles, il s'agit à présent de présenter la première partie de l'ouvrage. Celle-ci analyse comment les enjeux agricoles sont abordés dans les enceintes scientifiques du climat depuis 1988 et la création du Giec, mais également dans les arènes politiques depuis la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) signée en 1992 à Rio. Depuis, la question climatique s'est progressivement globalisée dans le sens où elle s'est chargée de nombreux autres problèmes (de développement et d'énergie en particulier) qui interviennent dans les débats (aspect centripète). Symétriquement, toute une série d'acteurs, de communautés humaines, des milieux naturels et des secteurs d'activités (océans, pêche, forêts, agriculture, sécurité alimentaire, etc.) se sentent concernés par le problème climatique. Ils veulent être partie prenante de cette négociation pour y faire prévaloir leurs préoccupations et y traduire leurs intérêts en termes climatiques (aspect centrifuge) (Dahan, 2016 et 2018; Aykut *et al.*, 2017). Ce double mouvement dit de « climatisation » concerne aussi les enjeux agricoles et alimentaires. Ce processus d'intégration progressive des enjeux dans les agendas politiques et scientifiques internationaux (Hrabanski et Le Coq, 2022) est l'objet de la première partie de notre ouvrage.

Les négociations climatiques étaient focalisées jusqu'à la fin des années 1990 sur les questions d'atténuation au changement climatique et, par conséquent, seules les forêts, considérées comme des puits de carbone, étaient prises en compte. Puis, à partir des années 2000, la montée en puissance des enjeux d'adaptation, poussés par les pays du G77, a mis en évidence l'importance des effets du changement climatique sur le secteur des terres et sur les systèmes alimentaires, dans les pays du Nord et plus encore dans les Suds (Hrabanski, 2020; Hrabanski et Le Coq, 2025). Cette dynamique s'est traduite à la fois au sein du Giec par la publication d'un deuxième rapport spécial sur les terres en 2019 (voir chapitre 1) et dans les négociations internationales de la CCNUCC. Ainsi, des groupes de travail spécialisés dans l'agriculture ont d'abord émergé dans le cadre de l'action commune de Koronivia en 2017, et celle-ci a ensuite permis d'aboutir à l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire lors de la COP27, en 2023 (voir chapitre 2). Le texte final reconnaît à la fois l'importance des enjeux d'adaptation de l'agriculture au changement climatique et des enjeux d'atténuation pour l'ensemble des pays signataires, sans toutefois que des orientations précises ne soient préconisées. Les notions d'agriculture climato-intelligente, d'agroécologie ou encore de solutions fondées sur la nature (voir chapitre 3) sont autant de concepts en compétition qui, pour faire face aux enjeux du changement climatique, proposent des solutions aussi bien pour une agriculture industrielle consommatrice d'intrants de synthèse que pour une agriculture dite traditionnelle souvent moins productive et/ou moins rémunératrice (Duru *et al.*, 2015; Lipper *et al.*, 2014). Toutefois aucune direction n'est pour l'instant privilégiée pour orienter les évolutions du secteur des terres et plus largement des systèmes alimentaires.

Enfin, dans un monde fait de diversité et de complexité, un atlas nous est apparu indispensable pour traiter de la question du changement climatique dans les systèmes agricoles et alimentaires (voir chapitre 4). Ainsi, pour clore la première partie de cet ouvrage, dix-sept cartes sont proposées de façon à saisir les enjeux des émissions des systèmes agri-alimentaires, des impacts du changement climatique sur le secteur des terres et sur le stockage du carbone. En complément, six chapitres retraçant de façon synthétique les évolutions prévues du climat dans les grandes régions du monde (Afrique, Asie du Sud-Est, Amérique centrale et du Sud, Océanie, Europe et Amérique du Nord) ont également été intégrés à l'atlas.

3. Les systèmes agricoles et alimentaires, à la fois contributeurs et victimes du changement climatique

La deuxième partie de l'ouvrage part du constat que les systèmes agricoles et alimentaires sont à la fois des contributeurs du changement climatique, tout en étant durement affectés par celui-ci.

Face à une pression anthropique très forte et aux aléas climatiques extrêmes, le secteur des terres n'a ainsi jamais été confronté à un tel éventail de risques depuis le Néolithique et l'invention de l'agriculture. Les dépassements de la limite des $+2^{\circ}\text{C}$ d'ici 2100 (objectif de l'accord de Paris par rapport à l'ère préindustrielle) envisagés par les scénarios du Giec (gamme de $+1,1^{\circ}\text{C}$ à $+6,4^{\circ}\text{C}$) sont désormais de plus en plus plausibles avec des répercussions majeures sur la productivité agricole et sur la sécurité alimentaire mondiale. Au-delà de ce constat global très préoccupant, le changement climatique affecte les agricultures du monde de manière très diverse et inégale dans leur intensité. Ces risques seront plus élevés dans les pays du Sud (pourtant les moins émetteurs), où une augmentation de température moyenne de 2°C a beaucoup plus d'impact qu'en zone tempérée, sur le cycle des cultures notamment, du fait d'une plus grande dépendance aux ressources naturelles et d'une vulnérabilité plus élevée (Blanfort et Demenois, 2019).

Dans le même temps, et selon le dernier rapport du Giec sur les terres (IPCC, 2019), les systèmes agricoles et alimentaires affectent directement plus de 70 % de la surface libre de glace, dont 50 % sont consacrés à la production d'aliments. Ils tiennent par conséquent une place particulière et désormais prépondérante dans les mutations climatiques en cours et à venir, et font partie des secteurs les plus contributeurs en matière d'émission de GES. Le secteur AFOLU est à l'origine de 23 % ($12 \pm 2,9 \text{ Gt eqCO}_2/\text{an}$) du total net des émissions anthropiques de GES (IPCC, 2019). En incluant la déforestation ainsi que les chaînes d'approvisionnements, en amont et en aval et de plus en plus émettrices, des systèmes alimentaires, ce sont entre 20 % et 37 % du total net des émissions anthropiques de GES qui leur sont imputables. Ces émissions, en raison de l'augmentation de la population mondiale mais aussi des changements de régimes alimentaires, devraient encore augmenter pour atteindre 30 % à 65 % (IPCC, 2022) des émissions totales de GES d'ici 2030, devenant ainsi le plus important secteur émetteur. Dans sa feuille de route pour l'adaptation des systèmes alimentaires mondiaux au changement climatique publiée lors de la COP28 en 2023, la FAO alertait ainsi sur le fait qu'en l'absence de mesures, ces émissions pourraient exploser d'ici 2050. Des efforts substantiels sont donc essentiels en matière d'adaptation et d'atténuation pour parvenir à une productivité

accrue tout en réduisant la consommation de ressources pour atteindre le « net zéro carbone³ » voire de faire des systèmes alimentaires un puits de carbone net de $-1,5 \text{ Gt eqCO}_2/\text{an}$.

Au-delà de ces chiffres globaux au sujet de l'impact du changement climatique sur les systèmes agri-alimentaires et de leur contribution à ce changement, l'ouvrage vise à décrypter « le dessous des cartes ». Les émissions proviennent en effet de multiples sources et varient en fonction des facteurs biophysiques et biogéographiques des systèmes de production, des pratiques agricoles, des types d'aliments produits et consommés et des systèmes de gestion des déchets. Par exemple, on constate de fortes disparités entre les pays industrialisés et les autres : la Chine, l'Indonésie, les États-Unis, le Brésil, l'Union européenne et l'Inde sont les pays (ou groupe de pays) les plus émetteurs en volume (cartes 2, 3 et 4). De même, les différentes filières agricoles ne contribuent pas de la même façon et à la même hauteur aux émissions de GES.

Faisant suite à ce constat, la deuxième partie de l'ouvrage est consacrée aux grandes problématiques de l'agriculture, des systèmes alimentaires et des forêts face au changement climatique (section 1) : l'agriculture familiale (voir chapitre 5), les migrations, l'emploi et le foncier (voir chapitre 6). Ensuite, cinq grands enjeux sont analysés : l'eau et l'agriculture (voir chapitre 7), les systèmes alimentaires (voir chapitre 8), les forêts (voir chapitre 9), les productions animales (voir chapitre 10), la santé (voir chapitre 11). Enfin, un chapitre rapporte ce que nous dit le pastoralisme du changement climatique, notamment en Afrique subsaharienne (voir chapitre 12). Une analyse par filière (section 2) est également proposée et repose notamment sur les travaux de recherche du Cirad et de ses partenaires. Elle resitue les transformations souvent très importantes des filières agricoles depuis les dernières décennies, ces mutations étant notamment portées par les évolutions de la demande alimentaire. L'ensemble de la chaîne concernant un produit, du producteur jusqu'au consommateur, a été abordé à des degrés divers pour (1) les grandes cultures (les cas des filières riz, sorgho, canne à sucre et coton) (voir chapitre 13), (2) le palmier à huile (voir chapitre 14), (3) les productions horticoles (voir chapitre 15), et (4) les différents systèmes d'élevage (voir chapitre 16).

Pour chacune de ces problématiques et pour chacune de ces filières, il s'agit d'identifier les enjeux à la fois en matière de contribution aux émissions de GES, en introduisant des variables explicatives telles que les variables géographiques, climatiques, politiques, institutionnelles, territoriales, et aussi de comprendre comment ces questionnements et ces filières sont affectés par le dérèglement climatique.

4. Les systèmes agricoles et alimentaires : des solutions pour faire face au changement climatique

La dernière partie de l'ouvrage se focalise sur les différentes solutions pour l'adaptation et l'atténuation des systèmes agricoles et alimentaires. Trois types de solutions sont identifiés.

3. Alors que l'expression « neutre en carbone » fait référence à l'équilibrage de la quantité totale des émissions de carbone (l'équilibre entre l'émission de carbone et l'absorption des émissions de carbone par les puits de carbone), « net zéro carbone » signifie qu'aucun carbone n'a été émis et qu'il n'est donc pas nécessaire de capturer ou de compenser le carbone.

Le premier type concerne les solutions basées sur les ressources, qu'elles soient liées à la séquestration du carbone dans les sols agricoles et forestiers (voir chapitre 17), à une meilleure gestion de la ressource en eau (voir chapitre 18) ou encore au développement de la production d'énergie renouvelable (voir chapitre 19).

Le deuxième type de solution a trait aux innovations en ce qui concerne les pratiques agricoles pour l'adaptation et l'atténuation des systèmes agricoles et alimentaires (voir chapitre 20), ainsi qu'aux innovations en matière d'espèces et de variétés, en soulignant notamment le rôle majeur joué par la diversité cultivée et naturelle dans l'adaptation et l'atténuation (voir chapitre 21). Toutefois, ces solutions innovantes doivent impérativement être adaptées à la diversité des territoires (voir chapitre 22).

Enfin, un troisième type de solution, plus politique, doit être soutenu et développé dans les Nord et les Suds. Pour cela, la focale a d'abord été placée sur les systèmes alimentaires (voir chapitre 23). Sont analysés par la suite les engagements pris dans le cadre du Global Methane Pledge (GMP), visant la réduction des émissions de méthane, notamment issues de l'élevage et en particulier dans les systèmes d'élevage industriels des pays du Nord (voir chapitre 24). Plus largement, c'est l'ensemble des politiques publiques qui doivent être mieux coordonnées pour favoriser une gouvernance adaptative et pour respecter ainsi les engagements pris par les États dans le cadre de leur contribution déterminée au niveau national (CDN) (voir chapitre 25). Les enjeux de financement de ces politiques constituent un point central (voir chapitre 26). Enfin, les espaces de dialogue entre la science et les décideurs et l'ensemble des parties prenantes doivent encore être renforcés dans le cadre d'interfaces science-politique plus inclusives et participatives (voir chapitre 27).

5. Références bibliographiques

- Althor G., Watson J.E., Fuller R.A., 2016. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. *Scientific reports*, 6(1), 20281.
- Aykut S., Foyer J., Morena E. (Eds), 2017. *Globalising the climate: COP21 and the climatisation of global debates*. Taylor & Francis.
- Blanfort V., Demenois J., 2019. Changements climatiques et agriculture : quels enjeux, quels impacts aujourd'hui et demain?. *Diplomatie. Les Grands Dossiers*, 49 : 85-89.
- Bonneuil C., Fressoz J.B., 2013. *L'événement Anthropocène : la Terre, l'histoire et nous*. Média Diffusion.
- Boutroue B., Bourblanc M., Mayaux P.L., Ghiotti S., Hrabanski M., 2022. The politics of defining maladaptation: enduring contestations over three (mal)adaptive water projects in France, Spain and South Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(5), 892-910.
- Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A.J.N.F., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature food*, 2(3), 198-209.
- Dahan A., 2016. La gouvernance du climat : entre climatisation du monde et schisme de réalité. *L'Homme et la Société*, (1), 79-90.
- Dahan A., 2018. La climatisation du monde. *Esprit* (1), 75-86.
- Duru M., Therond O., Fares M., 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy and Sustainable Development*. 35:1237-1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- FAO, 2024. Portail de connaissances FAO. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data>
- Guivarch C., Taconet N., 2020. Inégalités mondiales et changement climatique. *Revue de l'OFCE*, 165(1), 35-70.
- Hrabanski M., 2020. Une climatisation des enjeux agricoles par la science? Les controverses relatives à la climate-smart agriculture. *Critique internationale*, (1)189-208.

- Hrabanski M., Le Coq J.-F., 2022. Climatisation of agricultural issues in the international agenda through three competing epistemic communities: Climate-smart agriculture, agroecology, and nature-based solutions. *Environmental Science & Policy*, 127 : 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.022>
- Hrabanski M., Le Coq J.-F., 2025. Agriculture at COP27: Antagonistic Political Framing and Fragmentation of Agricultural Issues Within Climate Negotiations and Beyond. *Global Environmental Politics*, 1-14. https://doi.org/10.1162/glep_a_00778
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers. *In: Climate Change and Land*. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC, 2022. Summary for Policymakers. *In: AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- IPCC, 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Lipper L., Thornton P., Campbell B.M., Baedeker T., Braimoh A., Bwalya M., *et al.*, 2014. Climate-Smart Agriculture for Food Security, *Nature Climate Change* 4(12): 1068-72. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Magnan A.K., Schipper E.L.F., Burkett M., Bharwani S., Burton I., Eriksen S., *et al.*, 2016. Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(5), 646-665.
- Rosenzweig C., Mbow C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., *et al.*, 2020. Climate change responses benefit from a global food system approach, *Nature Food*, 1(2): 94-97.
- Tubiello F.N., Karl K., Flammini A., Gütschow J., Obli-Laryea G., Conchedda G., *et al.*, 2022. Pre-and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems. *Earth System Science Data*, 14(4), 1795-1809.

Partie 1

Les systèmes agricoles et alimentaires face au changement climatique : état des lieux global

Chapitre 1

À l'échelle mondiale, un panorama global des systèmes agricoles et alimentaires dans un contexte de changement climatique

Vincent Blanfort, Julien Demenois, Adèle Gaveau

Au fil des décennies, les sciences du climat ont fortement évolué et se sont fortement consolidées, notamment au travers des publications du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec, ou IPCC en anglais). Établi en 1988 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), le Giec représente depuis le début des négociations climatiques la base scientifique et technique sur laquelle s'appuient les diplomates intégrés au sein de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC, ou UNFCCC en anglais). Par son cadrage scientifique et technique et par sa légitimation de certaines solutions évaluées au sein des rapports, le groupe d'experts influence de manière indirecte la sphère politique (De Pryck, 2022). Grâce à son statut particulier et à son fonctionnement hybride impliquant l'expertise de scientifiques volontaires issus du monde entier, le Giec s'est imposé au fil des années comme une organisation intergouvernementale crédible et légitime pour l'ensemble de ses 195 États membres. À ce jour, six rapports d'évaluation ont été produits, mentionnés au sein de ce chapitre par l'acronyme AR (Assessment Report) du premier rapport (AR1) au sixième (AR6), publiés respectivement en 1990, 1995, 2001, 2007, 2014 et 2023¹.

Ce chapitre présente l'évolution de la question du secteur des terres et la question agricole au sein des rapports du Giec. Sans détailler ce qui constitue le sujet de nombreux chapitres de l'ouvrage, il développe ensuite à un niveau très global les impacts physiques et agronomiques du changement climatique sur le secteur agricole à l'échelle mondiale et régionale. Enfin, il décrit les impacts des systèmes agricoles et alimentaires sur le changement climatique.

1. L'évolution de la question du secteur des terres et de la question agricole au sein des rapports du Giec

Depuis 1990, le Giec a publié deux rapports spéciaux au sujet du secteur des terres. Un premier rapport spécial sur l'utilisation des terres, des changements d'affectation des terres et de la foresterie a été commandé par l'organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (SBSTA) de la CCNUCC et a été publié en 2000 (IPCC, 2000a et 2000b) après l'adoption des dispositions relatives à la séquestration

1. Tous les rapports sont consultables ici : <https://www.ipcc.ch/reports/>.

du carbone biotique au sein du protocole de Kyoto. À la suite de son adoption, de nombreux termes et dispositions relatives à ces nouveaux puits de carbone restaient à définir au sein du protocole, avec des interprétations diverses sur leur utilisation par les États membres, notamment dans le cadre du mécanisme de développement propre (MDP, ou Clean Development Mechanism en anglais) (Fogel, 2005). Avec un mandat différent par rapport au premier, un deuxième rapport spécial a ensuite été publié par le Giec en août 2019, axé plus largement sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre (GES) dans les écosystèmes terrestres (SRCCL, ou Special Report on Climate Change and Land). Ce rapport spécial marque un tournant au regard du traitement de la question agricole au sein des rapports. Il comporte en effet une focale davantage approfondie et systémique sur les options permettant de réduire les GES issus des systèmes agricoles, incluant des aspects variés tels que la dégradation et la désertification des sols, le lien avec la biodiversité, l'agroécologie, la *climate-smart agriculture* (voir chapitre 3) et les différents choix alimentaires (*dietary options*), dont la consommation de viande (voir chapitre 23). Ce rapport sur les terres s'inscrit aussi plus largement dans un contexte foisonnant de publications à la même période de rapports sur la question de l'usage des terres².

Contrairement aux rapports antérieurs, le SRCCL a été élaboré conjointement par les trois groupes de travail du Giec et pour la première fois dans l'histoire du Giec, par davantage d'auteurs issus du Sud global (53%) que du Nord global³. Alors que le résumé pour décideurs du premier rapport spécial sur les terres, publié en 2000, établissait un lien direct entre le contenu scientifique du rapport et certains articles du protocole de Kyoto, le lien avec les articles de l'accord de Paris n'est pas explicitement mentionné dans celui du rapport de 2019. Néanmoins, après avoir été présenté à la COP25 à Madrid en 2019, le SRCCL a servi de base à l'organisation en novembre et décembre 2020 d'un dialogue entre États membres centré sur la relation entre les terres et sur l'adaptation au changement climatique dans le cadre du SBSTA⁴.

Après la publication du rapport spécial de 2000, le terme UTCATF (Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie) ou LULUCF en anglais (pour Land Use, Land Use Change and Forestry) a été introduit dans le vocabulaire du Giec et apparaît également au sein du 3^e rapport (AR3) en 2001 et du groupe de travail consacré à l'atténuation⁵. Plus tard, l'établissement des lignes directrices (*guidelines*) du Giec pour les inventaires de GES en 2006 propose le terme AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) intégrant la variable agricole : cette notion prend alors

2. En parallèle du SRCCL ont en effet été publiés en 2017 la première édition du rapport sur les perspectives mondiales des terres (Global Land Outlook) de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD), l'évaluation thématique de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) portant sur la dégradation et la restauration des terres (Assessment Report on Land Degradation and Restoration) en mars 2018, ainsi que le rapport de l'IPBES portant sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques (Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services) en mai 2019.

3. <https://www.ipcc.ch/srccl/authors/>.

4. <https://unfccc.int/event/dialogue-on-the-relationship-between-land-and-climate-change-adaptation-related-matters>.

5. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIII_TAR_full_report.pdf.

peu à peu le dessus sur la catégorie de LULUCF⁶. AFOLU est ensuite intégré au sein du troisième groupe de travail sur l'atténuation dans le 5^e rapport du Giec (AR5) ainsi que dans le suivant (AR6)⁷. La notion de LULUCF ne disparaît néanmoins pas complètement, et se réfère désormais principalement à un type de GES : le « CO₂-LULUCF⁸ ».

Historiquement, tous les rapports du Giec (de AR1 à AR6) ont souligné l'importance du rôle joué par le secteur des terres dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (figure 1.1). Contrairement à d'autres secteurs responsables d'émissions de GES à grande échelle, ce secteur a été identifié comme étant le seul pour lequel l'atténuation pouvait être possible à court terme, par exemple grâce au boisement et au reboisement ou à la gestion du carbone organique du sol. Les méthodes d'évaluation de l'atténuation ont néanmoins nettement évolué au fil des rapports et les scénarios de modélisation ont démontré à quel point le rôle potentiel du secteur était considérable dans la réduction des GES. Le 3^e rapport d'évaluation (AR3 en 2001) a innové méthodologiquement pour l'analyse du secteur des terres avec l'introduction de modèles d'évaluation intégrés *top-down*, ayant pour avantage de prendre en compte toutes les options d'atténuation de l'ensemble des secteurs. Ces approches sélectionnent les options d'atténuation les moins coûteuses, mais à partir d'un nombre d'options agricoles néanmoins limité, portant sur d'autres GES que le CO₂, comme le méthane.

Concernant le traitement plus précis de la question agricole par le Giec, à partir de la publication du premier rapport en 1990, l'analyse des impacts climatiques et de l'adaptation des secteurs agricole et alimentaire a grandement évolué. Au fil des rapports, le nombre d'études traitant des conséquences climatiques sur la production des principales cultures telles que le blé, le riz, le maïs et le soja a été grandement multiplié. Néanmoins, l'accent a été davantage porté sur les cultures plutôt que sur l'élevage, et majoritairement dans les zones tempérées des pays développés. De même, alors que les études quantitatives focalisées sur l'adaptation du secteur agricole ont été croissantes au fil des rapports, peu de données quantitatives sur les impacts et sur les modalités d'adaptation du domaine de l'élevage ont été produites. Les trois premiers rapports ne comportent par exemple aucune donnée quantitative sur ce sujet, et seulement dix-huit études sont comptabilisées dans les AR4 et AR5 (Porter *et al.*, 2019 et 2017; Rivera-Ferre *et al.*, 2016). Cela peut s'expliquer par le fait que les modèles de simulation n'étaient que peu ou pas mobilisés pour le secteur de l'élevage à cette période, avec des données plus partielles, notamment dans les pays du Sud. Concernant l'adaptation, en ce qui concerne la « capacité [des systèmes agricoles] à se soustraire d'un régime climatique inadapté⁹ », AR4 cadre l'adaptation du secteur sous des modalités autonomes et planifiées, et AR5, de manière « incrémentale, voire transformative » (Porter *et al.*, 2019).

Préalablement à la publication du 5^e rapport (AR5), le lien restait très partiel entre d'une part l'atténuation des émissions et d'autre part la production et la sécurité alimentaires. Or, à partir d'AR5, des suggestions concrètes en matière d'options politiques ont été proposées pour le secteur AFOLU, dépassant ainsi le paradigme

6. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_01_Ch1_Introduction.pdf

7. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf

8. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

9. Dans le texte : « The ability of community constituents to migrate away from a unsuitable climate regime. » (AR1, p. 321.)

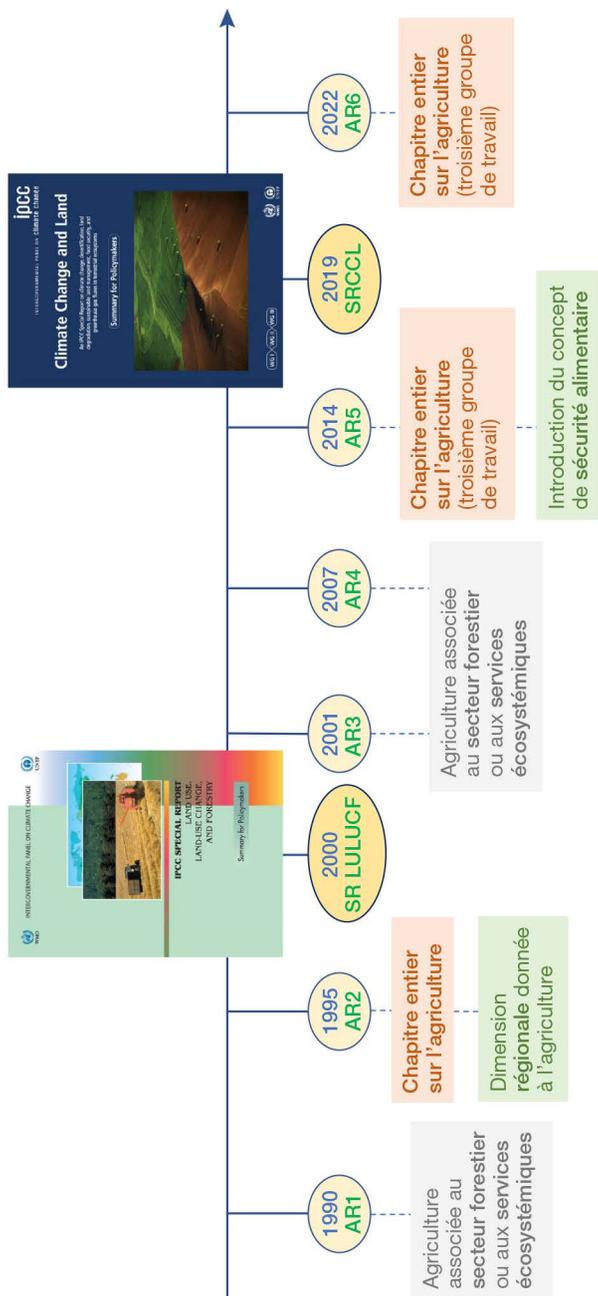


Figure 1.1. Évolution du traitement du secteur de l'agriculture au fil des rapports du Giec.

d'analyse issue de la « production agricole » vers une analyse des « systèmes alimentaires ». En 2019, le SRCCL a abordé pour la première fois au sein du même rapport un large éventail de questions liées au secteur des terres, mettant l'action sur les options de réponses intégrées pour faire face au changement climatique, en tenant compte des synergies et des *trade-offs*. Dans le 6^e rapport (AR6), le chapitre 11 du troisième groupe de travail souligne aussi l'intersectorialité inhérente au secteur des terres, et indique que ce secteur maintient des liens importants avec d'autres tels que la consommation humaine et le bien-être de la société, la bioénergie, le bâtiment, les transports ou l'industrie, l'atténuation de ces secteurs pouvant ainsi être fortement dépendante de la contribution du secteur AFOLU.

2. Les effets du changement climatique sur le secteur des terres

Le secteur des terres — déjà très fortement impacté par le changement climatique — subit également des pressions importantes du fait d'une expansion sans précédent des activités humaines qui affectent directement plus de 70 % de la surface libre de glace (IPCC, 2019). Le changement climatique peut exacerber les processus de dégradation des terres (tels que la déforestation, les pratiques agricoles non durables, la surexploitation des ressources naturelles, l'urbanisation) par l'augmentation de l'intensité des précipitations, des inondations, de la fréquence et de la gravité des sécheresses, des stress thermiques, des périodes de sécheresse, du vent, de l'élévation du niveau de la mer, et du dégel du pergélisol. Face aux aléas climatiques extrêmes et à une pression anthropique qui n'a jamais été aussi forte, le secteur des terres n'a ainsi jamais été confronté à un tel éventail de risques depuis la révolution néolithique avec l'invention de l'agriculture. Le Giec estime qu'environ un quart de la surface terrestre libre de glace subit une dégradation induite par les activités humaines. Le fonctionnement du secteur des terres est, certes, par nature régi par le climat et ses variations, et l'agriculture est une des activités humaines les plus dépendantes de ces processus, en particulier sous les latitudes tropicales caractérisées par une importante variabilité climatique intra et interannuelle. Toutefois, l'ampleur des changements en cours est d'une tout autre nature. Il apparaît désormais de plus en plus difficile de limiter l'augmentation des températures à 2 °C d'ici 2100 ; les scénarios envisagés par le Giec au-delà de cette limite entraîneront des modifications majeures du secteur des terres, et en particulier des impacts négatifs sur la productivité agricole et sur la sécurité alimentaire mondiale (figures 1.2a et 1.2b). Selon ces scénarios, le Giec prévoit que 8 % à 30 % des terres agricoles actuelles deviendront climatiquement inadaptées d'ici 2100. La FAO, quant à elle, alerte sur le fait que, sans une adaptation efficace, les rendements des grandes cultures pourraient perdre en moyenne 2 % par décennie, alors que la production devra, elle, augmenter de 14 % tous les dix ans pour répondre à la demande mondiale.

Au-delà de ce constat global très préoccupant, le changement climatique affecte les agricultures du monde de manière très diverse et inégale dans leur intensité. En général, le changement climatique induit des impacts négatifs sur le secteur des terres ; cependant, dans certaines régions aux latitudes moyennes et élevées, on constate certains effets bénéfiques de l'allongement de la saison de croissance et de la fertilisation par le CO₂. Ils entraînent une augmentation de la productivité des écosystèmes de ces zones géographiques (verdissement de la végétation dans certaines régions d'Asie, d'Europe, d'Amérique du Sud, du centre de l'Amérique du Nord et du sud-ouest de l'Australie)

(IPCC, 2019). Les rendements de certaines cultures propres à ces latitudes (par exemple le maïs, le blé et la betterave sucrière) ont augmenté ces dernières décennies ; on constate cependant leur stagnation, voire leur diminution, avec les sécheresses estivales récurrentes. Dans ces régions, l'augmentation en fréquence et en intensité des événements extrêmes (sécheresses ou pluies intenses, fortes températures estivales) induit des impacts négatifs de plus en plus critiques pour le secteur agricole et pour les ressources en eau. Les observations par satellite montrent un brunissement de la végétation au cours des trois dernières décennies dans le nord de l'Eurasie et dans certaines parties de l'Amérique du Nord et de l'Asie centrale (IPCC, 2019). Mais le contexte économique en général plutôt favorable des États de ces régions, leurs structures de production et des politiques publiques relativement actives autorisent souvent des ajustements plus aisés.

Du fait d'une plus grande dépendance aux ressources naturelles, d'une vulnérabilité plus élevée (populations plus importantes dans un contexte socio-économique de pauvreté, et souvent d'instabilité politique), les effets majeurs attendus du changement climatique sont globalement plus conséquents dans les pays des zones intertropicales et méditerranéennes. Les petites exploitations familiales (voir chapitre 5) typiques de ces contextes ont parfois peu accès aux technologies, aux services et aux intrants innovants, ce qui limite leur capacité d'adaptation. Dans un rapport sur l'impact des catastrophes et des crises sur l'agriculture entre 2006 et 2016, la FAO souligne que l'agriculture des Suds (cultures, élevage, pêche, aquaculture et sylviculture) est concernée par 25 % de tous les dommages et pertes causés par des catastrophes liées au climat (inondations, sécheresses, tempêtes tropicales), ce chiffre montant à 83 % pour la sécheresse. Les cultures sont le sous-secteur le plus touché, constituant 50 % de l'ensemble de ces atteintes (pertes de récoltes dues à des événements soudains ou à une évolution lente qui réduisent les rendements). L'élevage des pays du Sud subit 36 % de ces impacts, essentiellement en raison de l'affaiblissement de l'état corporel des animaux et de la réduction de leur productivité, notamment dans les systèmes pastoraux en Afrique (voir chapitres 10 et 16). On constate également des répercussions significatives sur la santé animale, du fait de la modification des habitats, de la propagation des maladies, du stress thermique et de l'altération des cycles alimentaires. Ces risques concernent également la faune sauvage.

Cependant, au sein de cet ensemble géographique tropical et méditerranéen, on observe des variations importantes en raison de l'étendue de ces régions, du mode d'occupation des terres et de leur grande diversité socio-économique et bioclimatique. Néanmoins, le changement climatique les affecte de façon significative et les scénarios d'évolution du Giec prédisent une intensification de ces impacts pour des augmentations de la température mondiale de plus de 1,5 °C. (IPCC, 2022). Dans de nombreuses régions des basses latitudes, les rendements de certaines cultures (par exemple le maïs et le blé) ont déjà diminué. Les régions étroitement dépendantes de l'agriculture pluviale sont particulièrement exposées aux aléas climatiques. En Afrique subsaharienne, elles représentent près de 93 % des terres cultivées. Pour certaines régions aux scénarios particulièrement pessimistes comme la zone soudano-sahélienne, les températures annuelles devraient augmenter d'environ 3 °C d'ici 2050 par rapport à la période 1980-2009, avec un impact critique sur le rendement des cultures.

Enfin, l'élévation du niveau de la mer, si elle n'est pas souvent évoquée dans ce sens, est pourtant un élément non négligeable vis-à-vis du secteur des terres, en provoquant l'intrusion d'eau salée dans les zones côtières, ce qui augmente la salinité des sols et réduit leur valorisation par l'agriculture.

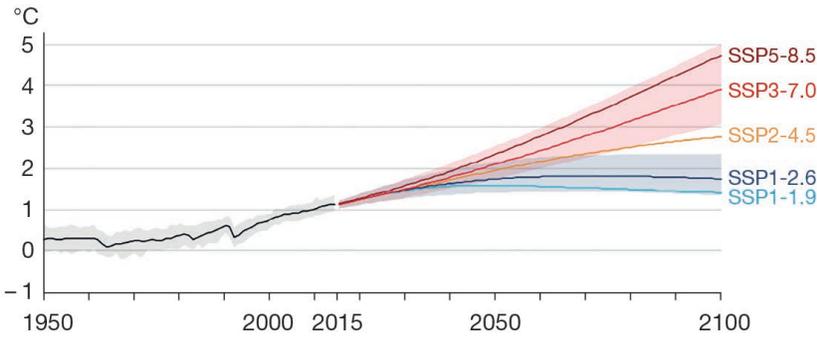


Figure 1.2a. Les cinq scénarios principaux du Giec (AR6). Source : IPCC (2021).

Dans le 6^e rapport du Giec, les scénarios dits SSP* (*shared socio-economic pathways*) viennent remplacer les scénarios dits RCP (*representative concentration pathways*). Les nouveaux scénarios SSP illustrent différents développements socio-économiques en lien avec les différentes trajectoires des concentrations de GES dans l'atmosphère. Ces nouveaux scénarios peuvent être utilisés en complément des RCP précédemment définis dans le 5^e rapport du Giec. Le Giec insiste sur le fait que les impacts sur nos sociétés ne seront pas les mêmes en fonction des niveaux de réchauffement global.

* Les différents scénarios dits SSP. SSP1 : la voie durable et « verte », biens communs préservés, bien-être humain plutôt que croissance économique, inégalités de revenus réduites, minimisation de l'utilisation des ressources matérielles et de l'énergie; SSP2 : la voie « médiane », les revenus dans les différents pays divergent, maintien de la coopération entre États, croissance démographique mondiale modérée et stabilisée après 2025, dégradation modérée des systèmes environnementaux; SSP3 : les rivalités régionales, regain de nationalisme et de conflits régionaux, les politiques se concentrent sur les questions de sécurité, les investissements dans l'éducation et le développement technologique diminuent, les inégalités augmentent, dommages environnementaux considérables dans certaines régions; SSP4 : l'inégalité, le fossé se creuse entre sociétés développées et celles avec de faibles revenus et un faible niveau d'éducation, problèmes environnementaux résolus dans certaines régions, mais pas dans d'autres; SSP5 : développement à partir de combustibles fossiles, marchés mondiaux intégrés, avec innovations et progrès technologiques, développement social et économique à forte intensité énergétique dans le monde entier, les problèmes environnementaux locaux tels que la pollution atmosphérique sont abordés avec succès.

Ce constat de la forte diversité des impacts du changement climatique dans le secteur des terres a des implications fondamentales sur le niveau d'échelle pertinent auquel doivent être prises les décisions et doivent être formulées les politiques publiques. L'atlas de cet ouvrage (voir chapitre 4) décrit en détail les impacts par grande région. Au-delà de cette vision biogéographique, dans le cadre de l'approche globale de ce chapitre, les paragraphes suivants dressent un état des lieux synthétique des principaux secteurs emblématiques fortement affectés par le changement climatique.

La structure et l'état des sols dépendent du climat et le climat dépend des échanges entre le sol et l'atmosphère. Ces interactions sont aujourd'hui fortement modifiées par le changement climatique, à l'heure où la dégradation des sols menace plus de 40 % des terres émergées. Suivant la région considérée, le changement climatique pourrait accélérer ce processus de dégradation des sols et compromettre leur capacité à rendre des services écosystémiques. Les événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes et les précipitations torrentielles peuvent par exemple entraîner une érosion accélérée des sols, provoquant une perte directe de masse de terre ou celle des nutriments essentiels à la fertilité des sols, la diminution de la qualité de l'eau et la destruction des habitats naturels. Les excès de précipitations sont aussi à l'origine d'inondations, de glissements de terrain touchant un

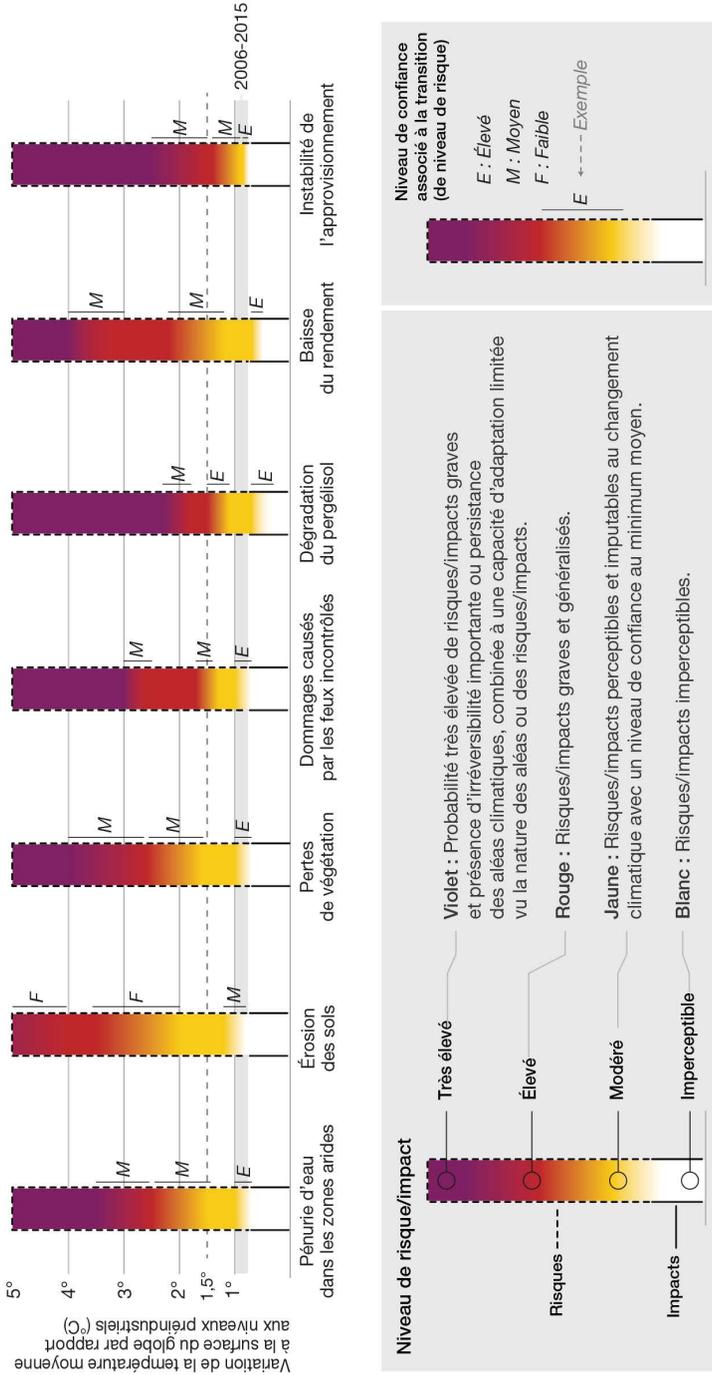


Figure 1.2b. Risques posés par les effets du changement climatique sur les populations terrestres pour les populations humaines et les écosystèmes. L'élévation de la température moyenne à la surface du globe par rapport aux niveaux préindustriels affecte les processus liés à la désertification (pénurie d'eau), à la dégradation des terres (érosion des sols, recul de la végétation, feux incontrôlés, dégel du pergélisol) et à la sécurité alimentaire (variation du rendement des cultures, instabilité de l'approvisionnement alimentaire). Il en découle des risques pour les systèmes alimentaires, les moyens de subsistance, l'infrastructure, la valeur des terres et la santé des populations humaines et des écosystèmes. La modification d'un processus (incendies ou pénurie d'eau, par exemple) peut donner lieu à des risques combinés. Les risques sont propres à l'emplacement et diffèrent selon la région.

secteur des terres aux infrastructures souvent déjà fragiles dans les Suds. La santé des sols incluant leur biodiversité subit également les modifications des conditions environnementales telles que la température, l'humidité et les précipitations. Ces changements peuvent affecter la distribution des organismes du sol, ce qui peut conduire à une réduction de la diversité biologique des sols. Ils perturbent les cycles biogéochimiques¹⁰ des sols tels que le cycle de l'azote, du carbone et du phosphore, qui sont essentiels au fonctionnement des écosystèmes (voir chapitre 17) et à la fertilité des sols des zones de culture, d'élevage d'herbivores et des forêts. Cette dégradation des sols peut aller jusqu'à la désertification. Selon le Giec, un tiers des terres émergées pourrait être concerné d'ici 2050 par ces processus, et ce, même avec un réchauffement contenu à 2 °C.

Au cours de la période 1961-2013, la proportion moyenne de zones arides et subarides touchées par la sécheresse a augmenté d'un peu plus de 1 % par an (IPCC, 2021). Cette augmentation dramatique (30% au total!) affecte de plus en plus les populations, avec en 2015, près de 500 millions de personnes touchées par ces conséquences, particulièrement en Asie du Sud et de l'Est, et dans les zones périphériques du Sahara. Généralement, ces territoires aux ressources naturelles limitées (eau, terres arables) sont le lieu d'activités d'élevage transhumant qui permettent seules de les valoriser. Ils sont en effet la preuve d'une remarquable adaptation et d'une flexibilité qui permet d'amortir les effets de la variabilité climatique (voir chapitres 12 et 16). Cette résilience climatique est fragilisée par les politiques de sédentarisation et par la réduction et la fragmentation des zones pastorales traditionnelles dans les interfaces avec les zones plus agricoles, dont l'extension est elle-même corrélée à la réduction des rendements agricoles due au changement climatique. En Afrique, ces régions sont parfois dramatiquement affectées par des conflits pour le contrôle de ces ressources, propices à la montée du terrorisme et de l'extrémisme.

Parmi les modifications des grands cycles biogéochimiques mondiaux, celles du cycle de l'eau sont certainement les plus perceptibles en raison de leurs effets directs sur les ressources en eau (approvisionnement des nappes, des cours d'eau, sécheresse, évapotranspiration). Ces effets peuvent être accentués par les activités humaines telles que la déforestation qui peut affecter le ruissellement et l'infiltration de l'eau dans le sol, modifiant la disponibilité de l'eau dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. On constate déjà dans de nombreuses régions que la surexploitation des ressources en eau liée au changement climatique accroît la vulnérabilité de ces territoires à la sécheresse. Cela entraîne souvent la mise en œuvre de pratiques agricoles non durables telles qu'une irrigation inefficace ou excessive. Cette maladaptation contribue alors elle-même à une diminution de la disponibilité de l'eau dans les zones arides et semi-arides. Ces modifications importantes des ressources en eau peuvent également contribuer à l'érosion des sols, à leur salinisation et à la désertification (voir chapitres 7 et 17).

Quant aux écosystèmes particulièrement dépendants du cycle de l'eau, les forêts sont parmi ceux les plus perturbés à des degrés divers par le changement climatique.

10. Cycle biogéochimique : processus de transport et de transformation cyclique (recyclage) d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère. Le préfixe *bio* fait référence aux organismes et aux mécanismes biologiques du cycle, tandis que le terme *géo* désigne l'environnement, c'est-à-dire l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère. Les cycles les plus importants sont le cycle de l'azote, du carbone, de l'eau et de l'hydrogène.

Même si le rythme de déforestation tend globalement à diminuer, le changement climatique constitue une nouvelle menace pour leur fonctionnement et leur pérennité (augmentation des températures et modification des régimes de précipitations (voir chapitre 9). Combinées au risque accru d'incendies et à la déforestation, ces perturbations ont des conséquences importantes sur la capacité des forêts à fournir des services écosystémiques tels que la régulation du climat, les régimes régionaux des pluies et la protection des sols. En 2019, c'est près d'un million d'hectares de forêt amazonienne qui a brûlé (voir chapitre 4). Les forêts tropicales représentent plus de 50 % de la surface des forêts et du puits de carbone forestier mondial. Parmi celles-ci, les trois grands bassins forestiers tropicaux — Amazonie, Congo et Bornéo-Mékong-Asie du Sud-Est — jouent un rôle majeur dans la régulation du climat et abritent par ailleurs une faune et une flore exceptionnelle.

Le changement climatique peut influencer la propagation et les impacts des ravageurs, des vecteurs de maladie pour les plantes et pour les animaux, et des espèces invasives, en modifiant les conditions environnementales, en favorisant l'expansion de leur aire de répartition, en modifiant les habitats naturels, et en intensifiant les effets des invasions (IPCC, 2019).

3. L'impact des systèmes agricoles et alimentaires sur le changement climatique

Les systèmes alimentaires sont l'un des principaux moteurs des impacts humains sur l'environnement, et spécialement sur les émissions de GES et sur le changement climatique. Ils ont contribué au franchissement de plusieurs des « limites planétaires » qui définissent un espace de fonctionnement sûr pour l'humanité sur un système terrestre stable, en particulier celles concernant le changement climatique (Springmann *et al.*, 2018). Les systèmes alimentaires sont ainsi à l'origine d'environ un tiers des émissions mondiales de GES, en incluant la déforestation¹¹ ainsi que les chaînes d'approvisionnements en amont et en aval de plus en plus émettrices (IPCC, 2022). Selon le dernier rapport du Giec sur les terres (IPCC, 2019), le secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres utilisations des terres) est à l'origine de, respectivement, 13 %, 44 % et 81 % des émissions anthropiques de CO₂, CH₄ et N₂O, soit 23 % (12 ± 2,9 Gt eqCO₂/an) du total net des émissions anthropiques de GES. Celles-ci se répartissent principalement entre les émissions directes de GES imputables à la production agricole (12 %) et à la déforestation (9 %). Les émissions de méthane (CH₄) (voir chapitre 24) et de protoxyde d'azote (N₂O) augmentent constamment depuis 1990 (figure 1.3).

Si les émissions associées aux activités de pré et de postproduction (2,4 à 4,8 Gt eqCO₂/an) dans le système alimentaire mondial sont incluses, ces estimations sont comprises entre 11 et 19 Gt eqCO₂/an, soit 20 % à 37 % du total net des émissions anthropiques de GES. Cette répartition reste à nuancer en fonction du niveau de développement des pays. La production agricole est de loin la principale source d'émissions anthropiques dans les pays LI (*low income*) et LMI (*low to moderate income*), tandis que les étapes de postproduction émettent autant de GES que les étapes de production dans les pays HI (*high income*) (Vermeulen *et al.*, 2012).

11. D'après la dernière évaluation des ressources forestières mondiales de la FAO, l'agriculture est responsable de près de 90 % de la déforestation dans le monde.

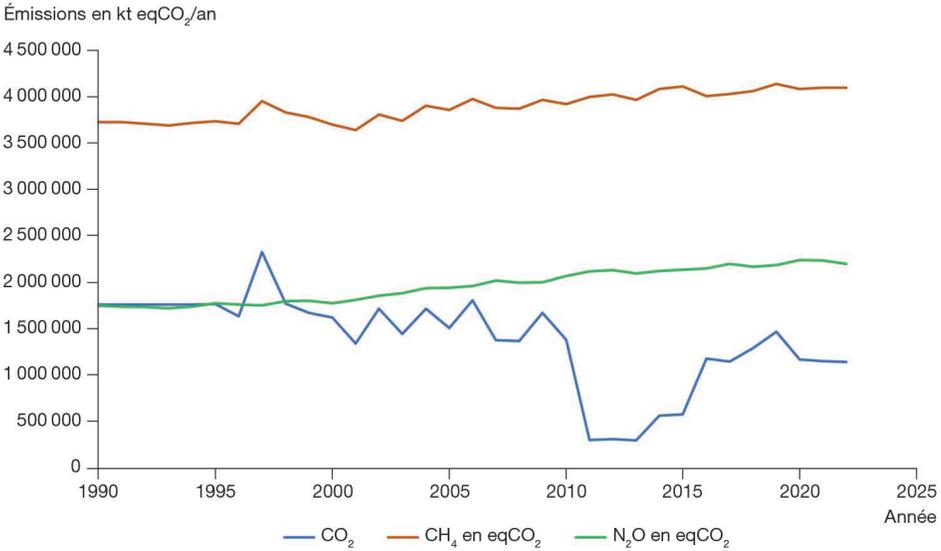


Figure 1.3. Évolution des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O du secteur AFOLU entre 1990 et 2022 exprimées en kt eqCO₂/an. Source : données FAOSTAT.

Bien que l'on dispose de peu d'informations, on estime qu'un tiers de la nourriture produite dans le monde pour la consommation humaine est perdue ou gaspillée entre les étapes de la production et de la consommation (Gustavsson *et al.*, 2011 ; HLPE, 2014). Concernant les pertes et les gaspillages alimentaires (FLW pour *food loss and waste*, incluant la récolte, le stockage, le transport et la transformation), l'empreinte carbone globale tous pays confondus est estimée à 3,3 Gt eqCO₂, ce qui représente une part énorme des émissions mondiales de GES (8% à 10%). Il s'avère difficile de différencier les pays au-delà d'une tendance. Sans qu'il soit possible d'être très précis, les pertes apparaissent plus importantes dans les LMI. Dans ces pays, les pertes et les gaspillages seraient avant tout dus à des contraintes infrastructurales, financières et techniques (Gustavsson *et al.*, 2011). *A contrario*, dans les pays HI, le gaspillage serait lié à la surproduction et à la surconsommation.

Actuellement, plus de 50% des terres émergées sont consacrées à la production d'aliments (IPCC, 2019). Les changements d'usage des terres et l'intensification rapide de ces usages ont permis d'accroître très significativement la production de nourriture, de fourrage et de fibres (+ 240% pour les céréales entre 1961 et 2017, par exemple). Ici aussi, ces évolutions sont à nuancer selon les secteurs, les zones géographiques ou les niveaux de développement. Si l'on considère la question de la déforestation, qui est l'objet de débats politiques et médiatiques depuis le xx^e siècle, elle concerne essentiellement les pays LI et LMI, où le lien entre les systèmes alimentaires et la déforestation est déterminant. Des études (Feintrenie *et al.*, 2019) montrent que la déforestation en zone tropicale a augmenté entre 2000 et 2012, principalement en raison de l'augmentation des populations urbaines et de l'expansion de l'agriculture d'exportation. L'agriculture commerciale s'avère donc le principal vecteur de déforestation (68% en Amérique latine, 35% en Afrique et en Asie), suivi par l'agriculture de subsistance (27% et 40% de la déforestation sur chaque continent (Hosonuma *et al.*, 2012).

Un autre secteur fait l'objet de controverses : il s'agit de l'élevage, qui se caractérise par une véritable révolution durant les quatre dernières décennies, du fait de la forte demande en produits animaux liée aux évolutions démographiques, à la croissance économique et à l'urbanisation (voir chapitres 4 et 16). Ces changements majeurs ont eu un impact important sur l'augmentation des émissions de GES de ce secteur qui génère, selon les dernières estimations de la FAO (FAO, 2023), 12 % des émissions anthropiques mondiales de GES (6,2 Gt eqCO₂/an). Plus de 70 % de ces émissions sont dus aux ruminants (en raison des émissions de méthane) (voir chapitre 24), mais les systèmes d'élevage à l'herbe ne seraient responsables « que » de 20 % des émissions totales de l'élevage (Gerber *et al.*, 2013), tout en présentant un important potentiel d'atténuation par le stockage de carbone dans le sol.

Si des modifications techniques et comportementales soutenues par des politiques publiques peuvent contribuer à limiter les émissions de GES issues des systèmes agricoles et alimentaires, des changements plus systémiques s'imposent pour s'adapter au changement climatique sans compromettre son atténuation. Les modèles agricoles dominants doivent évoluer (réduction des intrants chimiques, réassociation des productions animales et végétales, modifications des pratiques agricoles vers l'agro-écologie, etc.) et nos systèmes alimentaires nécessitent d'être adaptés (changement de régimes et habitudes alimentaires, réduction des pertes, etc.) et reterritorialisés. Il convient également de rappeler que 31 % des émissions anthropiques de GES sont absorbées par les terres émergées dans la végétation et les sols, et constituent de fait un puits de carbone plus important que les océans¹². De fait, le secteur AFOLU dispose d'un potentiel important de séquestration du carbone, que ce soit à travers les sols (voir chapitre 17) ou les forêts (voir chapitre 9). De plus, tout changement de surface, qu'il résulte de l'usage des terres ou du changement climatique, affecte le climat à l'échelle régionale par le biais d'effets biophysiques tels que l'albédo ou l'évapotranspiration. Ainsi, dans les régions boréales, là où la limite forestière migrera vers le nord et/ou la saison de croissance s'allongera, le réchauffement hivernal sera accru en raison de la diminution de la couverture de neige et de l'albédo, tandis que le réchauffement sera réduit pendant la saison de croissance en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration (IPCC, 2019). Ces interactions entre le cycle du carbone, le changement de surface et les effets biophysiques rendent particulièrement complexe l'évaluation des impacts du secteur des terres sur le changement climatique.

Au-delà d'une comptabilité carbone simplifiée, il est indispensable d'intégrer dans l'évaluation du secteur agricole et alimentaire sa contribution à la réduction de la pauvreté et à la sécurité alimentaire. L'agriculture est en effet le premier employeur du monde : 40 % des emplois mondiaux et 60 % en Afrique. L'insécurité alimentaire touche 30 % des agriculteurs des pays du Sud selon la FAO et contribue également aux déplacements de populations et à la multiplication des conflits. En 2050, il est prévu que la majorité des pays africains seront sous l'influence de climats actuellement encore inconnus sur plus de la moitié des terres cultivables.

12. Global Carbon Budget 2023 : <https://globalcarbonbudget.org/carbonbudget2023/>.

4. Références bibliographiques

De Pryck K., 2022. *GIEC : la voix du climat*. Presses de Sciences Po, 240 p.

FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>

Feintrenie L., Betbeder J., Piketty M.-G., Gazull L., 2019. Deforestation for food production. In: Dury S., Bendjebbar P., Hainzelin E., Giordano T., Bricas N. (eds), *Food Systems at risk: new trends and challenges*, FAO/Cirad/European Commission, p. 43-46. <https://doi.org/10.19182/agritrop/00080>

Fogel C., 2005. Biotic Carbon Sequestration and the Kyoto Protocol: The Construction of Global Knowledge by the Intergovernmental Panel on Climate Change. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 5(2), 191-210. <https://doi.org/10.1007/s10784-005-1749-7>

Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., et al., 2013. *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*, FAO, 139 p.

Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., van Otterdijk R., Meybeck A., 2011. *Global food losses and food waste: extent, causes and prevention*. FAO, 37 p.

HLPE, 2014. *Food losses and waste in the context of sustainable food systems*. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, 9 p.

Hosonuma N., Herold M., Sy V.D., Fries R.S., Brockhaus M., Verchot L., et al., 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7: 044009.

IPCC, 2019. Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land*. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>

IPCC, 2000a. Land Use, Land Use Change and Forestry. A Special Report. <https://www.ipcc.ch/report/land-use-land-use-change-and-forestry/>

IPCC, 2000b. Summary for Policymakers. In: *Land Use, Land Use Change and Forestry. A Special Report of IPCC*. Cambridge University Press, 30 p.

IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

IPCC, 2022. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/summary-for-policymakers/>

Le Mouél C., De Lattre-Gasquet M., Mora O., eds, 2018. *Land Use and Food Security in 2050: a Narrow Road, Agrimonde-Terra*. Versailles, éditions Quæ.

Porter J.R., Howden M., Smith P., 2017. Considering agriculture in IPCC assessments. *Nature Climate Change*, 7(10), 680-683. <https://doi.org/10.1038/nclimate3404>

Porter J.R., Challinor A.J., Henriksen C.B., Howden S.M., Martre P., Smith P., 2019. Invited review: Intergovernmental Panel on Climate Change, agriculture, and food – A case of shifting cultivation and history. *Global Change Biology*, 25(8), 2518-2529. <https://doi.org/10.1111/gcb.14700>

Rivera-Ferre M.G., López-i-Gelats F., Howden M., Smith P., Morton J.F., Herrero M., 2016. Re-framing the climate change debate in the livestock sector: Mitigation and adaptation options. Mitigation and adaptation options in the livestock sector. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(6), 869-892. <https://doi.org/10.1002/wcc.421>

Springmann M., Clark M., Mason-D'Croz D., Wiebe K., Bodirsky B.L., Lassaletta L., et al., 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562: 519-525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>

Vermeulen S.J., Campbell B.M., Ingram J.S.I., 2012. Climate change and food systems. *Annu. Rev. Environ. Resourc.*, 37:195-222.

Chapitre 2

Les questions agricoles, alimentaires et forestières dans les négociations climatiques : mise à l'agenda et enjeux

*Marie Hrabanski, Valérie Dermaux, Alexandre K. Magnan,
Adèle Tanguy, Anaïs Valance, Roxane Moraglia*

Depuis 1992 et la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les gouvernements ou parties se rassemblent chaque année au sein des Conférences des parties (COP) pour orienter et opérationnaliser les engagements des États face au changement climatique. L'agriculture a longtemps été absente de ces négociations qui, jusqu'à la fin des années 1990, se sont focalisées sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Caron et Treyer, 2016; Hrabanski, 2020; Hrabanski et Le Coq, 2022). Pourtant, les systèmes agricoles et alimentaires sont particulièrement émetteurs de GES, et à la fois « victimes » et « solutions », face au changement climatique. À partir des années 2010, les questions agricoles puis alimentaires intègrent progressivement l'agenda international du climat (Chandra *et al.*, 2016; Soto Golcher et Visseren-Hamakers, 2018). Les États sont chargés de mettre en œuvre les actions climatiques pour l'agriculture et l'alimentation, qui sont détaillées dans leurs engagements climatiques nationaux¹ que sont les contributions déterminées au niveau national (CDN ou NDC en anglais)².

Ce chapitre synthétise les enjeux des négociations climatiques pour l'agriculture. La première partie présente les étapes de la mise à l'agenda de l'agriculture dans ces négociations jusqu'à la création de l'initiative quadriennale de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire lors de la COP27 en 2022. La seconde partie traite des enjeux liés aux marchés du carbone pour le secteur des terres (agriculture et forêts). Enfin, nous abordons la délicate question de l'évaluation des engagements pris par les États, enjeu récemment débattu dans le cadre du premier bilan mondial ou Global Stocktake (clos en 2023) en application de l'accord de Paris et qui aura lieu tous les cinq ans.

1. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/12/01/cop28-134-Etats-s-engagent-a-inclure-l-agriculture-et-l-alimentation-dans-leurs-plans-climat_6203425_3244.html.

2. En 2020, plus de 90 % de ces contributions nationales déterminées incluaient l'adaptation au changement climatique et faisaient de l'agriculture un secteur prioritaire, et environ 80 % d'entre elles identifiaient des objectifs d'atténuation du changement climatique dans le secteur agricole.

1. De 1992 à 2022 : la difficile mise à l'agenda de l'agriculture dans les négociations sur le climat

Les articles 2 et 4 de la convention (CCNUCC) adoptée en 1992 évoquent le lien entre les changements climatiques et l'agriculture. Toutefois, les enjeux sont focalisés sur l'atténuation, par le biais notamment des négociations sur le cadre REDD+³, qui ont abouti en 2013 à Varsovie après plusieurs années de discussions très laborieuses et clivantes, notamment entre pays développés et pays en développement. Le protocole de Kyoto, adopté en 1997, fait référence à l'agriculture et aux forêts, en soulignant que le secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (UTCATF) peut constituer une source de GES. Ce protocole fixait des objectifs ambitieux de réduction des émissions uniquement pour les pays industrialisés (dits « annexe I »), dans un fonctionnement *top-down*, contrairement à l'accord de Paris. Il couvrait le méthane et le protoxyde d'azote⁴, principaux gaz émis par le secteur agricole, et établissait des niveaux de référence forestiers à respecter. Ce mode de travail a toutefois montré ses limites, avec notamment les États-Unis qui n'ont pas ratifié ce protocole et le Canada qui en est sorti. En application de ce protocole, deux mécanismes de certification de projets de compensation carbone ont été développés : le mécanisme de mise en œuvre conjointe (Moc) et le mécanisme de développement propre (MDP), au sein desquels les secteurs agricoles et forestiers ne seront pas intégrés avant le milieu des années 2000 (Vespa, 2002).

Il faut attendre la COP17 de Durban, en 2011 (figure 2.1), pour que l'agriculture soit appréhendée comme un problème global, en étant à la fois cadré comme un enjeu d'atténuation et une question d'adaptation au changement climatique (Hrabanski, 2020; Hrabanski et Le Coq, 2025). En effet, à la suite de la mobilisation d'acteurs hétérogènes en faveur de la notion de *climate-smart agriculture*⁵ et dans un contexte politique renouvelé (Hrabanski, 2020), l'agriculture est intégrée à l'ordre du jour officiel de l'organe de la COP chargé des questions scientifiques et techniques (SBSTA, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice) (Fleurant, 2021). Cinq ateliers auront lieu entre 2013 et 2016⁶. Pourtant, s'il y a bien une journée consacrée à l'agriculture pendant la COP21⁷ (en 2015) en parallèle des négociations, l'accord de Paris aborde uniquement l'agriculture sous l'angle de la sécurité alimentaire et de la vulnérabilité des systèmes de production alimentaire⁸. Les écosystèmes agricoles et forestiers sont uniquement couverts par l'article 5 de l'accord de Paris, qui souligne l'importance de préserver et

3. REDD+ : réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts.

4. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/kyoto-protocol-targets-for-the-first-commitment-period>.

5. La FAO a promu la *climate-smart agriculture*, ou l'agriculture climato-intelligente, dès la fin des années 2000. Cette notion vise à traiter trois objectifs principaux : l'augmentation durable de la productivité et des revenus agricoles (sécurité alimentaire); l'adaptation et le renforcement de la résilience face aux impacts des changements climatiques (adaptation); et la réduction et/ou la suppression des émissions de gaz à effet de serre (l'atténuation), le cas échéant.

6. <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/agriculture/agriculture-workshops-and-documents>.

7. <http://sdg.iisd.org/events/farmers-day-at-cop-21/>.

8. Considérant : Reconnaissant la priorité fondamentale consistant à protéger la sécurité alimentaire et à venir à bout de la faim, et la vulnérabilité particulière des systèmes de production alimentaire aux effets néfastes des changements climatiques; Article 2.1b : Renforçant les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques et en promouvant la résilience à ces changements et un développement à faible émission de GES, d'une manière qui ne menace pas la production alimentaire.

de renforcer les puits de carbone naturels et qui met en lumière des outils comme les paiements basés sur des résultats REDD+ et le mécanisme conjoint pour l'atténuation et l'adaptation des forêts (JMA⁹). Une étape importante est franchie en 2017, avec la création de l'action commune de Koronivia (KJWA)¹⁰. De 2018 à 2021, sept ateliers sont organisés (sur les méthodes d'évaluation de l'adaptation, les ressources en eau, le carbone du sol, etc.) et permettent à tous les états et parties prenantes (*stakeholders*) de partager leurs points de vue sur différents enjeux agricoles.

L'accélération de l'agenda climatique va dans le même temps permettre, pendant la COP26 de Glasgow, de prendre en charge la question des émissions de méthane, dont près de 40 % sont d'origine agricole selon l'IEA¹¹ (International Energy Agency). Un « engagement mondial » (Global Methane Pledge) a été lancé en 2021 par l'Union européenne (UE) et les États-Unis, avec pour objectif de réduire les émissions mondiales de méthane de 30 % d'ici à 2030 par rapport à 2020. Il regroupe aujourd'hui 158 pays, sans toutefois que la Chine, l'Inde et la Russie figurent parmi les signataires (voir chapitre 24).

En 2022, l'action commune de Koronivia arrivait à son terme (figure 2.1). L'analyse des soumissions faites par les pays et les observateurs, dont la recherche, met en évidence la pluralité des façons de penser le lien entre les questions agricoles et les questions climatiques, ce qui va se traduire notamment par de fortes tensions entre des pays du Nord et des pays du Sud dans les négociations lors de la COP27 de Charm el-Cheikh en Égypte (2022).

Trois principaux points de blocage ont pu être identifiés entre différents pays des Nord et des Suds. D'autres clivages sont également apparus, permettant ainsi de relativiser l'existence d'un Nord global et d'un Sud global, qui s'opposeraient nécessairement. Le premier a trait à l'utilisation du terme *atténuation* dans le texte de la décision de la COP (Hrabanski et Le Coq, 2025). En effet, si toutes les parties étaient d'accord pour que figure dans le texte l'importance de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, l'Inde, soutenue par d'autres pays émergents restés plus en retrait, s'est montrée particulièrement réticente à voir apparaître aussi le terme *atténuation*. Pour ce grand pays agricole, les enjeux d'atténuation ne doivent pas entraver la sécurité alimentaire des pays en développement et émergents. À quelques heures de la clôture des négociations, l'Inde a accepté que le terme *atténuation* figure dans la décision de la COP3/CP27, créant « l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire ». Cet épisode montre à quel point il n'est pas acquis de penser en synergie les enjeux d'adaptation et d'atténuation pour de nombreux pays émergents et du Sud. Un second point de blocage concernait la création d'une structure permanente affectée aux enjeux agricoles dans la CCNUCC. Cette demande, qui reste un point d'achoppement dans les négociations, est principalement portée par les pays du G77, même si des divergences notables existent entre les propositions faites. Enfin, on peut identifier un enjeu lié à la place des systèmes alimentaires dans l'action climatique. Pour nombre de pays européens et émergents, la réflexion doit être faite à l'échelle des

9. JMA : Joint Mitigation and Adaptation Mechanism for the Integral and Sustainable Management of Forests.

10. Les ateliers se font maintenant en coopération avec les organes constitués au titre de la convention, par exemple le Fonds vert pour le climat. Les observateurs, dont les ONG et la recherche, participent également aux ateliers.

11. <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023/overview>.

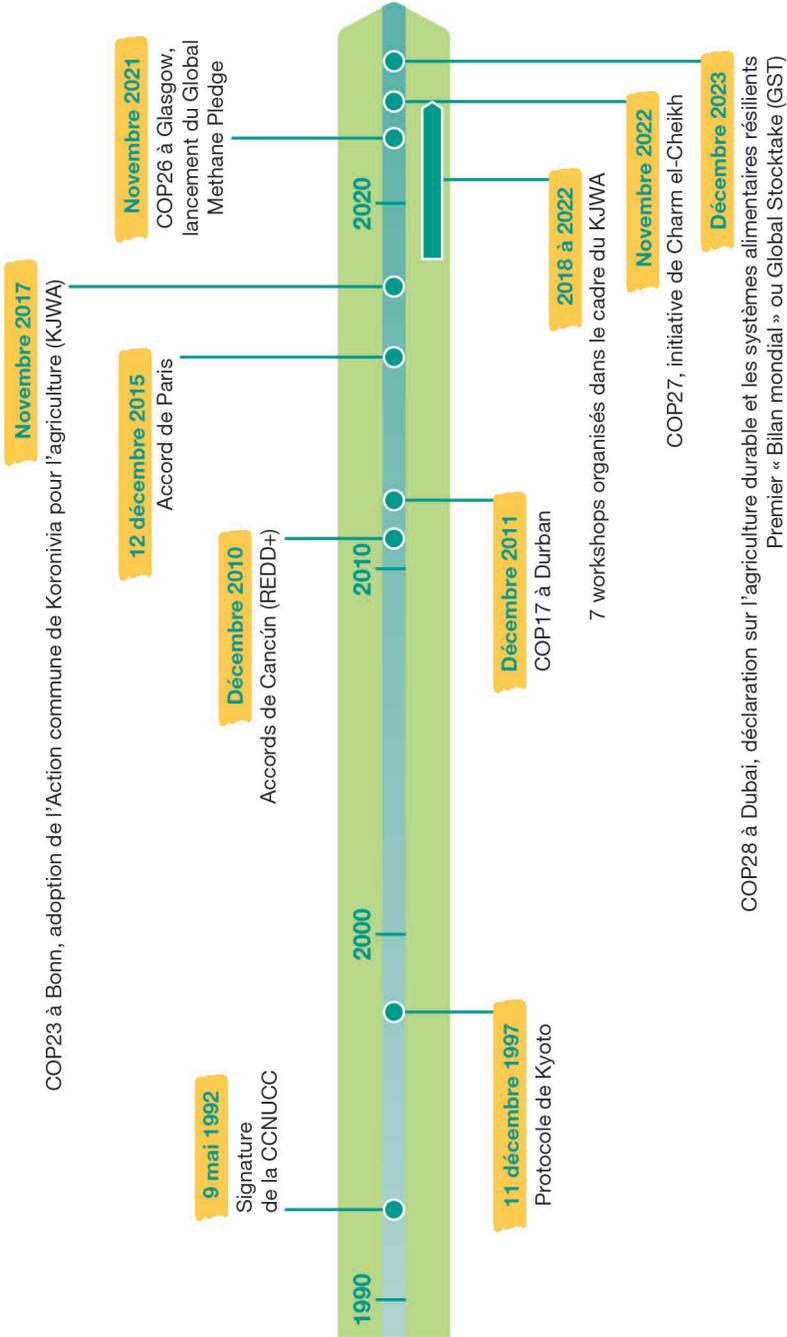


Figure 2.1. Les questions agricoles dans les négociations climatiques entre 1992 et 2023.

systèmes alimentaires : nos pratiques alimentaires dépendent étroitement des modes de production des produits agricoles, et une approche prenant en compte l'amont avec la production des intrants et l'éventuelle déforestation, et l'aval, avec le transport, le refroidissement, la transformation, et donc également les pertes et les gaspillages et les régimes alimentaires, est plus à même de permettre l'émergence de solutions gagnantes à tous niveaux (voir chapitre 23). Toutefois, d'un côté, le groupe Afrique préférerait se focaliser sur le secteur agricole, une question déjà complexe à instruire. De l'autre côté, certains pays du Nord et aux économies en transition refusaient de voir apparaître le terme *système alimentaire*, l'hypothèse la plus probable étant la crainte de remettre en question la surconsommation de viande, la déforestation, ou encore le commerce, ce qu'ils souhaitent impérativement éviter. Le terme *système alimentaire* a donc été rejeté dans le texte de l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh.

Malgré ces points de tensions, l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire a été adoptée et cette décision de COP3/CP27 marque donc une étape décisive dans les négociations. On notera tout de même que ce texte ne promeut ni l'agroécologie, qui aurait ouvert la voie à une refonte holistique des systèmes agricoles, ni l'agriculture climato-intelligente (*climate-smart agriculture*), davantage tournée vers les solutions technologiques. Aucun objectif chiffré de réduction des émissions de GES agricoles n'est discuté dans les COP ; aucune pratique n'a été encouragée ou stigmatisée (utilisation massive d'intrants chimiques, etc.). La présidence émirienne de la COP28 a ensuite mis en haut de l'agenda politique cette question, en proposant la Déclaration sur l'agriculture durable, les systèmes alimentaires résilients et l'action climatique, signée par 160 pays¹². Elle appelle les pays qui la rejoignent à renforcer la place des systèmes agricoles et alimentaires dans les contributions déterminées au niveau national et dans les plans nationaux d'adaptation et relatifs à la biodiversité. Dans la foulée de la COP28, la FAO a proposé une feuille de route qui établit 120 mesures (dont des mesures dites agro-écologiques) et étapes clés dans dix domaines pour l'adaptation et l'atténuation pour les systèmes agricoles et alimentaires. Elle vise à réduire de 25 % les émissions d'origine agricole et alimentaire, pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2035, et à transformer d'ici 2050 ces systèmes en puits de carbone capturant 1,5 Gt de GES par an. En définitive, l'initiative de Charm el-Cheikh portait sur l'agriculture et non pas sur les systèmes alimentaires, mais donnera lieu à un atelier, en juin 2025, sur les approches systémiques et holistiques en agriculture et dans les systèmes alimentaires, et le forum du Standing Committee on Finance de 2025 portera sur l'agriculture et les systèmes alimentaires durables¹³. Le sujet fait donc son chemin dans les enceintes de la CCNUCC.

2. Les marchés du carbone pour l'agriculture et les forêts : quels enjeux, quelles avancées ?

Les « marchés du carbone » sont, depuis quelques années, en plein essor. Pour certains observateurs (scientifiques et ONG), et sous réserve d'intégrité et de règles robustes, ils sont considérés comme un outil pour accélérer l'action et parvenir au plus tôt à

12. <https://www.tappcoalition.eu/images/COP28-UAE-Declaration-on-Sustainable-Agriculture-Resilient-Food-Systems-and-Climate-Action-1701436580.pdf>.

13. <https://unfccc.int/event/2025-forum-of-the-standing-committee-on-finance>.

la neutralité climatique (Schilling *et al.*, 2023). D'autres, plus critiques, soulignent le risque que ces mécanismes détournent certains acteurs de réductions immédiates et drastiques de leurs émissions de GES (Paul *et al.*, 2023; Kreibich et Hermville, 2021), ou encore dénoncent le fonctionnement même de ces mécanismes (Aykut, 2017). Dans les faits, ils permettent à des acteurs (étatiques ou non) d'échanger des résultats d'atténuation par des accords bilatéraux entre pays ou par le financement de projets de compensation dans un pays hôte. L'acheteur bénéficie alors des crédits prévus dans l'article 6 et appelés ITMO¹⁴ pour compenser des émissions qui dépasseraient son objectif (objectif climat des pays dans leurs CDN, objectif Corsia¹⁵ pour les compagnies aériennes internationales, etc.). Le vendeur, quant à lui, bénéficie de financements, mais il devra retrancher le résultat d'atténuation vendu de l'inventaire du pays hôte (dès lors qu'il s'agit d'une utilisation à des fins de conformité internationale). Cette opération, nommée «ajustement correspondant», permet d'éviter le double compte des unités échangées sous l'article 6.

Les premiers dispositifs réglementés par les Nations unies tels que les MDP et Moc (voir chapitre 1)¹⁶, les instruments de certification de projets issus du protocole de Kyoto, s'appliquent respectivement aux pays non industrialisés et industrialisés (dits «annexe I»). En parallèle du marché de conformité (ou réglementé), de nombreux standards sont établis sur le marché volontaire, certifiant des projets avec leurs propres exigences et critères de qualité. Il n'y a donc pas un, mais des marchés du carbone, hétérogènes, plusieurs standards faisant d'ailleurs face à des critiques récentes dans la presse¹⁷, qui remettent notamment en cause l'additionnalité des crédits. Or, l'additionnalité est un critère de base des crédits carbone : celui-ci donnant lieu à un «droit» à émettre par l'acheteur, il doit générer un flux de réductions d'émissions ou d'absorptions de carbone, afin d'avoir un bilan «neutre» pour l'atmosphère.

La rémunération des stocks de carbone existants, comme la conservation des forêts existantes ou encore la conservation de stocks fossiles (charbon, pétrole, etc.), fait l'objet de demandes par des pays à hauts couverts forestiers. Mais elle n'est pas éligible aux marchés du carbone, car non additionnelle. L'article 6 de l'accord de Paris, abouti en 2024 à la COP29, fixe les nouvelles règles onusiennes pour les marchés du carbone réglementés (remplaçant celles du protocole de Kyoto). Beaucoup espèrent que ces nouvelles règles entraîneront l'établissement d'un standard ou *benchmark* influençant positivement le marché volontaire.

Le dernier rapport de synthèse sur les CDN (NDC Synthesis Report¹⁸, 2023) indique que 76% des États, majoritairement des pays en développement souhaitant vendre des projets de compensation, prévoient de recourir au marché de l'article 6 pour recevoir des financements. L'acheteur utilisera le crédit pour atteindre à moindre coût l'objectif fixé dans sa CDN si c'est un pays, ou son objectif Corsia pour les compagnies aériennes

14. ITMO : *internationally transferred mitigation outcome* ou résultats d'atténuation transférés à l'échelle internationale, en français.

15. Corsia : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.

16. <https://agriculture.gouv.fr/protocole-de-kyoto-et-marche-carbone-europeen-comment-les-emissions-des-secteurs-de-lagrofourniture>.

17. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/08/25/la-credibilite-de-plusieurs-programmes-de-compensation-carbone-mise-en-doute-par-des-chercheurs_6186554_3244.html; <https://theconversation.com/histoire-des-credits-carbone-vie-et-mort-dune-fausse-bonne-idee-212903>.

18. <https://unfccc.int/ndc-synthesis-report-2023>.

soumises au règlement international, pour aboutir à son objectif « net zéro », ou encore pour communiquer sur sa « contribution » à la neutralité climatique pour les entreprises et autres acteurs. Certains, comme l'UE, souhaitent atteindre leur objectif CDN en propre, sans recourir à cette flexibilité des marchés carbone réglementés par l'article 6. Ainsi l'UE se dote d'un cadre domestique volontaire : les certificats d'absorption de carbone, permettant notamment de définir les règles pour les projets d'atténuation sur le territoire de l'UE, qui contribueront à atteindre la neutralité climatique et l'objectif CDN de l'UE.

Les règles générales de ces nouveaux marchés du carbone de l'article 6 ont été adoptées par les parties lors de la COP26 en 2021 : les résultats d'atténuations (ou ITMO) échangés peuvent concerner tous les secteurs (énergie, transport, agriculture, forêt, etc.), être des réductions d'émissions de GES ou des absorptions carbone. Concernant le secteur AFOLU spécifiquement, (1) les réductions d'émissions peuvent être liées par exemple à la baisse de la déforestation ou des émissions de méthane des bovins, à l'amélioration de la fertilisation des sols agricoles (réductions des émissions N₂O), etc., et (2) les absorptions carbone correspondent au *carbon farming* avec des pratiques augmentant le stockage de carbone dans les sols et la biomasse et mises en avant par l'Initiative internationale « 4 pour 1000 », comme les pratiques agroécologiques, l'agroforesterie, la gestion forestière durable, la restauration de terres dégradées, etc.

Depuis 2021, les négociations CCNUCC portent sur l'opérationnalisation des règles adoptées à la COP26 : la construction des registres pour s'assurer de la traçabilité des crédits, le contenu des lettres d'autorisation des pays hôtes, la définition des méthodologies pour les projets de compensation, le traitement des absorptions carbone, etc. Lors de la COP29 à Bakou, les règles d'opérationnalisation de l'article 6 ont enfin été adoptées, permettant au marché de se lancer officiellement, même si des travaux complémentaires sont prévus pour 2025 (notamment sur la manière de construire les scénarios de référence des projets ou de prendre en compte le risque de non-permanence).

Pour le secteur AFOLU, le standard sur le traitement des absorptions du carbone a cristallisé les tensions et les blocages entre pays, certains promouvant les solutions technologiques (CCU/S¹⁹) et d'autres les absorptions naturelles dans les écosystèmes (ou les solutions fondées sur la nature, SFN). Ce standard a été adopté lors de la COP29, mais les travaux complémentaires devant être menés en 2025 seront cruciaux pour le secteur AFOLU.

Le secteur AFOLU dispose de leviers sur les réductions d'émissions et sur les absorptions (sources et puits de GES), et peut donc jouer sur ces deux volets sur les marchés du carbone. Ses absorptions sont basées sur un processus naturel, la photosynthèse (aucune consommation d'énergie anthropique pour stocker du carbone contrairement aux CCU/S). C'est un secteur qui a de multiples atouts et synergies à valoriser (biodiversité, eau, air, sols, etc.), mais également des limites, avec en premier lieu le risque élevé de non-permanence (lié par exemple aux incendies, aux tempêtes ou autres perturbations libérant dans l'atmosphère le carbone stocké) qu'il convient de prendre en compte de manière appropriée.

Le secteur des terres sous les approches de coopération de l'article 6 est donc bien au cœur des négociations CCNUCC, les enjeux ayant grandi avec l'opérationnalisation des

19. CCU/S : *carbon capture, utilisation and storage*.

Encadré 2.1. Les trois outils de l'article 6 définissant un cadre pour la coopération entre parties sous l'accord de Paris

Deux mécanismes marchands (articles 6.2 et 6.4)

L'article 6.2 établit des règles comptables pour les échanges de crédits carbone entre pays et définit les conditions de participation. Les ITMO (*internationally transferred mitigation outcome*) représentent une réduction d'émissions de GES (ou absorption) réalisée dans un pays et qui peuvent être transférés à un autre pays pour contribuer à ses propres objectifs. Les résultats transférés sont retirés de l'inventaire du pays hôte, qui ne peut pas les utiliser pour atteindre sa propre CDN, c'est l'«ajustement correspondant». Pourtant, certains pays souhaitent faire reconnaître (de manière automatique) sous l'article 6.2 le cadre de Varsovie pour REDD+, délivrant des paiements basés sur des résultats. C'est une ligne rouge pour beaucoup d'autres pays, car contraire aux règles adoptées à la COP26, notamment en matière d'additionnalité et de scénarios de référence qui doivent être «bien meilleurs» que l'historique, alignés avec la CDN du pays hôte et avec l'objectif de long terme de l'accord de Paris. Les règles sur les registres, les autorisations, la transparence des informations, etc., faisant l'objet des dernières négociations, ont été finalisées à la COP29. Le secrétariat de la CCNUCC est chargé de créer un registre international qui devra assurer le suivi et la traçabilité des ITMO échangés.

L'article 6.4 vise à établir des méthodologies permettant de certifier des projets de compensation carbone; il pourrait servir de standard à l'international, également pour le marché volontaire. Une grande partie du travail d'opérationnalisation est confiée à un groupe d'experts onusien (Supervisory Body)* chargé de délivrer des lignes directrices pour les méthodologies à appliquer aux projets de compensation et pour les absorptions du carbone. Après deux échecs, lors des négociations de la COP27 puis de la COP28, les standards 6.4 sur les méthodologies, les absorptions carbone et l'outil de développement propre (outil permettant d'assurer des sauvegardes socio-environnementales et le respect des objectifs de développement durable sur les projets de compensation) ont été validés le premier jour de la COP29. Ces standards déterminent des règles plus ambitieuses que les textes proposés aux COP précédentes (notamment sur les scénarios de référence, l'additionnalité, le risque de non-permanence, etc.). Cependant, il reste des briques manquantes qui feront l'objet de travaux supplémentaires par le Supervisory Body en 2025 (notamment sur la construction des scénarios de référence et le risque de non-permanence).

Un mécanisme non marchand (article 6.8)

Hors des marchés du carbone, l'article 6.8 établit une vitrine onusienne permettant de mettre en valeur des approches de coopérations non marchandes avec une vision systémique liant atténuation, adaptation et biodiversité. Ce mécanisme, fortement porté par la Bolivie comme solution autre qu'une régulation basée sur les marchés, pourrait mettre en valeur des solutions pour la conservation des stocks (non éligibles au marché du carbone) ou des paiements basés sur des résultats (de type REDD+) qui ne répondraient pas aux exigences des marchés carbone (notamment en matière d'additionnalité), mais qui valoriseraient d'autres bénéfices que l'atténuation. Une décision a également été validée lors de la COP29 sur cet article 6.8, en vue d'améliorer la plateforme web CCNUCC créée pour diffuser les projets d'approches non marchandes.

*<https://unfccc.int/process-and-meetings/bodies/constituted-bodies/article-64-supervisory-body>.

marchés et les attentes étant fortes, notamment du côté des pays forestiers. Toutefois, des controverses persistent entre les acteurs : pays, ONG, secteur privé, etc. Certains pointent également le risque de *greenwashing* détournant les acheteurs du respect de la séquence « éviter, réduire, compenser » (ERC). Des défis restent à relever dans les négociations futures : comment s'assurer de la permanence des projets de compensation ? Comment s'assurer que le projet n'a pas d'impacts négatifs sur l'environnement, la sécurité alimentaire, les populations locales ? Comment assurer un revenu suffisant aux agriculteurs et forestiers, « producteurs » du crédit carbone ? De nombreuses autres interrogations restent à approfondir.

3. Évaluer les efforts d'adaptation pour le secteur agricole au sein des négociations internationales sur le climat

Si le cadre des négociations internationales sur le climat a progressivement intégré les enjeux agricoles, reste la question de l'évaluation des efforts d'atténuation et d'adaptation des pays dans ce secteur. Dans le cadre de l'accord de Paris, les parties se sont engagées à déposer leur CDN, et à la mettre à jour tous les cinq ans en accroissant leur ambition en matière d'atténuation et d'adaptation. En 2023, le premier bilan mondial a été achevé à la COP28 de Dubai, afin d'évaluer les progrès vers les objectifs de l'accord de Paris (atténuation, adaptation et moyens de mise en œuvre). Cette dernière partie se focalise sur la dimension adaptation pour montrer qu'elle nécessite de nouvelles approches méthodologiques.

Au-delà du secteur agricole, les efforts visant à renforcer les politiques, la mise en œuvre et le financement de l'adaptation sont manifestement à l'œuvre à l'échelle planétaire, par le biais de divers canaux de financement (par exemple les organisations de financement multi et bilatérales et le secteur privé) (voir chapitre 26). Il est toutefois estimé qu'au regard de l'augmentation des risques climatiques le changement d'échelle nécessaire n'a pas encore eu lieu (Berrang-Ford *et al.*, 2021 ; IPCC, 2022 ; PNUE, 2023). Dans leur ensemble, les stratégies d'adaptation restent cantonnées à une vision relativement court-termiste (horizon d'une à trois décennies au maximum) et ont une portée limitée en ce qu'elles ne s'attaquent pas aux causes profondes de l'exposition et de la vulnérabilité au changement climatique. Leur couverture géographique reste incomplète, et leur rythme de progression trop lent. Le Giec conclue que les impacts observés, les risques projetés, les tendances en matière de vulnérabilité, les limites à l'adaptation et les pertes et dommages associés démontrent que « la transformation pour un développement durable et résilient au climat est plus urgente que ce qui avait été évalué précédemment (*degré de confiance très élevé*) » (IPCC, 2023 ; p. 89).

Au sein de la CCNUCC, « l'adéquation » et « l'efficacité » sont les dimensions clés au travers desquelles la question des efforts d'adaptation est posée. L'adéquation renvoie à la cohérence entre les instruments (comme le financement) et les besoins d'adaptation identifiés. L'efficacité concerne les résultats produits par ces instruments en matière de décaissement et/ou de réduction du risque climatique. Par exemple, des paiements en soutien à des produits de base spécifiques pour diminuer la vulnérabilité des producteurs à court terme peuvent décourager les ajustements ou les réorientations de la production, bénéfiques à moyen ou long terme (OECD, 2023), créant une maladaptation (Boutroue *et al.*, 2022). Sur cette base, diverses initiatives d'évaluation de l'adaptation sont développées depuis plusieurs années au sein de la

CCNUCC (rapports de synthèse du secrétariat ou rapports du comité d'adaptation) ou en appui à celle-ci (comme l'Adaptation Gap Report du PNUE). Toutes s'appuient sur les CDN, sur les communications autour de l'adaptation, sur les plans d'adaptation nationaux (PNA²⁰) et sur les flux de financements rapportés par les acteurs bi et multilatéraux (PNUE, 2023). Or, les données semblent insuffisantes pour comprendre finement l'adéquation et l'efficacité des stratégies et des interventions d'adaptation au niveau mondial. D'autres informations nécessaires touchent aux processus de gouvernance aux échelons infranationaux, à la réduction effective des facteurs naturels et anthropiques du risque climatique dans différents contextes et secteurs, et jusqu'à des éléments sur les risques climatiques transfrontaliers (Anisimov *et al.*, 2023). Or, ni les communications nationales reposant sur des statistiques nationales moyennées ni les bases de données sur les projets financés dans le cadre de la coopération internationale n'offrent une telle granularité (Magnan *et al.*, 2023a). Il est dès lors nécessaire de s'appuyer, en complément, sur d'autres méthodes d'évaluation de l'adaptation telles que les méthodes par jugement d'expert (voir par exemple les travaux suivants : Hallegatte *et al.*, 2020; Browne *et al.*, 2021; Banque mondiale, 2021), pour intégrer les informations qualitatives et quantitatives. Celles-ci peuvent s'avérer d'une grande utilité pour renseigner les efforts d'adaptation dans les cadres de l'objectif global d'adaptation et du bilan mondial. Ces méthodes permettent de minimiser le problème de la définition des « bons » indicateurs quantifiés d'adaptation, discussion inextricable qui renvoie à des visions divergentes entre parties à la CCNUCC (comme les indicateurs applicables à tout le monde *vs* qui reflètent les spécificités contextuelles de chaque pays; il existe diverses sources d'information sur ces indicateurs²¹). Elles permettent aussi de se confronter au problème de l'accès aux données, et s'interrogent sur le risque d'une charge additionnelle conséquente qui reposerait sur les services statistiques des pays comme sur leurs équipes de négociation. Ainsi un processus d'évaluation externalisé et scientifiquement fondé aurait-il sa place dans le paysage des travaux à engager pour nourrir les réflexions sur les progrès d'adaptation à l'échelle globale.

4. Conclusion

Les discussions sur l'agriculture dans les négociations climatiques ont été jusqu'à présent laborieuses et souvent tendues. Toutefois, le processus se construit progressivement et commence à porter ses fruits. La décision de la COP27 de Charm el-Cheikh constitue une avancée majeure : pour la première fois, le résultat des négociations est rendu opérationnel sous forme de recommandations aux entités financières de la CCNUCC et aux pays. Elle prolonge les négociations agricoles jusque fin 2026, et envoie un message politique fort. Le secteur agricole est particulièrement émetteur, alors que selon les derniers chiffres de la Banque mondiale²², 4% de la finance climatique seulement lui

20. PNA : plan national d'adaptation.

21. Rapport 2023 de la Food and Agriculture Organization : <https://www.fao.org/documents/card/en/cc2038en>; Rapport 2023 de l'OCDE : https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/agricultural-policy-monitoring-and-evaluation-2023_b14de474-en; Comité agriculture de l'International Platform on Adaptation Metrics : <https://adaptationmetrics.org/committees>.

22. <https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture>. Si l'on inclut dans le calcul la finance climatique et le financement du développement, alors 22% de ces fonds ont été affectés à l'agriculture en 2020; toutefois ce chiffre ne fait que décroître, puisqu'il était de 45% en 2000 (Galbiati *et al.*, 2023). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cb1ced5c-f9a5-48b1-962c-82ac719d2722/content>.

sont réservés. Cette décision de la COP27 constitue donc un appel aux financeurs internationaux et nationaux, publics et privés, afin de cibler davantage leurs actions vers le secteur agricole, notamment dans les pays du Sud, dont la sécurité alimentaire est particulièrement menacée par le changement climatique. Dans cette lignée, l'atelier sur les approches systémiques et holistiques en agriculture et dans les systèmes alimentaires, celui sur l'accès aux moyens de mise en œuvre (comme la finance), et les deux rapports annuels du secrétariat de la CCNUCC sur le travail des organes sous la CCNUCC devraient améliorer la compréhension et la mise en lumière de ces sujets. En parallèle, les négociations au sein de l'article 6 ont confirmé la place centrale du secteur des terres dans les marchés du carbone, celui-ci délivrant des réductions d'émissions (urgentes et drastiques sur le court terme) et des absorptions (nécessaires pour contrebalancer les émissions résiduelles à long terme). La COP29 ayant adopté les règles d'opérationnalisation des marchés carbone de l'article 6, les premières méthodologies pour certifier des projets devraient être déposées en 2025, en parallèle des travaux onusiens complémentaires qui devront préciser la construction des scénarios de référence, la prise en compte du risque de non-permanence, etc. Enfin, le premier bilan mondial achevé à la COP28 a permis de faire un état des lieux des engagements des pays par rapport aux cibles, et a démontré la nécessité de renforcer l'action climatique. Il a donné lieu à une décision de la COP, qui souligne à quel point les méthodes d'évaluation des engagements sont essentielles, en lien avec les enjeux de financement.

5. Références bibliographiques

- Anisimov A., Magnan A.K. (eds.), 2023. *The global transboundary climate risk report 2023*. The Institute for Sustainable Development and International relations & Adaptation Without Borders, 144 p. <https://www.iddri.org/en/publications-and-events/report/global-transboundary-climate-risk-report-2023>
- Aykut S., 2017. La "gouvernance incantatoire". L'accord de Paris et les nouvelles formes de gouvernance globale. *La pensée écologique*, 1(1). <https://lapenseeetecologique.com/la-gouvernance-incantatoire-laccord-de-paris-et-les-nouvelles-formes-de-gouvernance-globale/>
- Banque Mondiale, 2021. *Resilience rating system*. The World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35039>
- Berrang-Ford L., Siders A.R., Lesnikowski A., et al., 2021. A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, 11, 989-1000. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y>
- Boutroue B., Bourblanc M., Mayaux P.L., Ghiotti S., Hrabanski M., 2022. The politics of defining maladaptation: enduring contestations over three (mal) adaptive water projects in France, Spain and South Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(5), 892-910. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.2015085>
- Browne N., Rozenberg J., De Vries Robbé S., Kappes M., Lee W., Prasad A., 2021. Résilience à 360°: Un guide pour préparer les Caraïbes à une nouvelle génération de chocs. World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/36405> License: CC BY 3.0 IGO
- Caron P., Treyer S., 2016. Climate-Smart Agriculture and International Climate Change Negotiation Forums. In: Torquebiau E., *Climate Change and Agriculture Worldwide*, Springer, 325-336. <https://doi.org/10.3917/cii.086.0189>
- Chandra K.E., McNamara P., Dargusch, et al., 2016. Resolving the UNFCCC Divide on Climate-Smart Agriculture, *Carbon Management*, 7 (5-6), 295-299. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1235420>
- Fleurant M.M., 2021. L'agriculture dans le régime juridique international du climat. *Les Cahiers de droit*, 62(3), 935-965. <https://doi.org/10.7202/1080617ar>
- Galbiati G.M., Yoshida M., Benni N., Bernoux M., 2023. Climate-related development finance to agrifood systems – Global and regional trends between 2000 and 2021. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9010en>

Hallegatte S., Rentschler J., Rozenberg J., 2020. Adaptation Principles: A Guide for Designing Strategies for Climate Change Adaptation and Resilience. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34780>

Hrabanski M., 2020. Une climatisation des enjeux agricoles par la science ? Les controverses relatives à la climate-smart agriculture. *Critique internationale*, 86(1), 189-208.

Hrabanski M., Le Coq J.-F., 2022. Climatisation of agricultural issues in the international agenda through three competing epistemic communities: Climate-smart agriculture, agroecology, and nature-based solutions. *Environmental Science & Policy*, 127, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.022>

Hrabanski M., Le Coq J.-F., 2025. Agriculture at COP27: Antagonistic Political Framing and Fragmentation of Agricultural Issues Within Climate Negotiations and Beyond. *Global Environmental Politics*, 1-14. https://doi.org/10.1162/glep_a_00778

IPCC, 2022. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: impacts, adaptation and vulnerability, H.-O. Pörtner *et al.*, eds.

IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Lee H. *et al.*, eds.

Kreibich N., Hermwille L., 2021. Caught in between: credibility and feasibility of the voluntary carbon market post-2020. *Climate Policy*, 21(7), 939-957. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1948384>

Magnan A.K., Anisimov A., Vallejo L., 2023a. The potential of expert judgment-based approaches to assessing adaptation under the GST: the case of the GAP-Track. In: *Perspectives: Adequacy and effectiveness of adaptation in the Global Stocktake*. UNEP Copenhagen Climate Centre, 48-64. <https://unepccc.org/wp-content/uploads/2023/02/perspectives-adequacy-and-effectiveness-of-adaptation-in-the-global-stocktake-web.pdf>

Magnan A.K., Bell R., Duvat V.K., Ford J.D., Garschagen M., Haasnoot M., *et al.*, 2023b. Status of global coastal adaptation. *Nature Climate Change*, 13: 1213-1221. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01834-x>

OECD, 2023. *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2023: Adapting Agriculture to Climate Change*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/b14de474-en>

Paul C., Bartkowski B., Dönmez C., Don A., Mayer S., Steffens M., *et al.*, 2023. Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>

Schilling F., Baumüller H., Ecuru J., von Braun J., 2023. Carbon farming in Africa: Opportunities and challenges for engaging smallholder farmers. Center for Development Research (ZEF). <https://doi.org/10.48565/bonndoc-122>

Soto Golcher C., Visseren-Hamakers I.J., 2018. Framing and integration in the global forest, agriculture and climate change nexus. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 36(8), 1415-1436. <https://doi.org/10.1177/2399654418788566>

UNEP, 2023. Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed, Nairobi. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>

Vespa M., 2002. Climate Change 2001: Kyoto at Bonn and Marrakech. *Ecology LQ*, 29, 395.

Chapitre 3

Tensions et synergies entre les concepts d'agriculture climato-intelligente, d'agroécologie et de solutions fondées sur la nature

Nadine Andrieu, Audrey Naulleau, Jean-François Le Coq, Marie Hrabanski

Agriculture climato-intelligente, agroécologie, solutions fondées sur la nature, autant de concepts qui pour faire face aux enjeux du changement climatique proposent de nouvelles approches en remplacement aussi bien d'une agriculture industrielle consommatrice d'intrants de synthèse que d'une agriculture dite traditionnelle souvent moins productive et/ou moins rémunératrice (Duru *et al.*, 2015 ; Lipper *et al.*, 2014). Si l'agriculture et l'élevage industriels promus par la révolution verte dans différents pays du Sud ont permis des augmentations significatives de production, ils se sont néanmoins accompagnés d'externalités négatives sur l'environnement en particulier en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) générées par l'utilisation intensive des intrants de synthèse, par la mécanisation lourde et par la croissance des cheptels. En parallèle, certaines formes d'agriculture et d'élevage n'ayant pas bénéficié de la révolution verte demeurent peu utilisatrices d'intrants de synthèse, mais dans certains contextes elles se sont accompagnées d'une surexploitation des ressources naturelles contribuant à la déforestation et à l'érosion des sols (Tittonell, 2020). Les concepts d'agriculture climato-intelligente, d'agroécologie ou de solutions fondées sur la nature, portés par des communautés épistémiques différentes présentent des points de convergence, mais aussi des divergences sur la façon de répondre aux enjeux du climat pour ces différents modèles agricoles.

Plusieurs auteurs ont tâché de trouver des synergies entre ces concepts. Ils ont ainsi mis en évidence les synergies possibles entre les concepts d'agriculture climato-intelligente (*climate-smart agriculture* en anglais, ou CSA) et d'agroécologie. Saj *et al.* (2017) ou Torquebiau *et al.* (2018) suggèrent de favoriser formellement les principes de l'agroécologie dans les démarches CSA. D'autres auteurs ont mis l'accent sur les différences telles qu'une prise en compte insuffisante dans le concept de CSA des savoirs et pratiques traditionnels des agriculteurs ayant permis la résilience des systèmes agricoles face à des chocs multiples au cours du temps en se basant sur les principes de l'agroécologie (Altieri *et al.*, 2015). Une autre critique forte portée par les ONG est le risque de cooptation de ce concept par certains grands industriels mondiaux, contributeurs aux émissions de GES, et *in fine* d'écoblanchiment (Pimbert, 2015). Ce même type de critique est fait sur le concept de solutions fondées sur la nature (SFN), qui promeut des approches de restauration des écosystèmes pouvant exclure les communautés rurales ou être interprétées comme des droits à polluer pour de grands industriels.

Ce chapitre définit puis décrit les tensions et les synergies entre les trois concepts aux deux échelles de l'action climatique, à savoir (1) celle des politiques d'adaptation au changement climatique et (2) celle des démarches de conception de systèmes de production adaptés au changement climatique.

1. Origine et définitions

L'agroécologie est le plus ancien des trois concepts puisqu'il a émergé en 1920. Il a évolué au cours du temps et est ainsi passé de discipline à l'interface entre agronomie et écologie à une science transdisciplinaire considérant de façon explicite les changements sociotechniques à opérer au sein des systèmes de production et des systèmes alimentaires (Wezel *et al.*, 2020). Le concept revendique ainsi une transformation profonde des systèmes de production et des systèmes alimentaires, plutôt qu'une simple substitution des pratiques conventionnelles par de nouvelles pratiques (Gliessman, 2016; Duru *et al.*, 2015). L'agroécologie n'est pas décrite par un ensemble de pratiques agricoles prédéfinies. Elle est basée sur des principes biotechniques tels que la valorisation des processus écologiques, la promotion de la biodiversité au sein des systèmes agricoles, le recyclage des biomasses et des nutriments, et les synergies entre les composantes de ces systèmes. L'agroécologie est également basée sur des principes sociotechniques tels que la cocréation de savoirs entre les producteurs et les scientifiques, ou encore la promotion de mécanismes favorisant une gouvernance partagée des ressources productives et contribuant à la résilience des systèmes agricoles et alimentaires face à des chocs multiples. Le changement climatique n'est pas un principe clé; toutefois, un nombre croissant de travaux, en particulier depuis le début des années 2000, ont démontré qu'une agriculture basée sur les principes de l'agroécologie présentait des bénéfices en matière d'adaptation et d'atténuation (Saj *et al.*, 2017; Altieri, 2015; Quintero *et al.*, 2024).

Pour mieux intégrer l'agriculture dans les négociations internationales sur le climat, la FAO (2013) a proposé le concept de CSA qui vise (1) à accroître durablement la productivité des systèmes agricoles pour assurer la sécurité alimentaire et augmenter les revenus, (2) à renforcer leur résilience face au climat, et (3) à réduire les émissions de GES, tout en contribuant à la préservation des ressources (FAO, 2013). La proposition de ce concept part du principe que l'agriculture dans le monde est à la fois source d'émissions de GES et aussi une partie de la solution pour limiter ces émissions. Le secteur dit «des terres» (agriculture, foresterie, pastoralisme et autres usages des terres) se distingue en effet d'autres secteurs par sa capacité d'adaptation aux changements climatiques combinée à un potentiel d'atténuation des émissions de GES très significatif par le biais d'une réduction des émissions de GES, mais aussi de la séquestration du carbone dans les sols et dans la biomasse. Le concept issu de la sphère politique (Hrabanski, 2020) a ensuite été adopté par la communauté scientifique et en particulier par le programme transversal Changement climatique et sécurité alimentaire du CGIAR (*global research partnership for a food-secure future dedicated to transforming food, land, and water systems in a climate crisis*) permettant de donner de la crédibilité au concept. Les trois objectifs ou piliers de la CSA peuvent être abordés à différents niveaux, du local au global. Malgré différentes tentatives de lister des pratiques CSA, le concept vise davantage à trouver des synergies entre des enjeux de sécurité alimentaire et de changement climatique (Torquebiau *et al.*, 2018).

Le concept de SFN est également apparu au début des années 2000 dans les documents internes de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Il est défini comme des actions visant à protéger, à gérer durablement et à restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, qui répondent aux défis sociétaux (par exemple le changement climatique, la sécurité alimentaire et hydrique ou les catastrophes naturelles) de manière efficace et adaptative, tout en apportant simultanément des avantages en matière de bien-être humain et de biodiversité (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Le concept vise à répondre à la demande des organisations internationales de trouver des « alternatives » aux solutions d'ingénierie conventionnelles pour s'adapter et atténuer les effets du changement climatique, tout en améliorant les moyens de subsistance et en protégeant les écosystèmes naturels et la biodiversité (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Si la conservation de la nature est le principe premier, les fondateurs reconnaissent la nécessité d'intégrer d'autres enjeux sociétaux, la spécificité culturelle de chaque contexte et la production de bénéfices sociétaux de manière équitable, tout en favorisant la transparence et une large participation.

2. Mise à l'agenda politique du changement climatique avec les trois concepts

Bien que promu par trois communautés épistémiques différentes, ces concepts ont joué un rôle décisif dans l'émergence des enjeux agricoles dans l'agenda climatique mondial (Hrabanski et Le Coq, 2022). Jusqu'à la Conférence des parties (COP) de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques de Durban en 2011, l'agriculture était quasi absente des négociations internationales sur le climat (voir chapitre 2). Toutefois, à la fin des années 2000, une fenêtre d'opportunité s'est ouverte en faveur de la mise à l'agenda des enjeux agricoles dans la gouvernance du climat. C'est dans ce contexte qu'a émergé la notion de CSA puis de SFN. Dans la foulée d'autres concepts ont été remobilisés tels que l'agroécologie afin de rapprocher les enjeux climatiques et les questions agricoles. Depuis le début des années 2010, l'agriculture est ainsi progressivement devenue l'un des enjeux majeurs des COP, dans la mesure où les débats sur la façon d'aborder la question sensible des modèles agricoles s'y multiplient.

Toutefois, les travaux du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sont restés pendant longtemps particulièrement prudents vis-à-vis de l'utilisation de ces concepts. Le concept d'agroécologie n'apparaît que dans les références bibliographiques des rapports de 1995 et 2007 du groupe II¹. Quant à celui de CSA, il est mentionné dans le rapport de 2014 du groupe II. Cette relative absence des concepts souligne sans doute la volonté des auteurs du Giec de tenir à distance les enjeux politiques liés à leur utilisation. Toutefois, depuis la publication du rapport spécial sur les terres du Giec en 2019, les principes de l'agroécologie, de CSA et de SFN ont été plus ouvertement discutés et mis en avant (IPCC, 2019). Le dernier rapport du Giec de 2023 confirme cette tendance puisqu'il encourage à la fois les technologies issues de la CSA, de l'agroécologie et des SFN.

L'utilisation de ces concepts illustre l'importance des communautés scientifiques dans le processus d'élaboration des politiques aux niveaux international et transnational.

1. Le groupe II étudie les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique.

Malgré l'intérêt partagé pour intégrer l'agriculture dans l'agenda climatique, ces trois concepts sont en compétition pour la promotion de modèles agricoles distincts. Ainsi ces débats conceptuels ne doivent pas masquer les enjeux politiques associés (Hrabanski et Le Coq, 2022).

Hrabanski et Le Coq (2022) montrent que les tensions politiques limitent la promotion de ces termes à l'échelle internationale. Depuis la COP21 de Paris en 2015, on observe une augmentation exponentielle du nombre d'événements qui leur sont associés dans les COP. De même, ces trois termes peuvent être utilisés par des acteurs politiques dans leurs discours et leurs prises de parole, comme ce fut le cas du discours d'ouverture de la COP17 de Kofi Annan en faveur du concept de CSA. Toutefois les controverses et les enjeux sont tels que ces concepts n'apparaissent pas dans les décisions officielles. Ainsi, le texte final de l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire, qui entérine pourtant la place des questions agricoles dans les négociations climatiques, ne promeut ni l'agroécologie qui aurait ouvert la voie à une refonte holistique des systèmes agricoles ni la CSA, davantage tournée vers la promotion de solutions technologiques. Le concept de SFN a fait pour la première fois son apparition dans une décision de COP, mais ce uniquement dans le Sharm el-Sheikh Implementation Plan, dont l'article 14 porte sur les forêts, et qui est de fait bien éloigné des enjeux agricoles. Au contraire, les États, eux, mobilisent largement ces concepts dans leurs contributions déterminées au niveau national (CDN). En 2019, sur les 197 États qui ont rédigé une CDN, treize ont abordé le concept d'agroécologie et 29, de CSA. Néanmoins, le concept de CSA était principalement associé à l'adaptation et au besoin de transfert de technologies (Hrabanski et Le Coq, 2022). En outre, trois pays ont abordé simultanément les concepts de CSA et d'agroécologie dans leurs CDN. Bien que les SFN n'aient pas été directement mentionnées, douze pays ont énoncé la « gestion écosystémique », vingt ont stipulé « l'adaptation basée sur les écosystèmes », et deux pays ont évoqué « l'atténuation basée sur les écosystèmes ».

3. Coconception de pratiques innovantes pour faire face aux enjeux climatiques

Dans les démarches de coconception de systèmes innovants pour faire face au changement climatique menées avec les acteurs de terrain (producteurs, techniciens, chercheurs), le principal défi est de pouvoir articuler ces enjeux avec d'autres problématiques auxquelles sont confrontés les producteurs. Il peut s'agir d'autres enjeux environnementaux (Acosta-Alba *et al.*, 2019) ou de l'amélioration des capacités productives (Jules *et al.*, 2023). Dans ces démarches, les producteurs ne se revendiquent pas toujours explicitement d'une communauté épistémique ou d'une autre. Néanmoins, ces démarches sont portées par des chercheurs ou des techniciens pouvant eux se réclamer de telle ou telle communauté en fonction de leur trajectoire personnelle ou académique. Dans plusieurs travaux, les porteurs ont cherché à favoriser de façon pragmatique ou opportuniste les synergies entre les concepts d'agroécologie et de CSA, promouvant des approches techniques basées sur les principes de l'agroécologie et mesurant leurs performances en matière de sécurité alimentaire, d'adaptation et d'atténuation (par exemple Osorio-Garcia *et al.*, 2019; Selbonne *et al.*, 2022). Ces approches sont basées sur les principes

de diversification des systèmes agricoles et d'élevage (comme l'agroforesterie, les cultures associées, les systèmes d'élevage multispèces), de recyclage (tels l'intégration agriculture-élevage permettant de réduire la production, le transport et l'utilisation d'intrants de synthèse), d'utilisation plus efficiente des ressources en eau et en nutriments grâce à des aménagements à l'échelle du paysage ou de la parcelle. Elles sont déclinées localement dans des démarches participatives qui reposent sur des plateformes d'innovation comme lieu d'échange de connaissances ou de coconstruction des solutions avec les acteurs. Mais des tensions peuvent exister localement entre ces deux concepts, car le cadre de contraintes de la CSA est moins restrictif et peut aboutir à la promotion de pratiques pouvant ne pas s'aligner avec les principes de l'agroécologie. Par exemple, les nouvelles variétés plus résilientes sont souvent présentées comme CSA, sans préciser le niveau d'intensification (en intrants de synthèse ou non) requis pour que ces variétés expriment leur potentiel (Akinyi *et al.*, 2022). Aussi des tensions émergent lorsque le processus de conception est centré sur la dimension technique sous-estimant l'importance d'intégrer les connaissances des acteurs de terrain et d'accompagner les transitions des systèmes agricoles et d'élevage à l'échelle de l'exploitation ou du territoire (Scherr *et al.*, 2012; Mockshell et Kamanda, 2018).

Les SFN appliquées aux systèmes agricoles incluent le développement de systèmes agroforestiers, pouvant jouer un rôle sur le stockage du carbone et sur le maintien de la biodiversité (Getnet *et al.*, 2023), et la résilience des systèmes (Tham-Agyekum *et al.*, 2023). L'agriculture de conservation est aussi présentée comme une SFN. Les pratiques promues peuvent donc apparaître similaires à celles promues dans les différentes communautés scientifiques. Mais là encore les évaluations portent essentiellement sur les dimensions techniques et environnementales et peu d'attention est portée sur l'accompagnement des transitions (Soterroni *et al.*, 2023).

4. Une impossible intégration des concepts pour l'action climatique ?

Le tableau 3.1 synthétise les tensions et les synergies identifiées entre les concepts dans la mise à l'agenda politique du changement climatique et dans les démarches de coconception de systèmes agricoles innovants.

Une action climatique coordonnée viserait à limiter les clivages entre communautés épistémiques en s'appuyant sur les synergies identifiées pour ces deux niveaux d'échelle. Sur le plan politique, les tensions prédominent et s'expliquent par des trajectoires et des visions différentes des acteurs portant ces politiques. Ces tensions vont avoir des répercussions sur la nature des instruments politiques envisagés pour accompagner les transitions locales. Néanmoins, au niveau local, les synergies sont possibles lorsque la posture adoptée par les acteurs de terrain est participative et permet de coconstruire les solutions. Cela implique également de se doter de méthodes multicritères pour évaluer les effets que peuvent avoir les solutions coconçues sur la gamme de critères considérés dans ces trois communautés (sécurité alimentaire, services écosystémiques, conservation des écosystèmes naturels adjacents).

Tableau 3.1. Tensions et synergies entre les concepts d'agriculture climato-intelligente, de solutions fondées sur la nature et d'agroécologie.

	Synergies	Tensions
Pour l'agenda politique	Les trois concepts offrent une opportunité pour considérer l'agriculture comme une solution pour faire face au changement climatique.	<p>Les porteurs des concepts ont des modèles de développement agricoles bien différents.</p> <p>Les porteurs de SFN issus du monde de la conservation perçoivent encore les systèmes agricoles comme destructeurs de la nature, rendant difficiles les articulations avec les promoteurs de l'agroécologie ou de la CSA.</p> <p>Les porteurs académiques de la CSA (par exemple CGIAR) intègrent désormais davantage l'agroécologie.</p> <p>Les porteurs et les mouvements sociaux du courant d'agroécologie sont globalement suspicieux quant à un rapprochement avec les porteurs de la CSA.</p>
Pour la conception de systèmes innovants	<p>Les évaluations des solutions techniques envisagées sont multicritères avec une prévalence différente selon les concepts : sécurité alimentaire pour la CSA, conservation de la nature pour les SFN, services écosystémiques pour l'agroécologie.</p> <p>Lorsque la posture de conception est participative, elle favorise la cocréation de connaissances et les synergies entre les trois concepts.</p>	<p>Le mouvement agroécologique, du fait de ses origines, est le plus avancé sur les dimensions d'accompagnement des transitions, CSA et SFN ont une porte d'entrée plus technique.</p> <p>Les systèmes agricoles sont confrontés à de multiples risques autres que climatiques, qui ne sont pas toujours pris en compte par les trois concepts.</p>

5. Références bibliographiques

- Acosta-Alba I., Chia E., Andrieu N., 2019. The LCA4CSA framework: Using life cycle assessment to strengthen environmental sustainability analysis of climate smart agriculture options at farm and crop system levels, *Agricultural Systems*, 171, 155-170. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.001>
- Akinyi D.P., Karanja Ng'ang'a S., Ngigi M., Mathenge M., Girvetz E., 2022. Cost-benefit analysis of prioritized climate-smart agricultural practices among smallholder farmers: evidence from selected value chains across sub-Saharan Africa. *Heliyon*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09228>
- Altieri M., Nicholls C., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the Design of Climate Change-Resilient Farming Systems, *Agron. Sustain. Dev.* 35: 869-90. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S. (eds.), 2016. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN. 97p.
- Duru M., Therond O., Fares M., 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy and Sustainable Development*. 35:1237-1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- FAO, 2013. *Climate-smart Agriculture Sourcebook*. Rome, Italy. 570 p. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b21f2087-f398-4718-8461-b92afc82e617/content>

- Getnet D., Mekonnen Z., Anjulo A., 2023. The potential of traditional agroforestry practices as nature-based carbon sinks in Ethiopia. *Nature-Based Solutions*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100079>
- Giec, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf
- Gliessman S., 2016. Transforming food systems with agroecology, *Agroecol. Sust. Food*. 40: 3, 187-189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>
- Hrabanski M., 2020. Une climatisation des enjeux agricoles par la science? Les controverses relatives à la climate-smart agriculture. *Critique internationale*, (1), 189-208.
- Hrabanski M., Le Coq J.-F., 2022. Climatisation of agricultural issues in the international agenda through three competing epistemic communities: Climate-smart agriculture, agroecology, and nature-based solutions, *Environmental Science & Policy*, 127: 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.022>
- Jules J., Paul B., Adam M., Andrieu N., 2023. Co-conception avec les producteurs de stratégies d'adaptation au changement climatique : le cas des exploitations agricoles en Haïti, *Cahiers Agricultures*, 3227. <https://doi.org/10.1051/cagri/2023020>
- Lipper L., Thornton P., Campbell B.M., Baedeker T., Braimoh A., Bwalya M., et al., 2014. Climate-Smart Agriculture for Food Security. *Nature Climate Change*, 4 (12): 1068-72. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Mockshell J., Kamanda J., 2018. Beyond the agroecological and sustainable agricultural intensification debate: is blended sustainability the way forward? *International Journal of Agricultural Sustainability*. 16(2): 127-159.
- Osorio-García M., Paz L., Howland F., Ortega L.A., Acosta-Alba I., Arenas L., et al., 2019. Can an innovation platform support a local process of climate-smart agriculture implementation? A case study in Cauca, Colombia. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44:3, 378-411. <https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1629373>
- Pimbert M., 2015. Agroecology as an Alternative Vision to Conventional Development and Climate-Smart Agriculture. *Development*, 58: 286-98. <https://doi.org/10.1057/s41301-016-0013-5>
- Quintero C., Arce A., Andrieu N., 2024. Evidence of agroecology's contribution to mitigation, adaptation, and resilience under climate variability and change in Latin America. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48 (2): 228-252. <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2273835>
- Saj S., Torquebiau E., Hainzelin E., Pages J., Maraun F., 2017. The way forward: An agroecological perspective for Climate-Smart Agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 250: 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.003>
- Scherr S.J., Shames S., Friedman R., 2012. From climate-smart agriculture to climate-smart landscapes. *Agric & Food Secur.* 1, 12. <http://doi.org/10.1186/2048-7010-1-12>
- Selbonne S., Guindé L., Belmadani A., Bonine C., Causeret F.L., Duval M., et al., 2022. Designing scenarios for upscaling climate-smart agriculture on a small tropical island. *Agricultural Systems*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103408>
- Soterroni A.C., Império M., Scarabello M.C., Seddon N., Obersteiner M., Rochedo P.R.R., et al., 2023. Nature-based solutions are critical for putting Brazil on track towards net-zero emissions by 2050, *Global Change Biology*, 1-17. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.16984>
- Tham-Agyekum E.K., Ntem S., Sarbah E., Anno-Baah K., Asiedu P., et al., 2023. Resilience against climate variability: The application of nature based solutions by cocoa farmers in Ghana. *Environmental and Sustainability Indicators*, Volume 20. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100310>
- Tittonell P., 2020. Assessing resilience and adaptability in agroecological transitions. *Agricultural Systems*, 184: 102862. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102862>
- Torquebiau E., Rosenzweig C., Chatrchyan A.M., Andrieu N., Khosla R., 2018. Identifying Climate-smart agriculture research needs. *Cahiers Agricultures*, 27(2), e26001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018010>
- Wezel A., Herren B.G., Kerr R.B., Barrios E., Gonçalves A.L.R., Sinclair F., 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>

Chapitre 4

Atlas des agricultures du monde et des systèmes alimentaires face au changement climatique

*Vincent Blanfort¹, Julien Demenois¹, Marie Hrabanski¹, Nicolas Viovy^{2,5},
Jacques André Ndione², Moussa Waongo², Maguette Kaire², Lilian Blanc³,
Sylvain Schmitt³, Séverine Bouard⁴, Catherine Sabinot⁴, Pierre-François Duyck⁴,
Philippe Birnbaum⁴, Audrey Leopold⁴, Julien Drouin⁴, Fabian Carriconde⁴,
Laurent L'Huillier⁴, Christophe Menkès⁴*

¹ Atlas ; ² Afrique ; ³ Amérique centrale et du Sud ; ⁴ Petits États et territoires insulaires d'Océanie ; ⁵ Europe et Amérique du Nord.

1. Introduction et méthodes

Vincent Blanfort, Julien Demenois, Marie Hrabanski

L'atlas présenté dans cet ouvrage analyse les enjeux du changement climatique pour les systèmes agri-alimentaires au prisme d'abord (1) des émissions de GES, puis (2) des impacts du changement climatique sur le secteur des terres, ensuite (3) de la question des effets du changement climatique et des enjeux d'atténuation et enfin (4) en adoptant une analyse par grandes régions.

1.1. Les émissions de GES des systèmes agri-alimentaires

Nous avons d'abord souhaité rappeler que si les systèmes agri-alimentaires sont responsables de près d'un tiers des émissions de GES (Crippa *et al.*, 2021 ; Rosenzweig *et al.*, 2020 ; Tubiello *et al.*, 2022), ce chiffre global recouvre des disparités fortes et parfois contre-intuitives comme l'illustre la figure 4.1. Celle-ci rappelle en effet que le principal continent émetteur de GES d'origine agricole est bien l'Asie avec près de 39 % de l'ensemble des GES d'origine agricole. La riziculture y génère d'importantes quantités de méthane ainsi que l'utilisation intensive d'engrais azotés. Les exportations de produits agricoles entraînent des émissions supplémentaires dues au transport. Les Amériques constituent le deuxième continent émetteur de GES (30%). Au sein de ce continent américain, les systèmes agricoles intensifs des États-Unis et du Canada (notamment tournés vers la culture du maïs et du soja) pour l'alimentation animale sont à l'origine d'une empreinte carbone élevée, qui s'explique aussi par le transport sur de longues distances de ces produits et par la forte consommation de produits transformés. En Amérique latine, 50 % à 60 % des émissions proviennent du secteur agricole, notamment au Brésil et en Argentine, grands exportateurs de bœuf et de soja.

En Afrique, l’empreinte carbone des systèmes agricoles et alimentaires, au regard de la population et de la production alimentaire, est étonnamment élevée (15 % des émissions mondiales du secteur), et s’explique principalement par le changement d’usage des terres (déforestation en Afrique centrale) et par la faible productivité de l’agriculture. Ces chiffres globaux masquent toutefois une grande diversité géographique. L’Afrique centrale est responsable de 35 % des émissions de GES liées aux systèmes alimentaires du continent, devant l’Afrique de l’Ouest, responsable de 28 % de celles-ci. L’Afrique du Nord ne représente que 12 % du total. Bien que les pratiques agricoles en Europe soient plus efficaces (13,7 % des émissions d’origine agricole) et que l’UE mette l’accent sur les politiques climatiques, l’élevage reste une source majeure d’émissions également liées à la transformation alimentaire et à ses chaînes de transport. Enfin, en Océanie, l’utilisation des terres pour le pâturage extensif est une source d’émissions, bien que la population relativement faible en limite l’impact global.

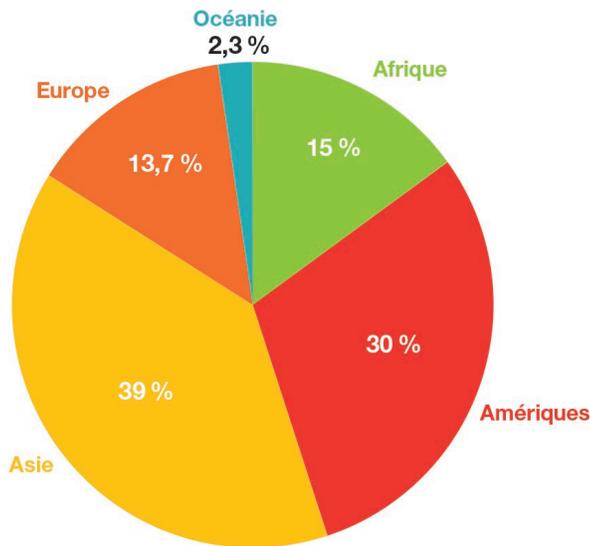


Figure 4.1. Part des émissions moyennes d’eqCO₂ (AR5) des systèmes agricoles et alimentaires par continent entre 1990 et 2021. Source : FAO (2024).

Une fois ces chiffres globaux précisés, nous avons souhaité prolonger l’analyse dans la section suivante afin d’appréhender plus précisément les différents enjeux liés aux émissions des systèmes agri-alimentaires. Les dix premières cartes proposées (cartes 1 à 10) sont issues de la base de données FAOSTAT (FAO, 2024) et représentent la moyenne des émissions de la période 1990-2021 par pays. Elles visent à préciser les enjeux liés aux émissions du secteur agri-alimentaire (des étapes de préproduction, aux étapes de production et de postproduction) en utilisant des variables différentes (émissions par pays, par habitant, à chacune des étapes du système agri-alimentaire, etc.).

Les émissions proviennent en effet de multiples sources (encadré 4.1) et varient en fonction des facteurs biophysiques, biogéographiques, des systèmes de production, des pratiques agricoles, des types d’aliments produits et consommés et des systèmes de gestion des déchets. Comme le rappelle le graphique de la FAO ci-dessous

(figure 4.2), la moitié des émissions est imputable aux activités de production au sein de la ferme (*farm gate*). Additionnées aux émissions de GES liées au changement d'utilisation des terres, les émissions sur les terres agricoles produisent près des deux tiers des émissions des systèmes agri-alimentaires. Les activités de préproduction et de postproduction constituent toutefois une part croissante des émissions de ces systèmes.

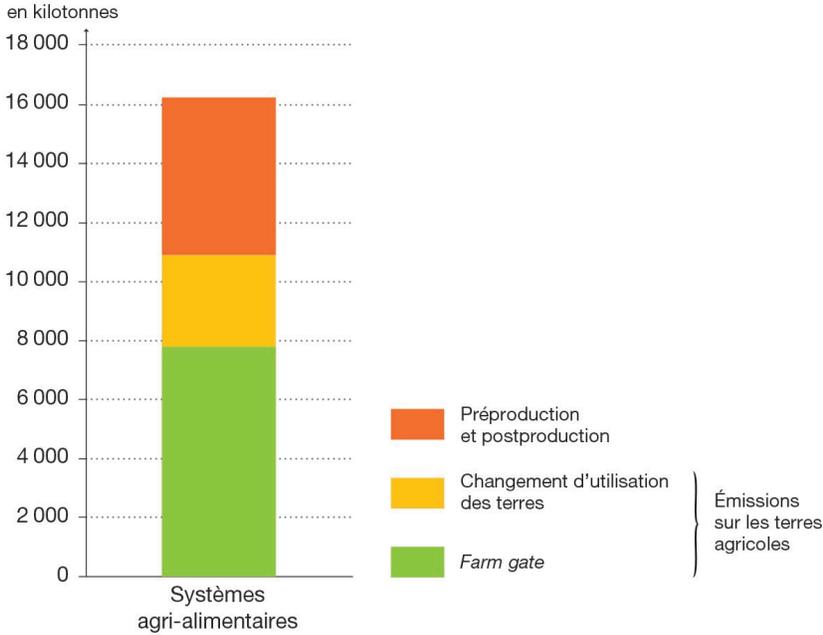


Figure 4.2. Moyennes des émissions de CO₂ par secteur (en kt eqCO₂), entre 1990 et 2021.
Source : FAO (2024).

Les catégories utilisées pour distinguer les émissions produites par le changement d'utilisation des terres, les émissions produites à l'échelle de la ferme ou encore les émissions relatives aux étapes de préproduction et de postproduction sont issues des découpages utilisés par la FAO (voir chapitre introductif, tableau 0.1).

1.2. Les impacts du changement climatique sur le secteur des terres

La section suivante, portant sur les impacts du changement climatique sur le secteur des terres, propose par le biais de la carte 11 construite à partir du rapport 2023 du Giec d'appréhender plus précisément les impacts du changement climatique sur la productivité agricole et sur les vulnérabilités climatiques.

1.3. Le stockage du carbone

Dans la section suivante, c'est la question du carbone, de son stockage, de ses flux et de sa séquestration par le secteur des terres qui est abordée au travers de six cartes distinctes (cartes 12 à 17), réalisées à partir des données du Partenariat mondial pour les sols, des plateformes Impact4Soil et Global Forest Watch.

Encadré 4.1. Types de GES et potentiels de réchauffement global

La tonne équivalent CO_2 (eqCO_2) est une unité introduite dans l'AR1 du Giec (IPCC, 1990) permettant de cumuler, après conversion, les émissions des différents gaz à effet de serre (GES).

Cette unité se fonde sur le potentiel de réchauffement global (PRG) qui est un indice de comparaison associé à un GES, qui quantifie sa contribution marginale au réchauffement climatique comparativement à celle du dioxyde de carbone (CO_2), cela sur une certaine période choisie. En d'autres termes, le PRG d'un gaz est le rapport entre les effets causés par la libération en début de période d'une masse donnée de ce gaz et ceux causés par la même masse de dioxyde de carbone (CO_2). Par définition, le PRG du CO_2 est donc toujours égal à 1. Les effets respectifs sont volontairement calculés sur une période choisie au-delà de laquelle les effets résiduels sont ignorés. La période la plus fréquemment utilisée est celle de cent ans. On parle alors de PRG100.

D'autres gaz, comme le méthane (CH_4) ou le protoxyde d'azote (N_2O), ont un PRG beaucoup plus élevé que celui du CO_2 , car ils sont plus efficaces pour piéger la chaleur dans l'atmosphère, même s'ils y sont moins abondants :

- le méthane (CH_4) : PRG \approx 28 fois plus élevé que celui du CO_2 sur cent ans (selon le 6^e rapport du Giec). En d'autres termes, l'émission d'une tonne de CH_4 équivaut à l'émission de 28 tonnes de CO_2 . Par rapport aux principaux GES, le CH_4 a une durée de vie dans l'atmosphère courte. Ainsi, dans son 6^e rapport d'évaluation (2021), le Giec l'estime à 11,8 ans ;
- le protoxyde d'azote (N_2O) : PRG \approx 273 fois plus élevé que celui du CO_2 sur cent ans (selon le 6^e rapport du Giec). En d'autres termes, l'émission d'une tonne de N_2O équivaut à l'émission de 273 tonnes de CO_2 . Le N_2O a une durée de vie longue dans l'atmosphère, le Giec l'estime à 109 ans.

Par ailleurs, les émissions de GES peuvent être exprimées en kilotonnes (kt), en mégatonnes (Mt ou million de tonnes), en gigatonnes (Gt ou milliard de tonnes), voire en pétagrammes (Pg) équivalents à des Gt.

1.4. Évolution et impacts du changement climatique sur le secteur des terres par continent

Enfin, dans la dernière section de ce chapitre, six analyses à l'échelle des continents sont proposées. Pour l'Afrique, l'Asie du Sud-Est, l'Amérique centrale et du Sud, les petits États et territoires insulaires d'Océanie, l'Europe et l'Amérique du Nord, l'atlas analyse les évolutions passées, actuelles et futures des paramètres climatiques (température, précipitations, occurrence des feux, niveau des mers). Il aborde aussi très synthétiquement les conséquences sur l'agriculture, les forêts, l'élevage ou encore sur les ressources halieutiques. On comprend alors que si l'ensemble des continents est affecté par une hausse globale des températures, des territoires au sein de ces continents seront impactés plus durement que d'autres, et les productions agricoles qui s'y trouvent également.

2. Atlas des émissions de gaz à effet de serre des systèmes agri-alimentaires

Marie Hrabanski, Vincent Blanfort, Julien Demenois

2.1. Carte des émissions du système agri-alimentaire par pays entre 2019 et 2021

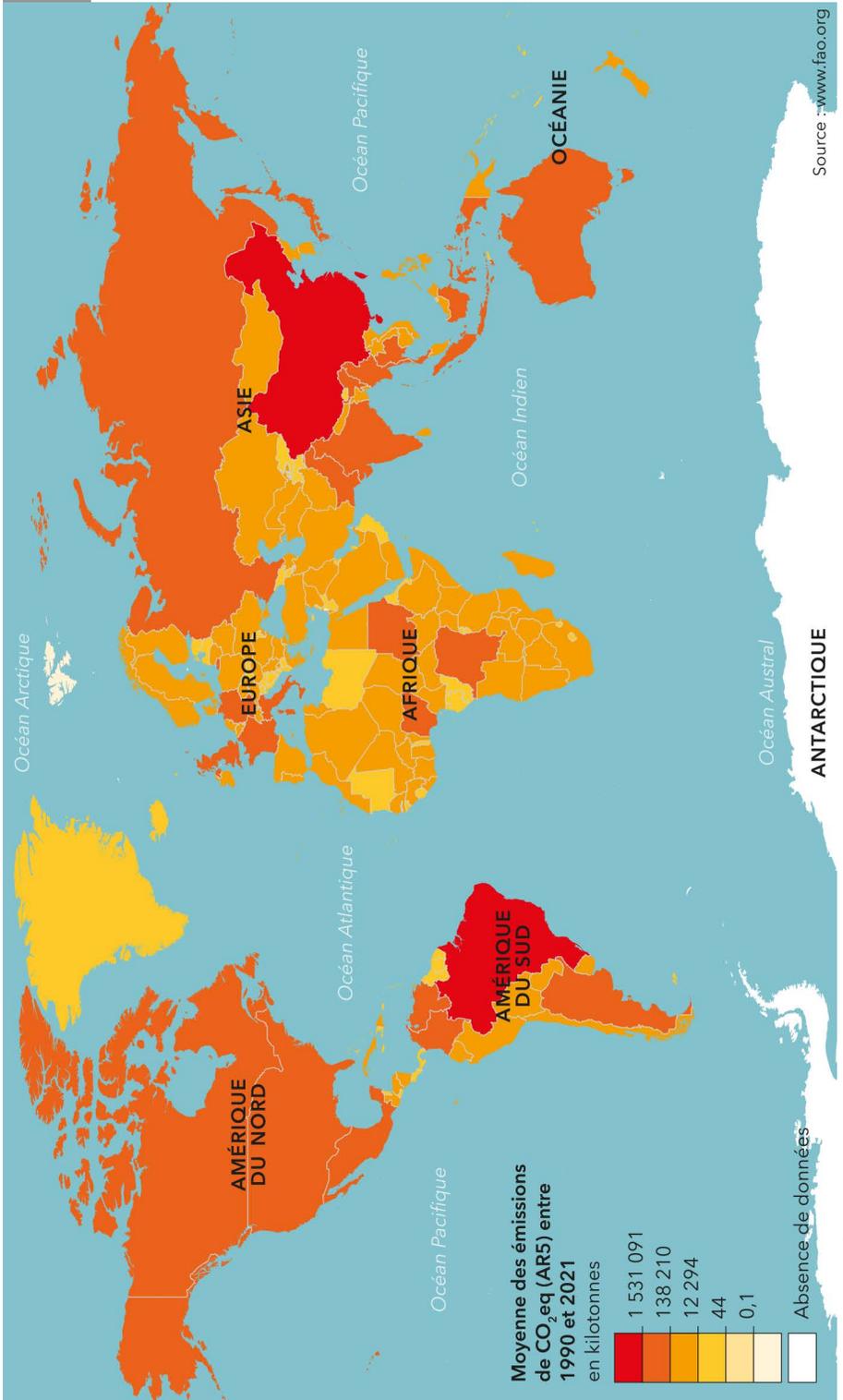
Les émissions du secteur agri-alimentaire renvoient à trois postes différents : les émissions émises à l'échelle de la parcelle (*farm gate*), les émissions liées au changement d'utilisation des terres et les émissions liées aux activités de préproduction et de postproduction. Cette représentation des émissions de GES du secteur agri-alimentaire regroupe le cumul de tous les GES par pays exprimé en effectuant la moyenne de la période 1990-2021 (carte 1). On constate de fortes disparités entre les pays industrialisés et les autres. Les systèmes agri-alimentaires chinois et brésiliens sont les plus émetteurs de GES. Les émissions produites par la Chine sont particulièrement élevées en raison de sa production agricole intensive (premier producteur de riz au monde) et de son industrie de l'élevage (40 % des émissions agricoles). Au Brésil, c'est également la production agro-alimentaire intensive (environ 70 % des émissions totales du Brésil) et la conversion de vastes zones de forêts en terres agricoles qui expliquent ces fortes émissions.

En deuxième position viennent l'Indonésie, les États-Unis, l'Union européenne (UE), l'Inde, la Russie et l'Australie. Les systèmes agri-alimentaires de ces pays (ou groupe de pays) sont également particulièrement émetteurs, du fait du volume de leurs productions agricoles et des secteurs associés.

En Afrique, la situation est variable, mais la plupart des pays sont dans des niveaux d'émission moyens à faibles. Toutefois, l'Afrique était à l'origine, en 2019, de 17 % (15 % pour l'Afrique subsaharienne et 2 % pour l'Afrique du Nord) des émissions mondiales de GES liées aux systèmes agri-alimentaires, soit plus que les États-Unis (9 %) et l'UE (7 %). Toutefois, on observe de grandes disparités d'une région ou même d'un pays à l'autre. En Afrique subsaharienne, ces systèmes émettent, par habitant, un peu moins de GES (2,3 t eqCO₂) que dans l'UE (2,6 t eqCO₂). Mais la production alimentaire par habitant y est aussi beaucoup moins élevée (ce qui explique en partie l'insécurité alimentaire de la sous-région). En proportion de la valeur de la production alimentaire, les quantités de GES émis, au sud du Sahara, sont donc plus de deux fois plus élevées que dans l'UE. Elles sont même cinq fois supérieures si l'on tient compte du changement d'utilisation des terres (déforestation au Nigeria et dans le bassin du Congo et mise en culture des zones de pâturages).

Cette première analyse globale est complétée par la comparaison des émissions mondiales par grand secteur (figure 4.3). Les activités d'élevage (chapitres 10, 16 et 24), et la conversion nette des forêts (chapitre 9) s'avèrent largement les plus impactantes, mais d'autres secteurs peuvent également augmenter significativement ces émissions si on cumule les sous-secteurs qui les concernent (exemple des cultures avec la fabrication d'engrais, la consommation d'énergie, etc.).

Carte 1



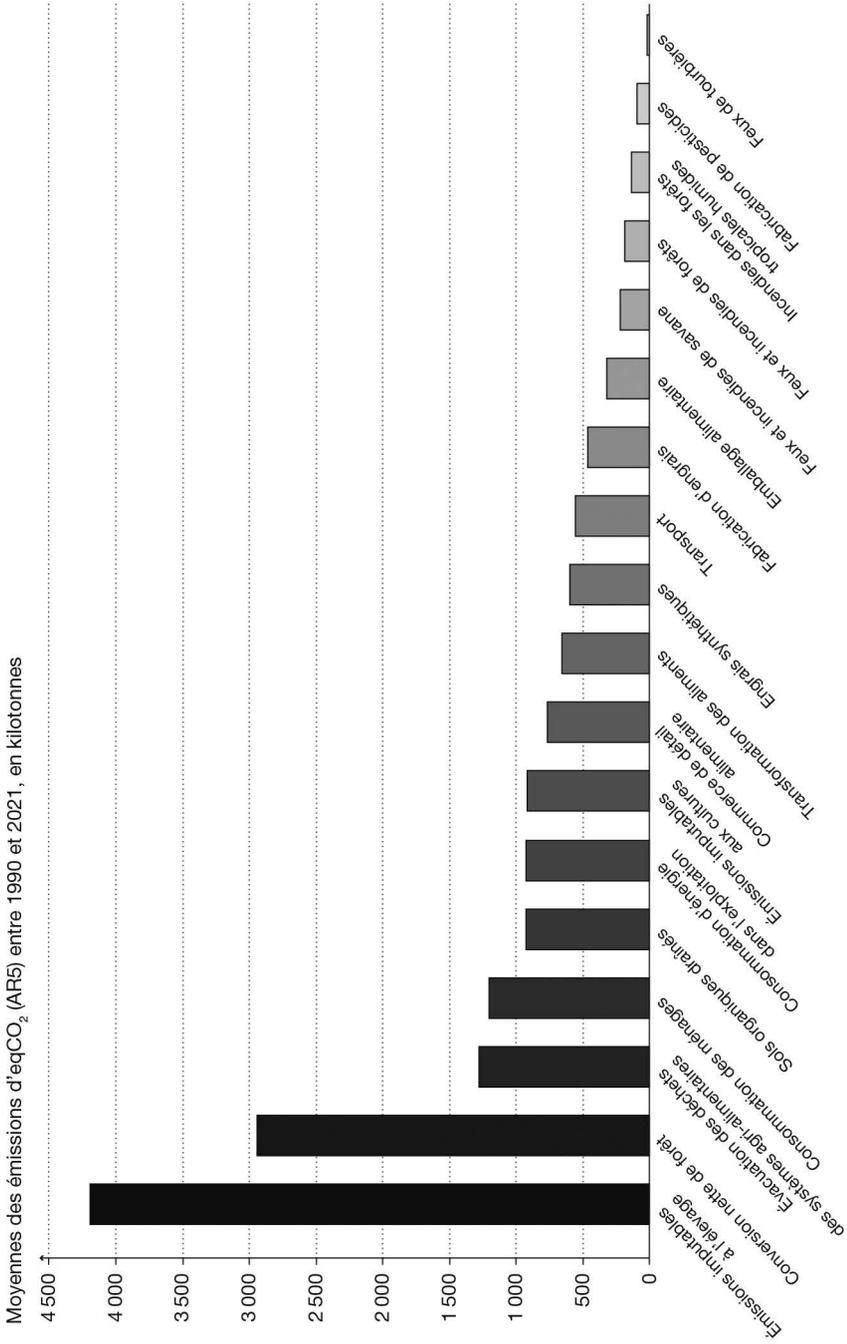


Figure 4.3. Comparaison des émissions mondiales par grand secteur. Source : www.fao.org.

2.2. Carte des émissions du secteur agro-alimentaire par habitant

Il est essentiel de relativiser les chiffres des émissions nationales au prisme du nombre d'habitants de chaque pays. La carte des émissions du secteur agro-alimentaire par habitant (carte 2) exprime ainsi une tout autre vision que la précédente : les pays les plus émetteurs en volume ne sont plus en tête de classement. L'Amérique du Sud, le Canada, l'Europe du Nord présentent encore un ratio élevé en raison de l'impact de l'expansion agricole et de l'exploitation forestière au détriment des forêts. L'Europe de l'Ouest, l'Asie et l'Afrique présentent des scores par habitant plus faibles que leur volume d'émission brut du fait de leur densité de population élevée.

Quelques pays dans la moyenne basse des émissions nationales se trouvent propulsés en tête de classement en raison d'une très faible population. On note en particulier la Mongolie, du fait d'un ratio du nombre de têtes de bétail par habitant très élevé. Pour les mêmes raisons, le Botswana et la Namibie se caractérisent par un secteur agricole (notamment l'élevage) qui représente 10 % à 15 % de leurs émissions totales de GES.

2.3. Carte et graphique des émissions des terres agricoles

En référence à la figure 4.2 (voir l'introduction de ce chapitre), la définition synthétique des terres agricoles intègre : les émissions émises aux portes de la ferme (de l'entrée à la sortie de celle-ci, sans inclure les étapes antérieures et ultérieures) en excluant donc les processus de pré-récolte et de post-récolte ; et le changement d'utilisation des terres.

Les émissions de ce secteur reflètent donc les impacts des activités de production à la ferme au sens stricte cumulés avec les changements d'usage des sols visant l'extension de surfaces agricoles.

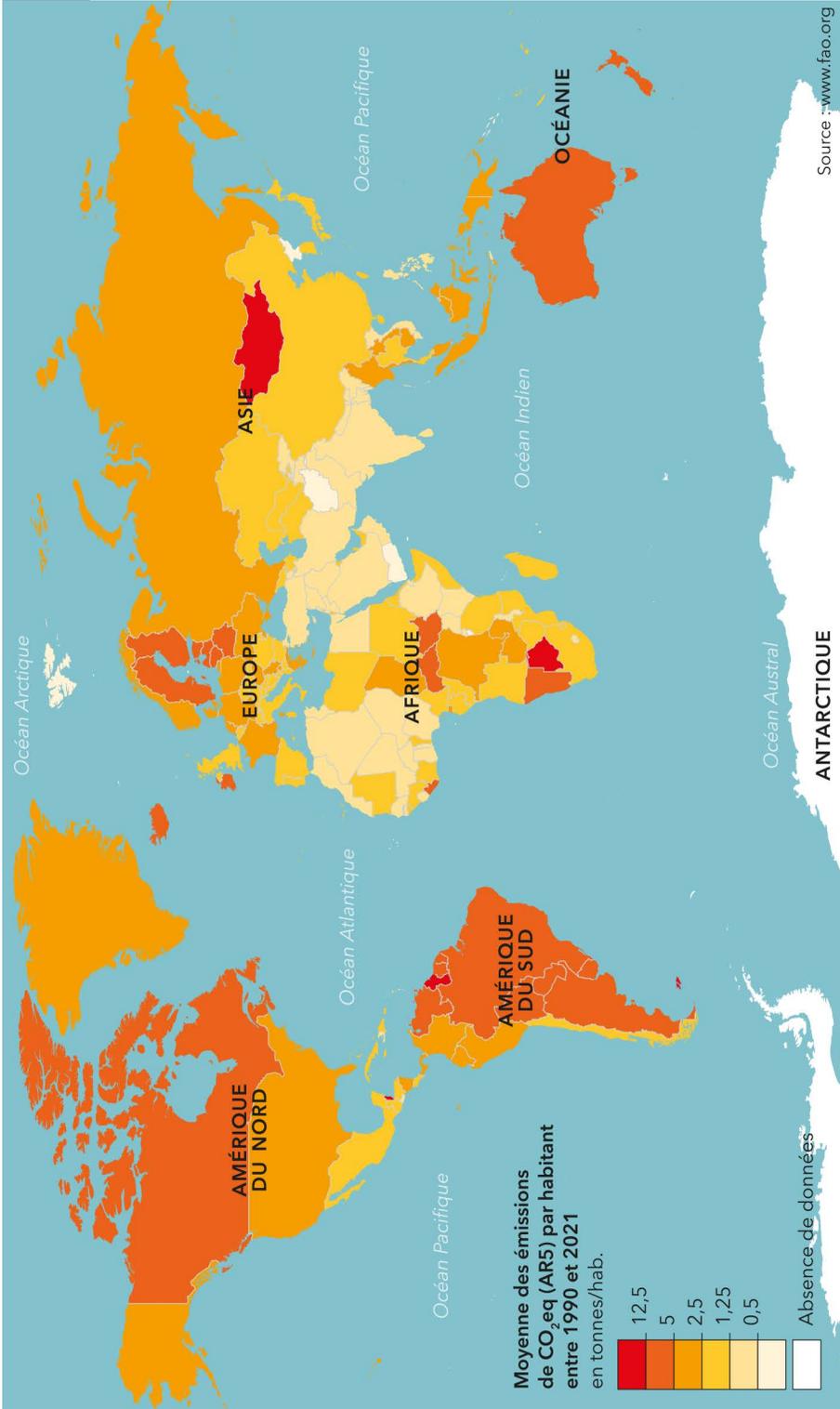
Selon la FAO, les terres agricoles comprennent les zones utilisées pour la culture, pour les pâturages et pour les activités agricoles connexes. Elles incluent les terres arables (cultures temporaires, terres en jachère), les surfaces affectées aux cultures pérennes (arbres fruitiers, plantations) et les prairies permanentes utilisées pour l'élevage. Ces terres peuvent varier selon les systèmes agricoles et les conditions locales, englobant aussi les ressources naturelles essentielles à la productivité agricole, comme les sols, la végétation et les ressources en eau.

Cette définition reflète une approche intégrée, prenant en compte non seulement les sols, mais aussi les facteurs environnementaux et socio-économiques liés à l'utilisation durable des terres. Les terres agricoles jouent un rôle clé dans l'alimentation mondiale, la conservation des écosystèmes et le développement rural.

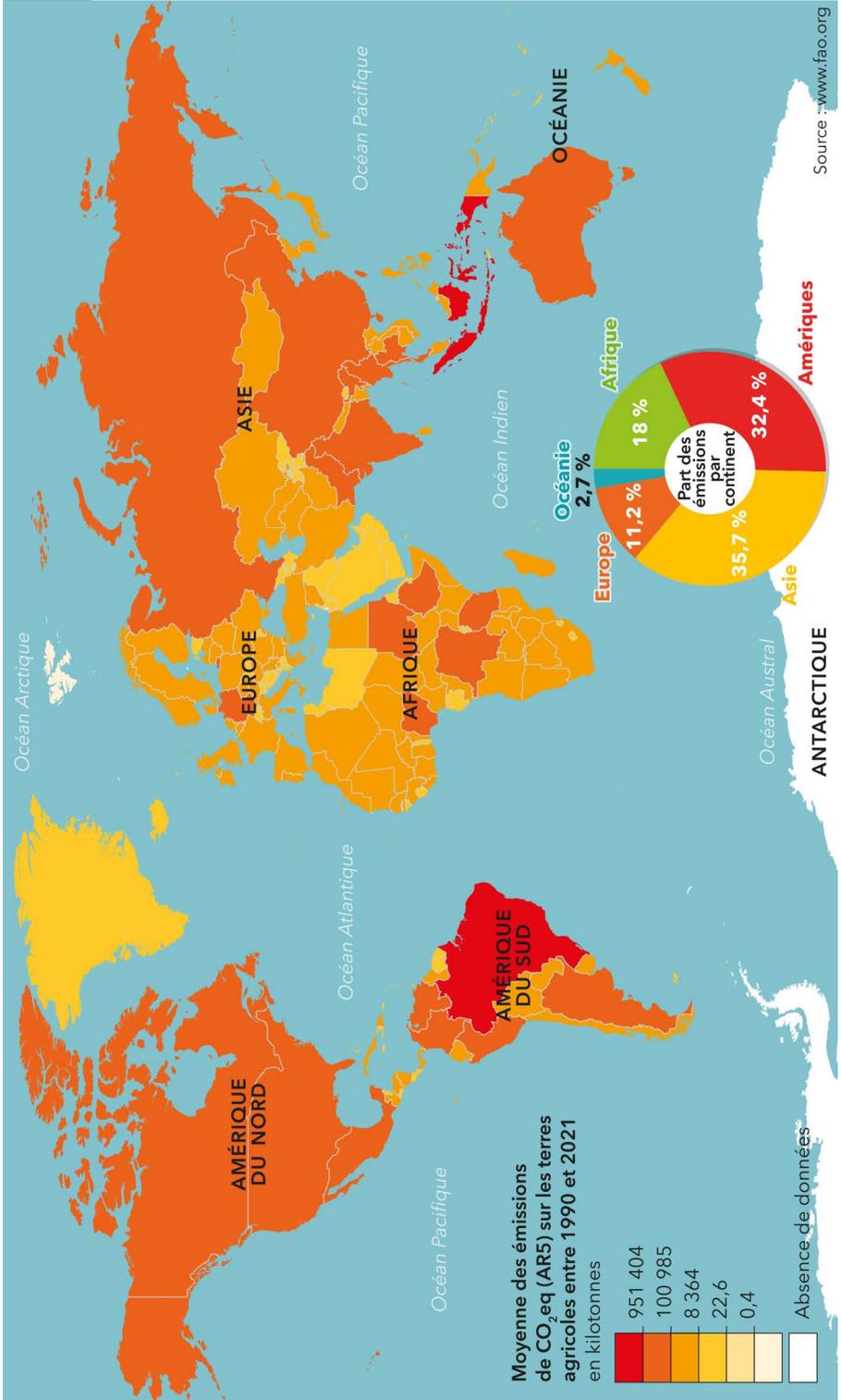
La région Asie contribue à elle seule à près de 36 % des émissions des terres agricoles, principalement du fait des émissions de méthane, en raison de la culture du riz et de l'élevage intensif (cartes 3 et 4). On note des émissions très élevées en Asie du Sud-Est insulaire liées à la déforestation pour la production d'huile de palme.

Elle est suivie de près par le continent américain avec un fort impact de la déforestation pour les cultures et pour les pâturages en Amazonie. Les États-Unis et le Canada disposent de systèmes agricoles hautement mécanisés, ce qui entraîne des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de carburants fossiles. La production de viande bovine, porcine et de volaille est intensive, ce qui augmente les émissions de méthane associées à l'utilisation intensive d'engrais synthétiques pour les grandes cultures comme le maïs, le soja et le blé.

Carte 2

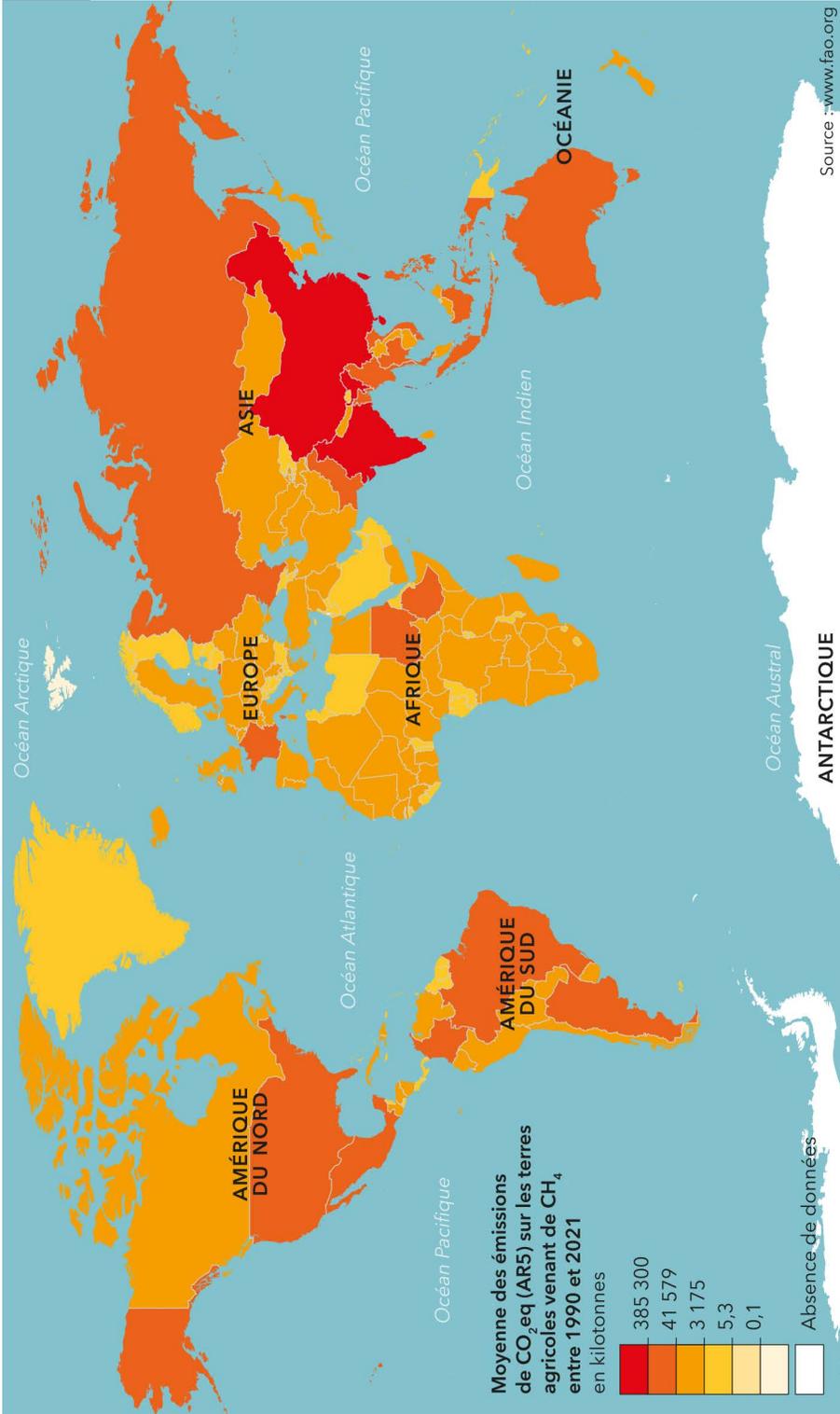


Carte 3



© Légendes Cartographie

Carte 4



L'Afrique avec 18% des émissions se caractérise par des tendances régionales. En Afrique de l'Ouest et de l'Est, les activités d'élevage sont une source de méthane et les pratiques agricoles extensives telles que la culture sur brûlis, une source majeure de N_2O et de CO_2 . En Afrique de l'Est, l'élevage est dominant, avec des émissions élevées de méthane dues à la fermentation entérique. La déforestation en Afrique centrale est une source importante d'émissions. Les monocultures et l'utilisation accrue des engrais en Afrique australe contribuent aux émissions de protoxyde d'azote (carte 5).

L'analyse des émissions de gaz à effet de serre (GES) des terres agricoles en Europe (11,2%) reflète des dynamiques spécifiques à cette région industrialisée et technologiquement avancée en particulier en Europe du Nord. L'utilisation intensive des terres et une forte mécanisation sont contrôlées par des politiques de durabilité avancées (PAC, politique agricole commune) et des pratiques telles que l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation.

L'Europe de l'Est est encore dans une transition postsoviétique caractérisée par une augmentation progressive de l'intensité agricole. Les pratiques intensives dans les cultures horticoles et viticoles peuvent être associées à des émissions élevées d'intrants en Europe du Sud.

2.4. Carte et graphique des émissions imputables aux cultures dans le monde, entre 1990 et 2021

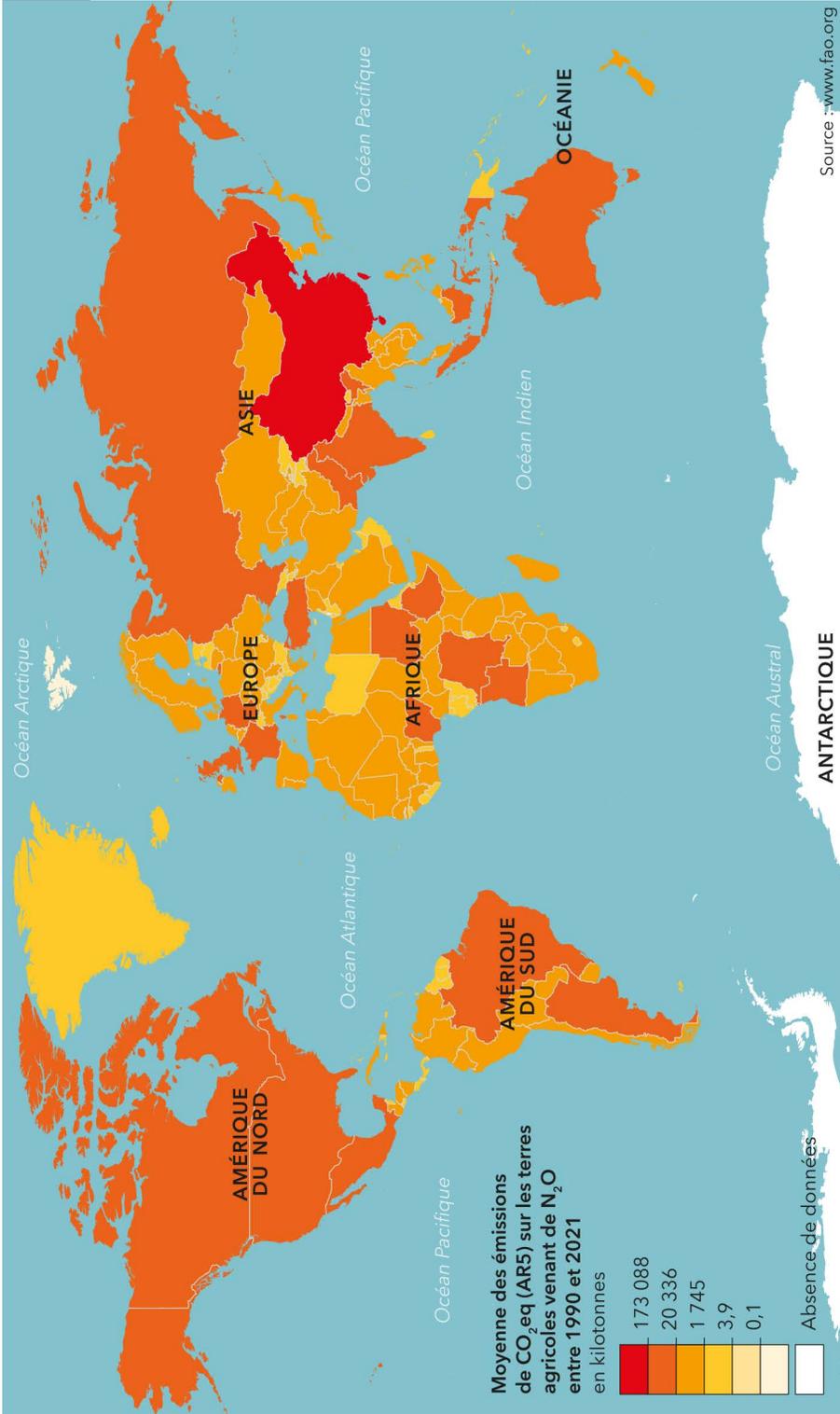
La carte 6 analyse les émissions de GES produites entre 1990 et 2021 par les cultures agricoles, et notamment par les productions suivantes : blé, orge, avoine, soja, pomme de terre, riz, maïs, canne à sucre, millet, sorgho, haricot sec, seigle.

Près de 80% des émissions de GES issues des cultures sont imputables à l'Asie. L'ensemble des types de GES étant pris en compte, les émissions de méthane issues de la culture du riz expliquent en partie ce chiffre particulièrement élevé. Les Amériques constituent le deuxième continent émetteur, avec 10% des émissions (soja, maïs, blé). L'Europe et l'Afrique sont respectivement responsables d'environ 5% des émissions de GES issues des cultures; ces émissions rapportées au nombre d'habitants sur chacun de ces deux continents permettent de préciser que les émissions de GES issues des cultures en Afrique sont particulièrement faibles. Enfin, seules 0,4% des émissions de GES issues des cultures sont imputables à l'Océanie.

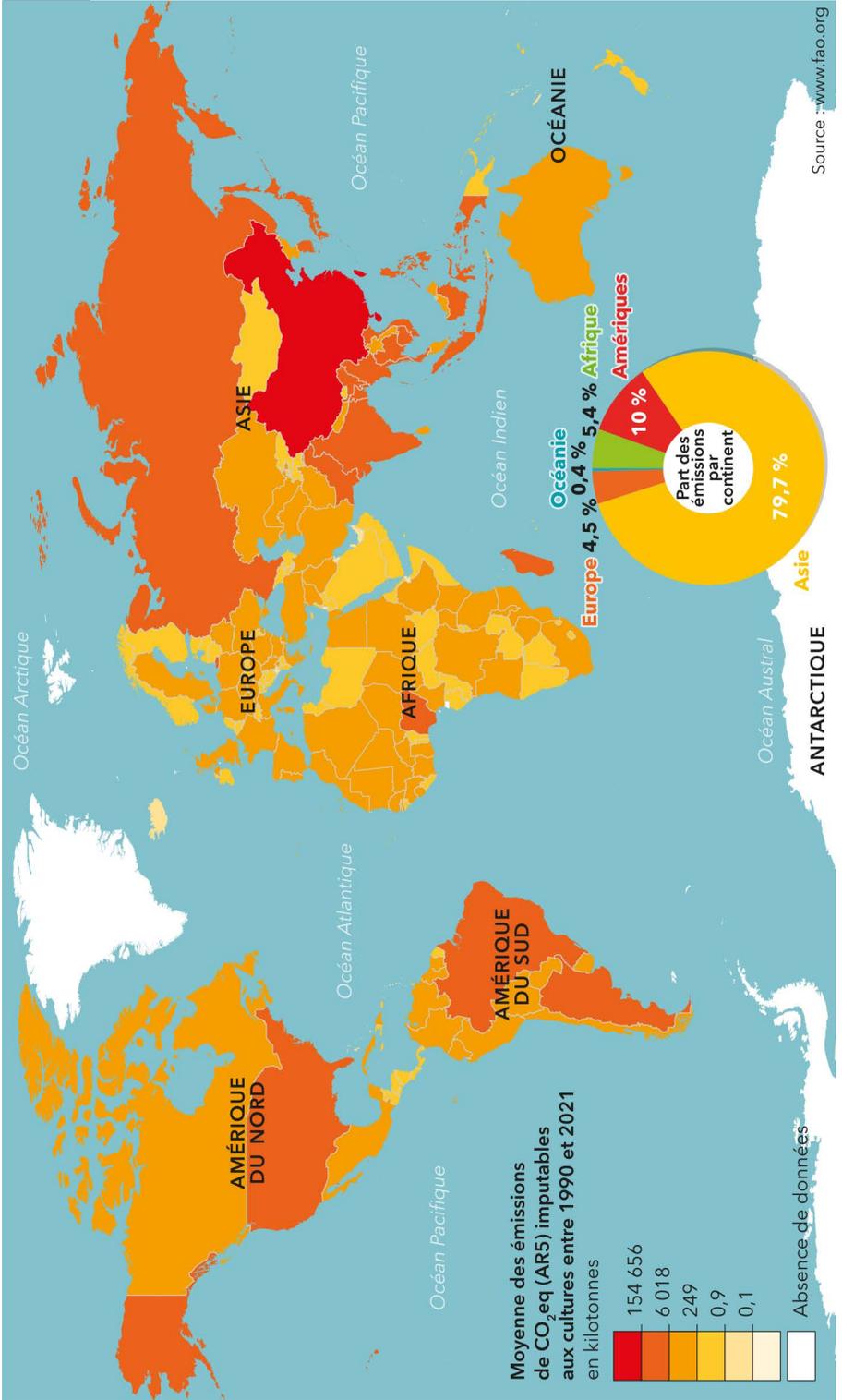
2.5. Carte et graphique des émissions imputables à l'élevage

Selon une évaluation de la FAO (2023), l'élevage représente 40% des émissions totales des systèmes agro-alimentaires, soit environ 12% des émissions de GES totales d'origine anthropique à l'échelle mondiale (voir chapitres 10 et 16). C'est le méthane (CH_4), issu principalement de la fermentation entérique des ruminants (vaches, chèvres, moutons) et de la gestion des déjections animales, qui en est la principale cause avec plus de la moitié des émissions liées aux productions animales. Il est suivi par le dioxyde de carbone (CO_2 , 31%), attribuable aux changements d'affectation des terres (déforestation pour pâturages ou cultures fourragères) ainsi qu'à la consommation d'énergie pour la production et le transport. Enfin, 15% de ces émissions sont imputables à l'oxyde nitreux (N_2O) produit par l'utilisation d'engrais et par la gestion des sols.

Carte 5



Carte 6



Au-delà de ces chiffres globaux, les émissions de GES du secteur de l'élevage sont très différentes selon les régions du monde (carte 7).

L'analyse par grande région du monde montre que ce sont l'Asie et les Amériques qui contribuent aux deux tiers des émissions mondiales. L'Asie émet un tiers des émissions en raison de la croissance rapide de la demande en produits animaux liée à l'augmentation démographique et à l'urbanisation. La Chine est ainsi le premier producteur mondial de porc et l'Inde, le premier producteur de lait au monde. Le continent américain contribue également à plus de 30 % des émissions mondiales en raison notamment des effectifs importants de ruminants (le Brésil en particulier, avec une conversion des forêts primaires en pâturage et en cultures destinées à l'alimentation animale).

En Afrique, la production animale joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire, dans les moyens de subsistance et dans l'économie, en particulier dans les zones pastorales : le continent contribue en conséquence à 15,6 % des émissions de GES mondiales. Ces émissions représentent environ 10 % des émissions totales de GES du continent. L'Europe fait quasiment jeu égal, malgré un secteur de l'élevage plus encadré au niveau des réglementations et des pratiques agricoles. Le secteur représente une part dominante des émissions agricoles en Europe estimée à plus de 70 %, soit 10 % des émissions totales de GES de l'Union européenne.

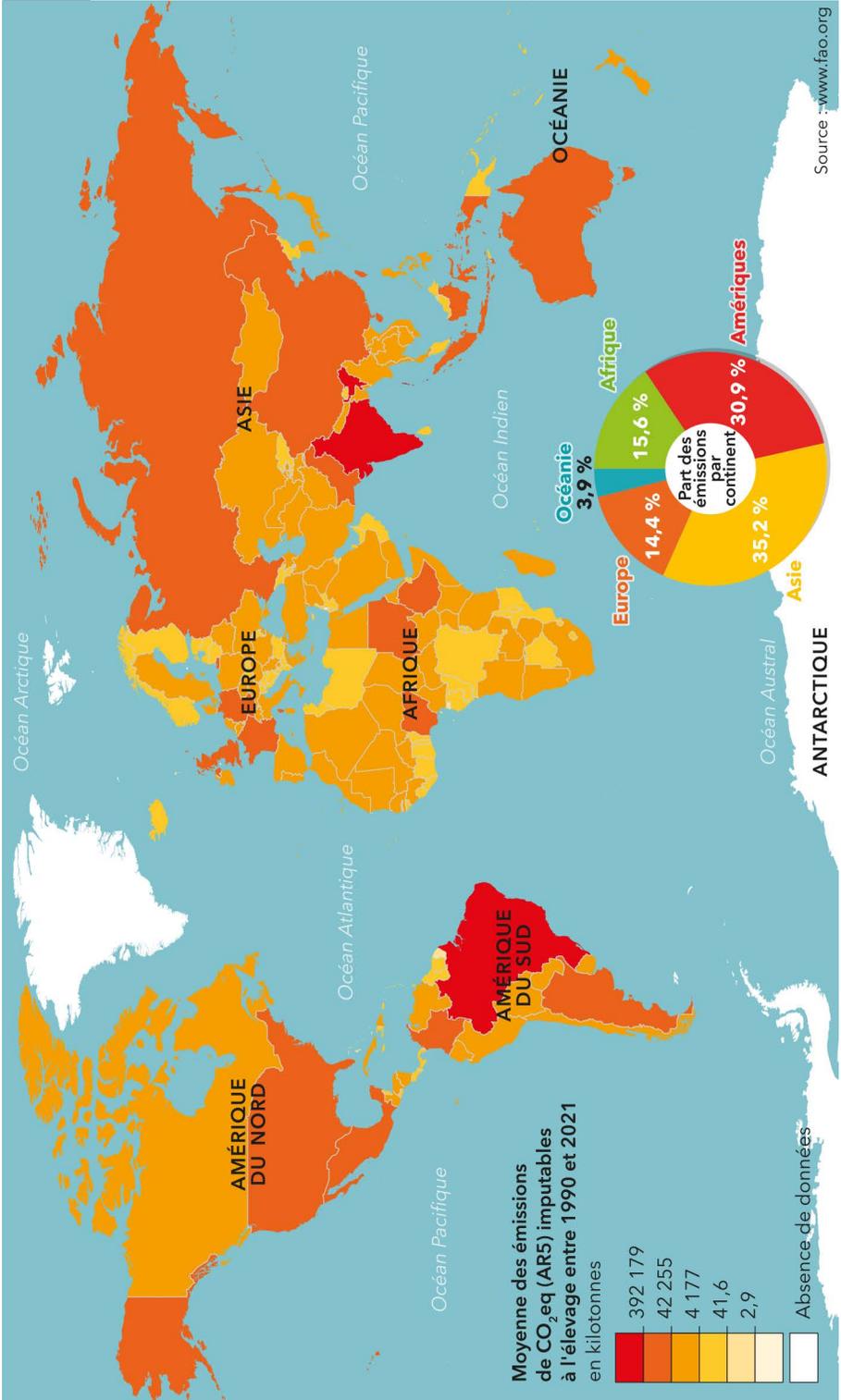
Les principales sources d'émissions liées à l'élevage sont :

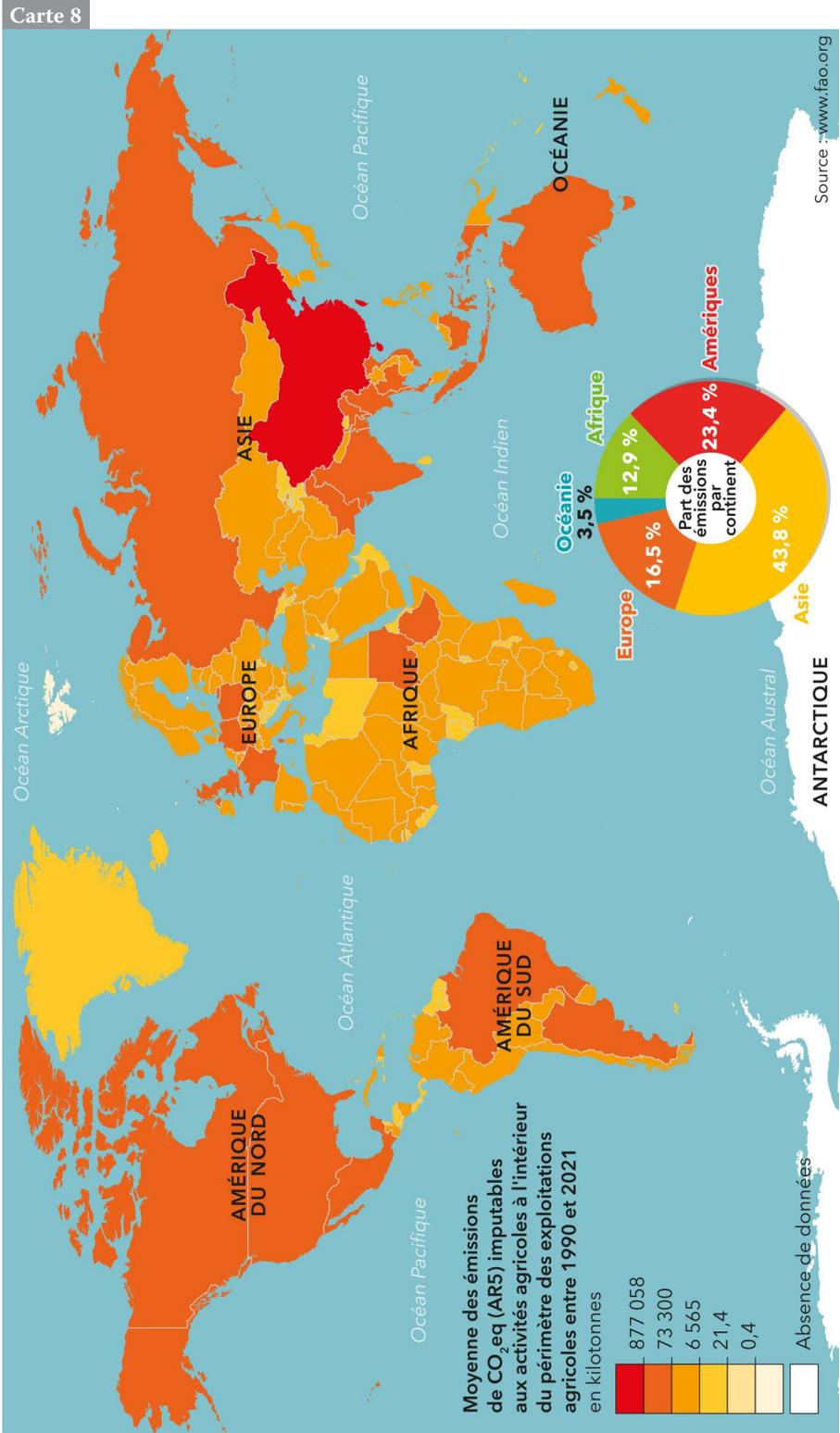
- la fermentation entérique : les ruminants (vaches, moutons, chèvres) produisent du méthane (CH_4) lors de leur digestion ;
- la gestion du fumier : les déjections animales émettent du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O) lorsqu'elles se décomposent ;
- la production d'aliments pour animaux : la culture des céréales et des fourrages utilisés pour nourrir les animaux engendre des émissions de GES (CO_2 lié à la mécanisation et à l'utilisation d'engrais synthétiques, N_2O libéré par les sols traités avec des fertilisants) ;
- le changement d'utilisation des terres : la déforestation pour créer des pâturages ou des terres cultivées pour produire des aliments pour animaux libère du CO_2 ;
- le transport et la transformation : le transport des aliments, des animaux vivants et des produits transformés contribue aux émissions de CO_2 .

2.6. Carte des émissions des productions à la ferme ou *farm gate*

Les émissions du secteur agri-alimentaire renvoient à trois postes différents : les émissions émises à l'échelle de la parcelle (*farm gate*), les émissions liées au changement d'utilisation des terres et les émissions liées aux activités de préproduction et de postproduction. La carte proposée ici (carte 8) se concentre uniquement sur les émissions produites aux étapes de préproduction et de postproduction entre 1990 et 2021. Les étapes de prérécolte renvoient notamment à la production de fertilisants et à l'irrigation, et les étapes de postrécolte aux cinq postes suivants : le transport, la transformation, la distribution, la consommation et enfin la gestion des déchets. Pour rappel, l'étude de Tubiello (2022) démontre que, depuis 2019, les processus de préproduction et de postproduction ont dépassé les processus à la ferme pour devenir la plus grande composante des émissions de GES des systèmes agri-alimentaires, comme le confirme la carte 8. Le premier pays émetteur de GES agricole à l'échelle de la parcelle est la Chine. Un second groupe de pays rassemble les grands pays producteurs agricoles tels que l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada), les grands pays

Carte 7





agricoles européens (France, Allemagne, Pologne), le Brésil et l'Argentine, et une partie de l'Asie (Inde, Indonésie), la Russie et plus étonnamment le Soudan et l'Éthiopie (en raison notamment des émissions de méthane agricole lié à l'élevage).

2.7. Émission du secteur agri-alimentaire

La carte proposée (carte 9) se base sur les mêmes secteurs que la carte 8 et se concentre uniquement sur les émissions produites aux étapes de préproduction et de postproduction émises entre 1990 et 2021. Pour rappel, depuis 2019, les émissions pendant les étapes de préproduction et de postproduction ont désormais dépassé les émissions à l'échelle de la ferme (Tubiello, 2022), comme le confirme la carte ci-dessous. Celle-ci montre que, comme à l'échelle des émissions produites à l'échelle de la parcelle, la Chine et les États-Unis sont les premiers producteurs de GES aux étapes de préproduction et de postproduction. Un second groupe de pays rassemble la plupart des pays européens (davantage de pays que lorsqu'on ne prend en compte que les émissions à l'échelle de la parcelle), ce qui s'explique notamment par le transport des produits agricoles. Le Brésil et l'Australie appartiennent également à ce second groupe, ainsi qu'une grande partie de l'Asie et la Russie. En Afrique, seul le Nigeria fait partie de ce second groupe.

2.8. Émissions de GES liées au changement d'usage des sols

Par changement d'usage des sols, on entend ici le brûlage de biomasse forestière et la conversion de terres forestières (en terres agricoles notamment). Entre 1990 et 2021, on observe ici (carte 10) que près de la moitié des émissions liées au changement d'usage des sols sont issues des Amériques, et en substance de l'Amérique latine, du fait notamment de la déforestation dans le bassin amazonien. Les émissions induites par le changement d'usage des sols sont également élevées en Asie (21,6%) et en Afrique (27%), du fait également de la déforestation en Afrique centrale et en Asie du Sud-Est, notamment en Indonésie. La période étudiée (1990-2021) explique pourquoi l'Europe fait office d'exception avec des émissions liées au changement d'usage des sols, dans la mesure où les émissions liées au changement d'usage des terres datent majoritairement du XIX^e et du XX^e siècle.

3. Carte des impacts du changement climatique sur le secteur des terres

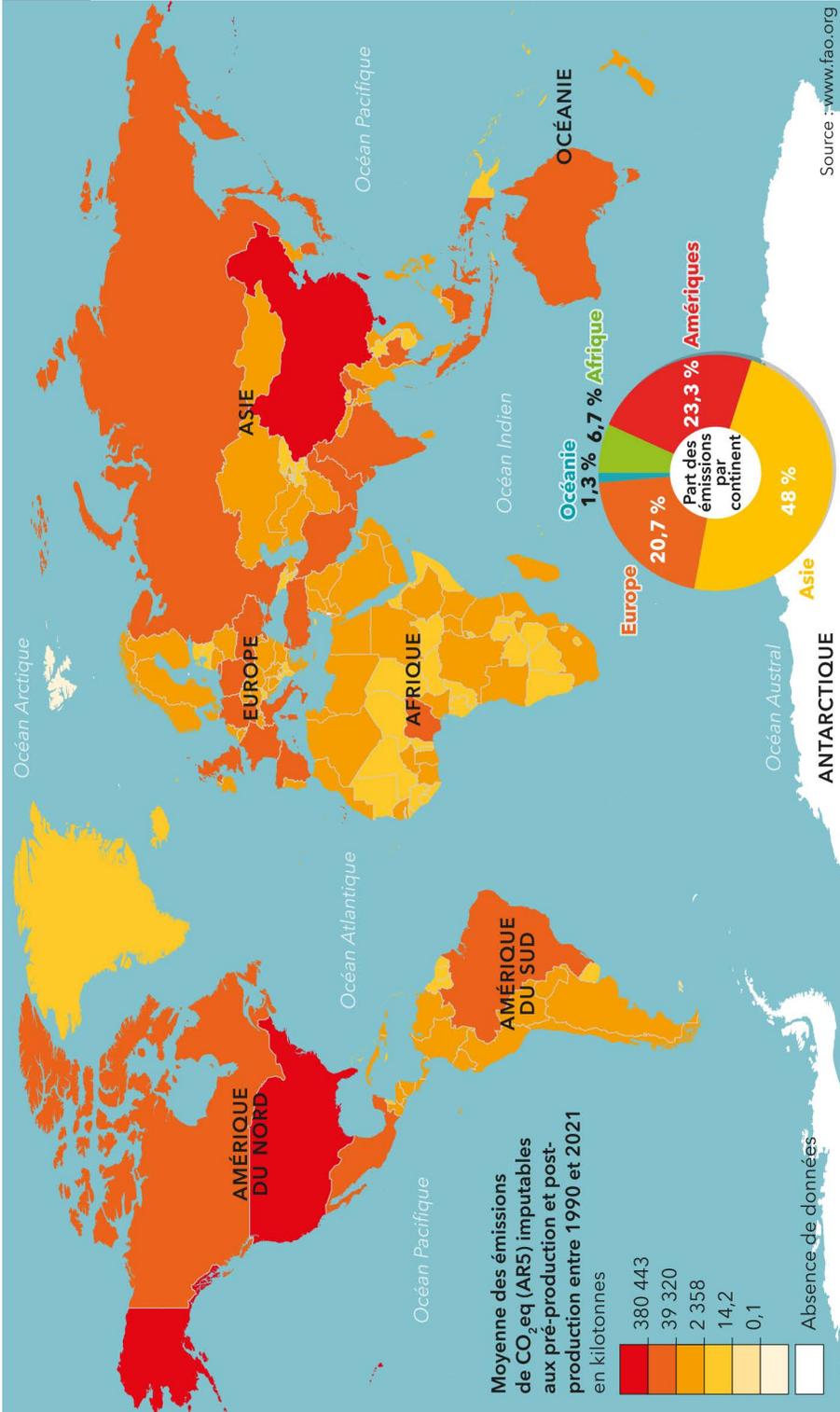
Vincent Blanfort, Marie Hrabanski, Julien Demenois

Cette carte (carte 11) a été établie à partir du rapport de synthèse du Giec paru en 2023 (AR6). Elle porte :

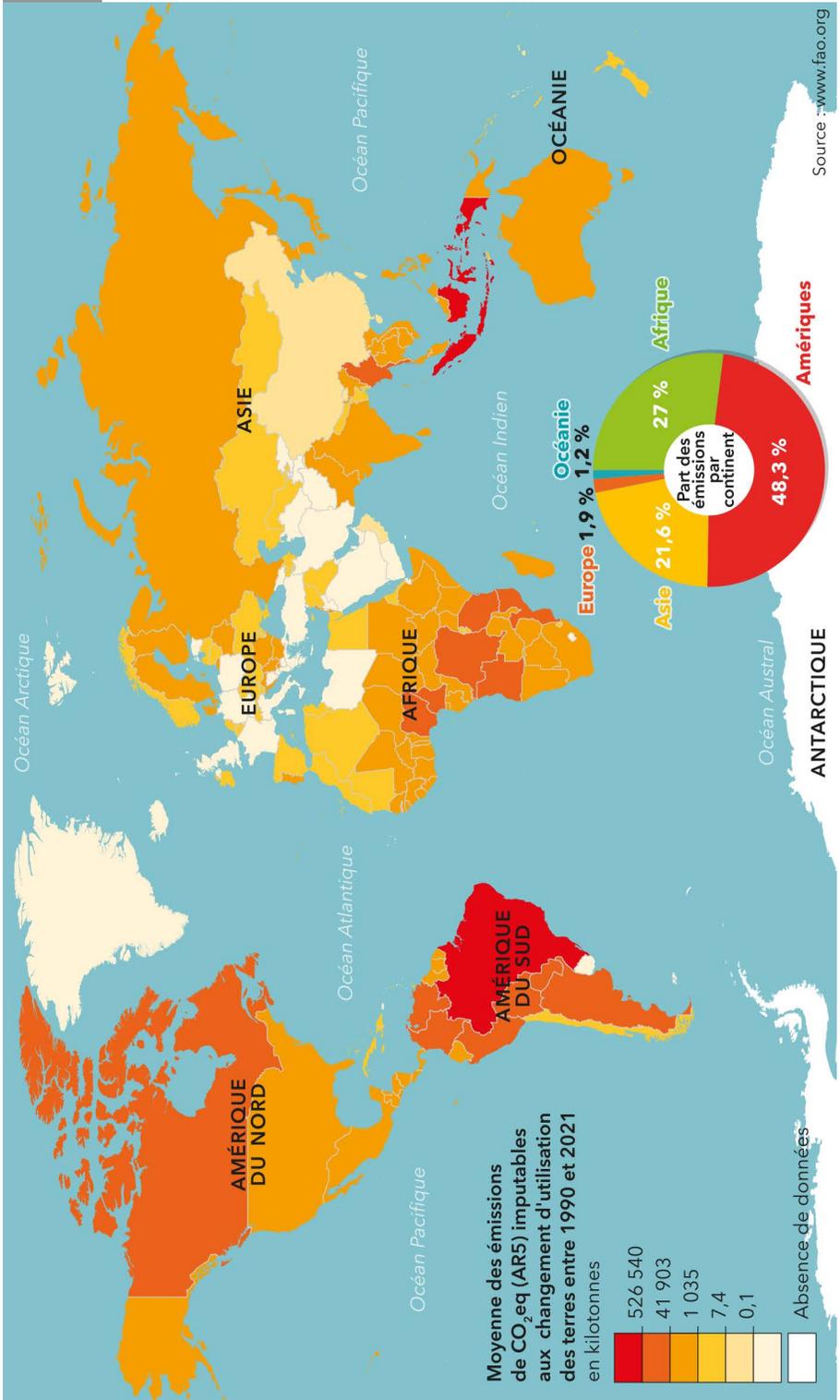
- sur les impacts attendus du changement climatique en 2050 sur la productivité agricole, forestière et halieutique (secteur forestier, élevage, cultures, pêche) ;
- sur les facteurs de vulnérabilités climatiques (zones côtières vulnérables face à l'élévation du niveau des mers et aux inondations, zones exposées à la désertification à des risques accrus d'incendies, etc.) ;
- et sur la vulnérabilité des populations côtières (régions à forte densité de population et villes menacées par la montée des eaux).

La carte souligne sans surprise l'étendue des impacts du changement climatique sur la productivité agricole et l'accentuation accrue des vulnérabilités climatiques sur de nombreuses zones de la planète.

Carte 9



Carte 10



Carte 11



Les facteurs de vulnérabilités climatiques

 Zones côtières vulnérables face à l'élévation du niveau des mers et aux inondations

 Zones avec des hausses de précipitations

 Zones exposées à la désertification

 Régions de formation et trajectoires moyennes des cyclones tropicaux

 Risque accru d'incendie

 Fonte des glaciers

 Fonte de la banquise

 Fonte du pergélisol

Impacts sur la productivité agricole, forestière et halieutique en 2050

	Hausse	Baisse
Secteur forestier		
Élevage		
Cultures		
Pêche		

Vulnérabilité des populations côtières

 Régions à forte densité de populations côtières

 Principales villes menacées par la montée de la mer

Changement climatique 2023 rapport de synthèse AR6 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).
Sources : Atlas historique de la Terre (Éditions Les Arènes).

De façon plus précise, ce qui frappe d'abord à la lecture de cette carte, c'est une baisse de la productivité attendue dans les secteurs de l'élevage et des cultures sur de nombreuses zones et sur l'ensemble des continents. Toutefois, des zones vont également être affectées positivement puisque le nord-ouest des États-Unis, le nord-ouest du Brésil, la Namibie, le Pérou et la Bolivie ou encore l'est de la Russie vont connaître une hausse de leur productivité agricole dans le secteur des cultures. Concernant l'élevage, une hausse de la productivité est aussi attendue dans le centre des États-Unis et en Europe centrale. Pour ce qui est de la pêche, la situation est très contrastée géographiquement : dans toute la zone de pêche au nord du cercle polaire arctique, on prévoit une augmentation de la productivité halieutique, tandis que celle-ci va baisser dans les zones tempérées et tropicales, notamment en Europe, sur la côte ouest de l'Afrique, dans le bassin océanien et dans la zone pacifique tempérée. Concernant la productivité forestière, on s'attend à une augmentation de la productivité en Afrique centrale et en Amazonie, au Canada et dans les pays scandinaves, tandis qu'une baisse est prévue dans l'Est des États-Unis. Au delà de ce premier constat, on remarque la multiplication des vulnérabilités climatiques, et notamment la multiplication des régions de formation des cyclones tropicaux, lesquels auront un impact sur les zones à forte densité de population côtière, et ce, tant à l'est et à l'ouest des États-Unis qu'au large de la Chine, du Japon et de l'Afrique australe ou encore dans le nord-est de l'Australie. Une multiplication des incendies est très probable sur l'ensemble des continents exceptés en Afrique. Enfin, une extension des zones exposées aux sécheresses et à la désertification est attendue.

4. Atlas du carbone des terres émergées et de ses évolutions

Julien Demenois, Vincent Blanfort, Marie Hrabanski

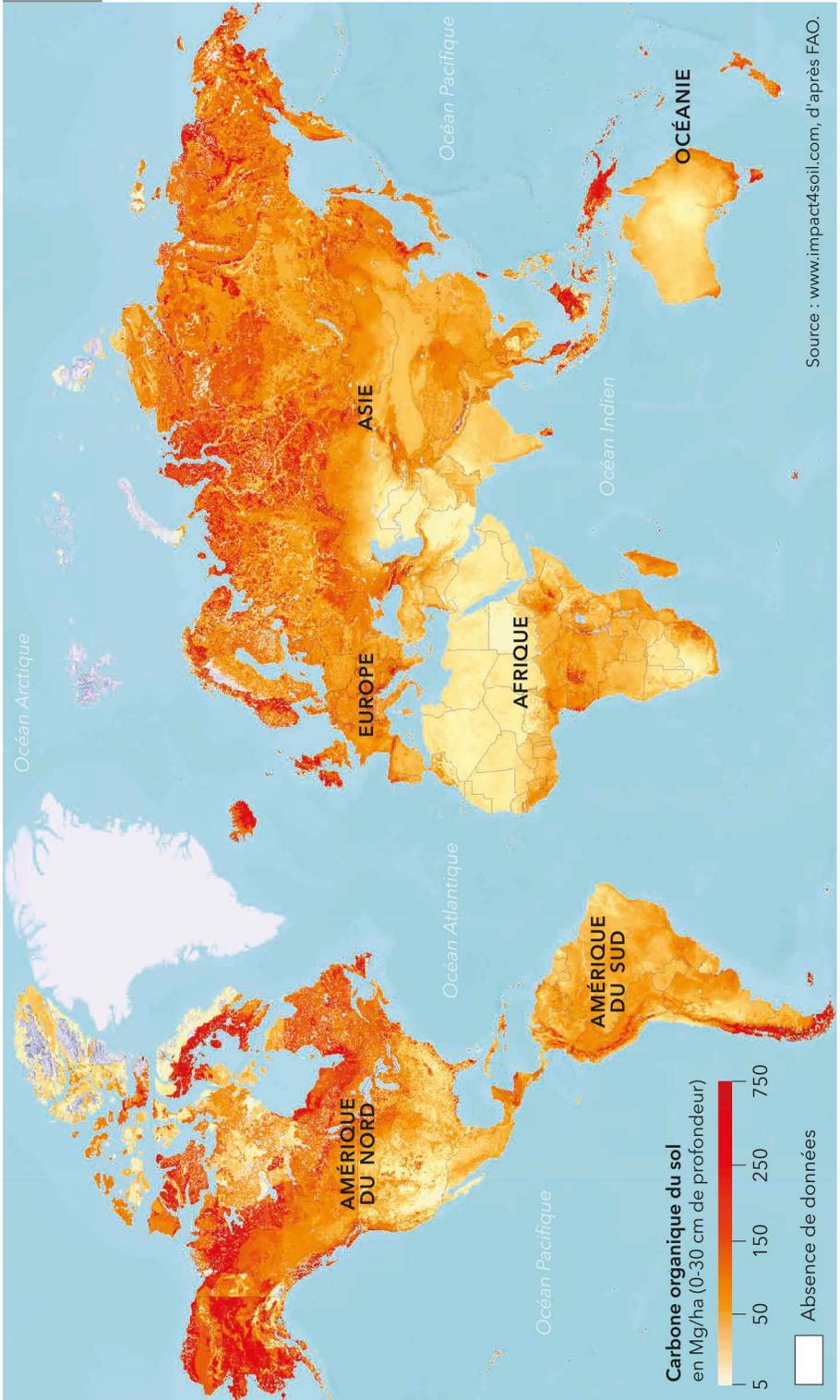
4.1. Carte des stocks de carbone organique

Le sol est le plus grand réservoir de carbone terrestre : 2 400 Gt de carbone entre 0 et 2 m de profondeur à l'échelle du globe (voir chapitre 17). Ce stock se trouve majoritairement dans le sol des forêts (30%) et des prairies (30% à 35%), et dans une moindre mesure dans le sol des terres cultivées (15%). À cela s'ajoute le carbone du pergélisol (plus de 1 600 Gt entre 0 et 3 m de profondeur).

La carte des stocks de carbone organique du sol (COS, SOC en anglais) entre 0 et 30 cm de profondeur est issue du travail du Partenariat mondial pour les sols (GSOCmap, *global soil organic carbon map*). Cette carte (carte 12) est la première carte mondiale du carbone organique des sols jamais produite dans le cadre d'un processus consultatif et participatif impliquant les pays membres, ce qui rend celle-ci absolument nouvelle et unique. Les cartes 12 à 14 sont consultables en version numérique et interactive sur la plateforme Impact4Soil (www.impact4soil.com) développée par le Cirad et Vizzuality dans le cadre du projet européen ORCaSa.

Les stocks de COS sont les plus élevés dans les zones de hautes ou de basses latitudes (supérieures à 40°) et dans la zone intertropicale. Dix pays abritent plus de 60% de ces stocks, la Russie arrivant en tête. Le Brésil, l'Indonésie et la République démocratique du Congo figurent également dans cette liste. *A contrario*, les régions sèches du nord de l'Afrique, du Proche-Orient ou du centre de l'Australie présentent des niveaux de stocks de COS plus faibles.

Carte 12



© Légendes Cartographie

4.2. Carte des évolutions passées des stocks de carbone organique du sol

Les changements d'usage des terres sont une source majeure d'émissions nettes de GES. Ainsi, la conversion d'écosystèmes naturels en terres agricoles a entraîné depuis le Néolithique une perte cumulée de 116 Gt de carbone dans les deux premiers mètres du sol (voir chapitre 17).

La carte des évolutions passées des stocks de carbone organique du sol (COS) entre 0 et 30 cm de profondeur (carte 13) est issue de l'analyse de Sanderman *et al.* (2017). Elle présente les différences de stocks de COS entre les niveaux historiques (-12000 ans) et les niveaux actuels. Cette carte est une représentation statistique de la quantité de carbone organique du sol qui a pu être perdue à cause de l'agriculture. Il s'agit d'un produit mondial dérivé à une résolution d'environ 10 km.

Les pertes de stocks de COS (en rouge sur la carte) ont été les plus élevées en Europe, aux États-Unis et en Chine. *A contrario*, quelques régions ont vu leurs stocks de COS s'accroître (en vert sur la carte), notamment dans le sud de la Mongolie ou dans le delta du Nil.

4.3. Carte des évolutions futures des stocks de carbone organique du sol

Au sujet de la régulation du climat, la séquestration de carbone dans les sols, grâce à une augmentation des stocks de carbone organique du sol (COS), représenterait 47 % du potentiel d'atténuation de l'agriculture et des prairies (voir chapitre 17).

En utilisant l'approche comptable de niveau 1¹ du Giec, la carte des évolutions futures des stocks de COS (carte 14) permet de visualiser les différences de stocks de COS entre 2018 et 2038 entre 0 et 30 cm de profondeur, si des pratiques de restauration des terres cultivées et des prairies étaient mises en œuvre. L'approche comptable de niveau 1 du Giec utilise des fonctions de réponse moyennes régionales pour estimer les variations du carbone organique du sol dues à des changements dans l'utilisation des terres. En tant que telle, cette approche ne tient pas compte des variations à plus petite échelle de l'évolution du carbone organique du sol, qui seront probablement observées en fonction des types de sols locaux, du climat local et de la mise en œuvre locale de stratégies de gestion particulières. La carte ne tient pas compte de la faisabilité locale ou des taux d'adoption actuels. Cette analyse repose sur l'hypothèse d'une adoption instantanée sur toutes les terres, même si en réalité, le changement se fera progressivement au fil du temps.

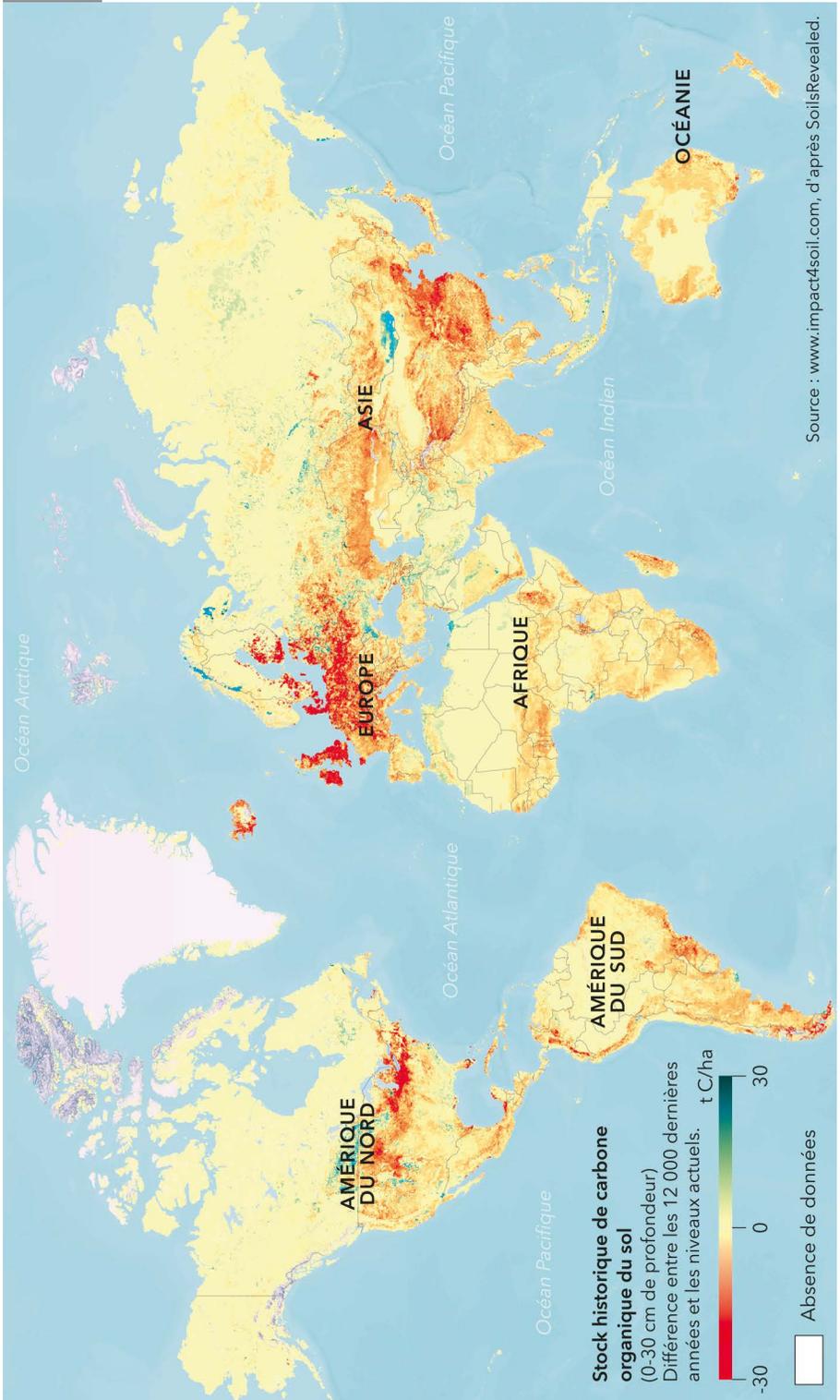
Cette carte permet de mettre en évidence le potentiel important d'augmentation des stocks de COS (en vert sur la carte), en particulier en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie du Sud-Est, grâce à la restauration des terres cultivées et des prairies.

4.4. Stock actuel de carbone de la biomasse aérienne

Les stocks de carbone des terres émergées se trouvent majoritairement dans les sols et dans la végétation arbustive et arborée. Les forêts couvrent la planète sur 3 900 Mha

1. Glossaire du Giec : «Un niveau représente un degré de complexité méthodologique. En général, trois niveaux sont proposés. Le niveau 1 est la méthode de base, le niveau 2 est intermédiaire et le niveau 3 est le plus exigeant en termes de complexité et de données requises.» https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/12/19R_V0_02_Glossary.pdf.

Carte 13



© Légendes Cartographie

Carte 14



(millions d'hectares) et représentent de l'ordre de 860 Gt de carbone (Gt : milliards de tonnes), dont plus de 40% dans la biomasse vivante (voir chapitre 9). La forêt tropicale représente plus de la moitié des stocks. Les forêts jouent donc un rôle crucial dans l'évolution du climat.

La carte des stocks de biomasse aérienne (carte 15) est représentative des stocks de carbone dans la biomasse aérienne, celle-ci étant en moyenne composée de 50% de carbone. Cette carte s'appuie sur la méthodologie présentée dans Baccini *et al.* (2012) pour générer une carte mondiale de la densité de la biomasse ligneuse vivante aérienne à une résolution d'environ 30 m pour l'année 2000. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).

Les trois grands massifs forestiers tropicaux que sont l'Amazonie, l'Afrique centrale et le bassin du Bornéo-Mékong concentrent la majorité de ces stocks de biomasse aérienne.

4.5. Les flux nets actuels de GES au niveau des forêts

Les forêts constituent le principal puits de carbone en milieu continental, second puits après les océans. Elles jouent de fait un rôle crucial dans l'évolution du climat. Elles captent, selon les estimations, entre 70% et 100% de la 1,8 Gt de carbone par an absorbée au niveau des surfaces continentales (voir chapitre 9).

La carte des flux nets actuels de GES au niveau des forêts (carte 16) présente la différence entre le carbone émis par les forêts et le carbone absorbé par les forêts entre 2001 et 2023. Les valeurs négatives (en vert sur la carte) correspondent à des puits nets de carbone et les valeurs positives (en violet sur la carte) à des sources nettes de carbone. Les flux nets sont calculés sur la base des lignes directrices du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).

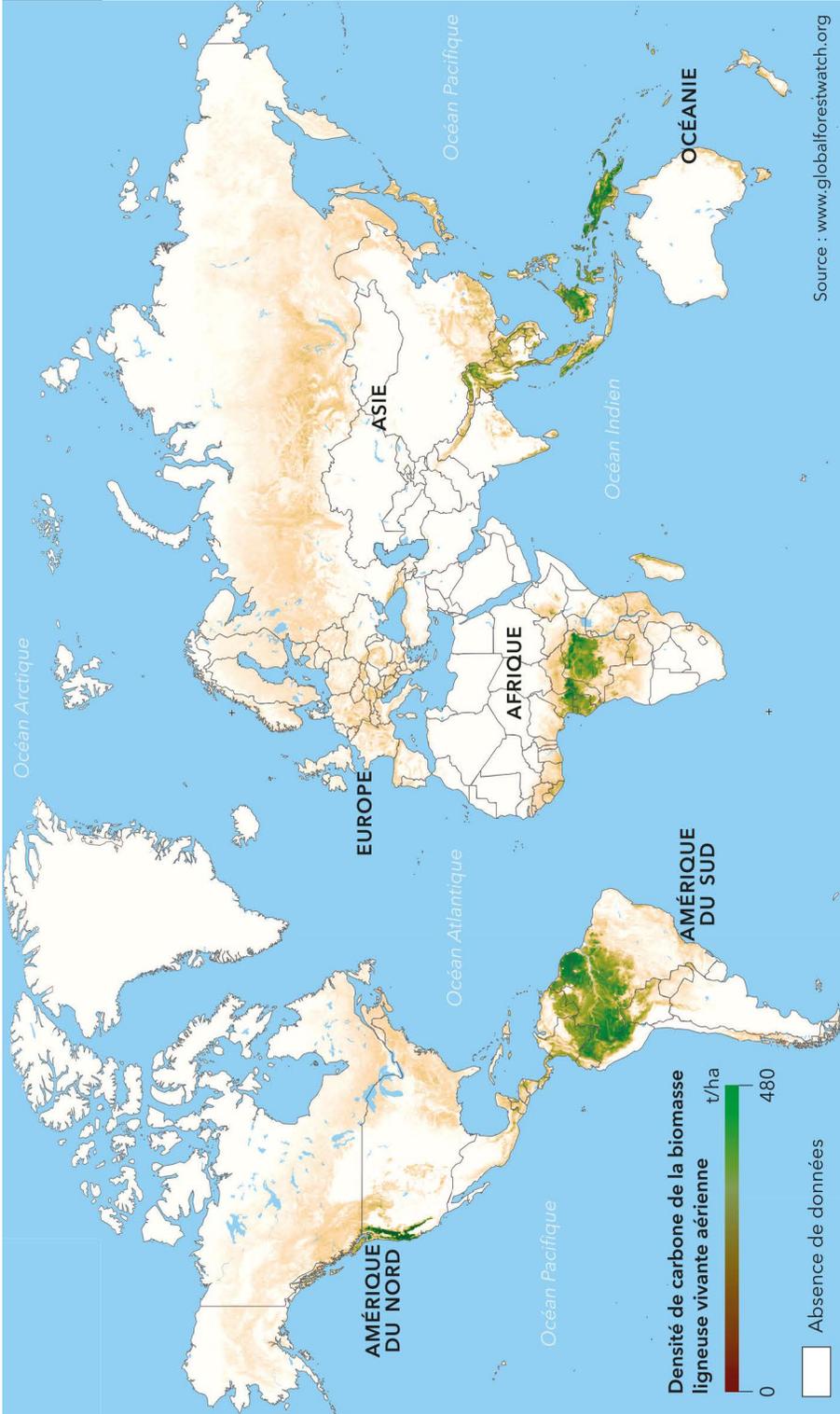
Cette carte fait clairement ressortir les émissions de GES dues à la déforestation et à la dégradation des forêts en Amérique du Nord (par les mégafeux notamment), en Amazonie ou encore en Indonésie. À l'inverse, on constate des absorptions de GES grâce aux forêts en Europe ou encore en Chine.

4.6. Le potentiel de séquestration de GES au niveau des forêts

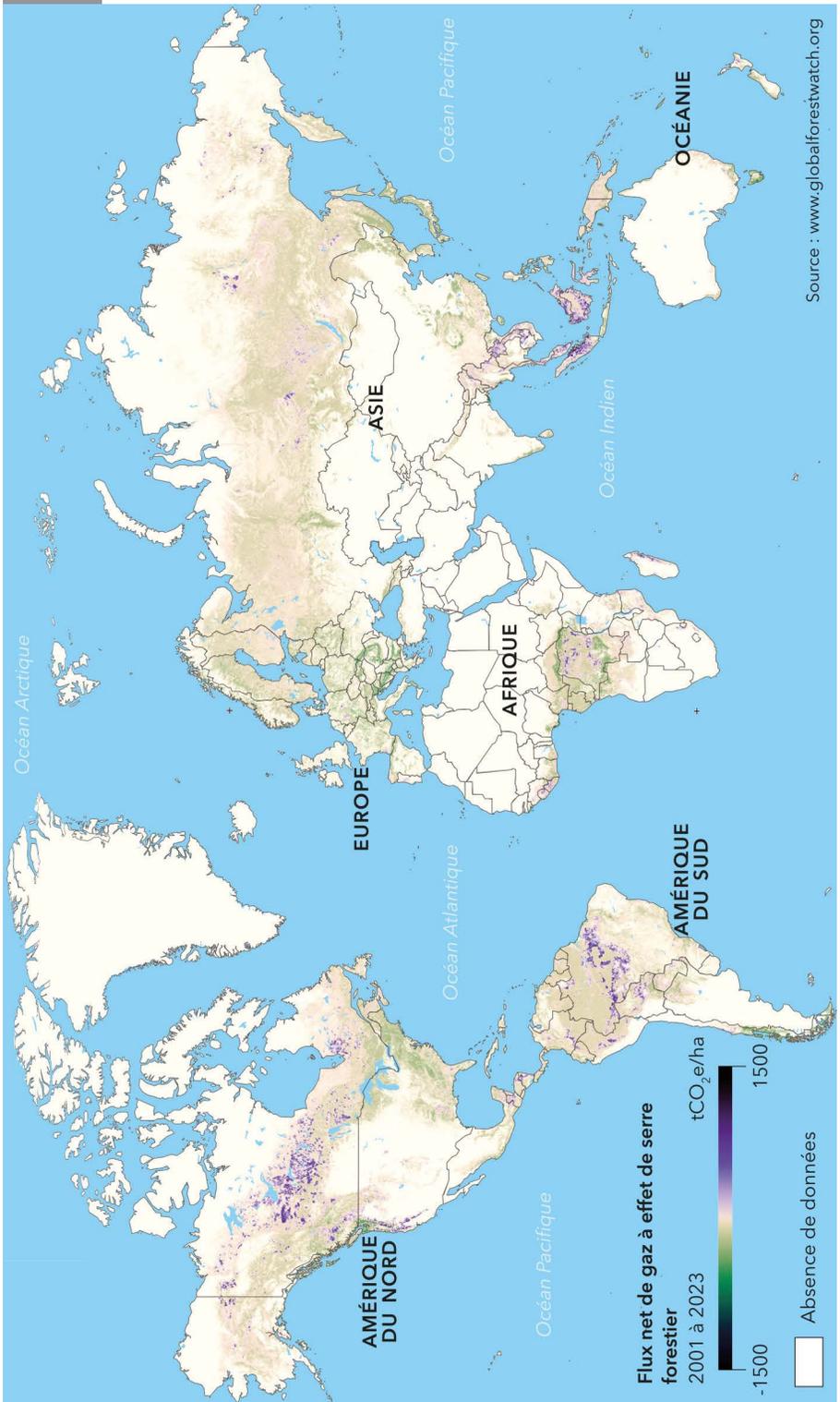
Les forêts pourraient stocker 226 Gt de carbone de plus qu'actuellement, si on les laissait se reconstituer, dans des zones souvent en marge des grands massifs forestiers tropicaux, qui ne sont plus utilisées pour l'agriculture et qui restent libres de toute urbanisation (voir chapitre 9).

La carte du potentiel de séquestration de GES au niveau des forêts (carte 17) affiche le taux auquel les forêts pourraient capter le carbone de l'atmosphère et le stocker dans la biomasse vivante aérienne au cours des trente premières années de repousse de la forêt naturelle. Ces taux sont présentés pour les zones reboisables et excluent les zones de prairies et de cultures indigènes afin de préserver la production d'aliments et de fibres ainsi que l'habitat de la biodiversité. La carte est consultable en version numérique et interactive sur la plateforme Global Forest Watch (www.globalforestwatch.org).

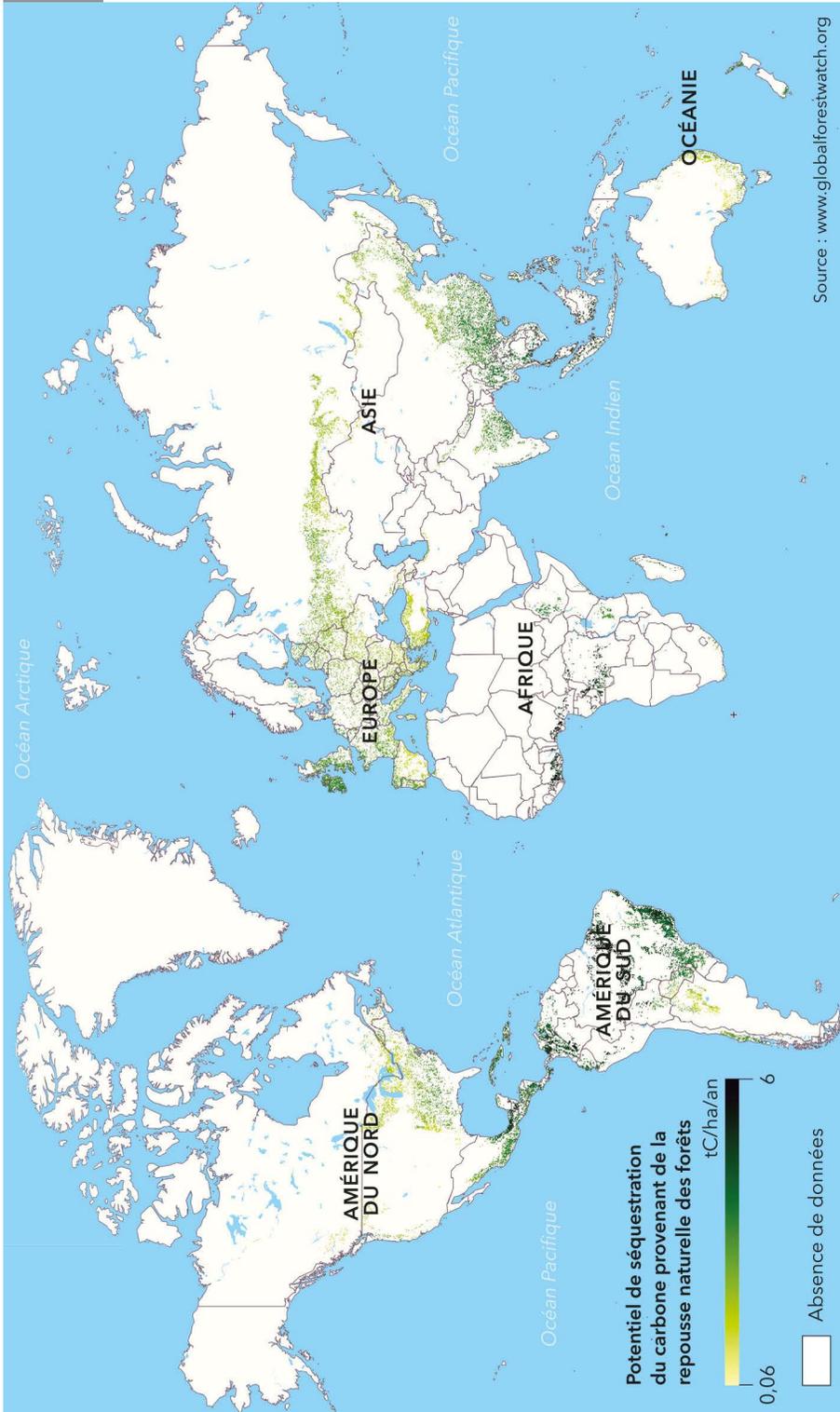
Carte 15



Carte 16



Carte 17



Cette carte met en lumière l'importance de ce potentiel en Amérique centrale et dans les Caraïbes, ainsi qu'en Amérique du Sud, en Asie du Sud-Est et en Europe. En revanche, le potentiel paraît plus limité en Afrique, à l'exception de l'Afrique de l'Ouest.

5. Évolutions et impacts du changement climatique par grande région sur le secteur des terres

5.1. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Afrique

Nicolas Viovy, Jacques André Ndione, Moussa Waongo, Maguette Kaire

5.1.1. Les évolutions du climat prévues en Afrique

5.1.1.1. Température

Comme sur l'ensemble des continents, la température en Afrique va augmenter, mais moins fortement, en moyenne, que sur les continents eurasiens et nord-américain. En outre, le changement climatique affectera de manière hétérogène les différentes régions africaines : dans les hautes latitudes, l'augmentation des températures sera plus importante que dans les zones tropicales, à l'exception du Sahel (figure 4.4). Par conséquent, cette augmentation (d'environ 0,8°C) sera plus importante dans le nord et dans le sud du continent que dans la zone équatoriale. Cependant, la température étant déjà élevée, en particulier dans les zones de savanes et semi-désertiques, de nombreuses régions vont atteindre des pics de température supérieurs à 50°C, un seuil critique pour les humains et l'ensemble des espèces.

5.1.1.2. Précipitations

L'incertitude sur l'évolution des précipitations en Afrique est importante. Les projections indiquent de forts contrastes avec une aridification de tout le pourtour méditerranéen ainsi que sur une partie de la côte atlantique et dans tout le sud du continent (figure 4.4). En revanche le reste du continent devrait voir ses précipitations augmenter. Contrairement à d'autres régions, comme l'Inde, la durée de la période de mousson ne devrait pas varier fortement. La variabilité interannuelle devrait augmenter conduisant à la fois à une augmentation des épisodes de précipitations intenses, mais également des périodes de sécheresse durant la saison des pluies. Ces effets pourraient malheureusement contrebalancer l'effet positif de l'augmentation moyenne des précipitations sur une partie du continent.

5.1.1.3. Vents

Comme dans toute la zone tropicale, s'il n'y a pas de tendance nette sur le changement de la fréquence des cyclones (qui pourrait même diminuer légèrement), leur intensité a en revanche augmenté et devrait continuer à croître dans le futur. Ce phénomène est lié à l'augmentation de la température des océans et de l'atmosphère dont la teneur en eau s'accroît.

5.1.1.4. Niveau marin

Comme pour le reste du globe, on attend une augmentation du niveau des mers qui affectera les zones côtières. La montée des eaux continuera, même si l'on parvient à stabiliser le CO₂ atmosphérique, et cela bien après que celui-ci commencera à diminuer. Le niveau marin a augmenté d'environ 23 cm depuis 1880 et devrait gagner encore 30 cm d'ici à 2050 (IPCC, 2014). Cet effet, combiné à l'augmentation de

l'intensité des cyclones, fait craindre des risques accrus de submersion de certaines régions côtières fortement peuplées (comme le delta du Nil, la ville de Lagos au Nigeria ou de Dakar au Sénégal).

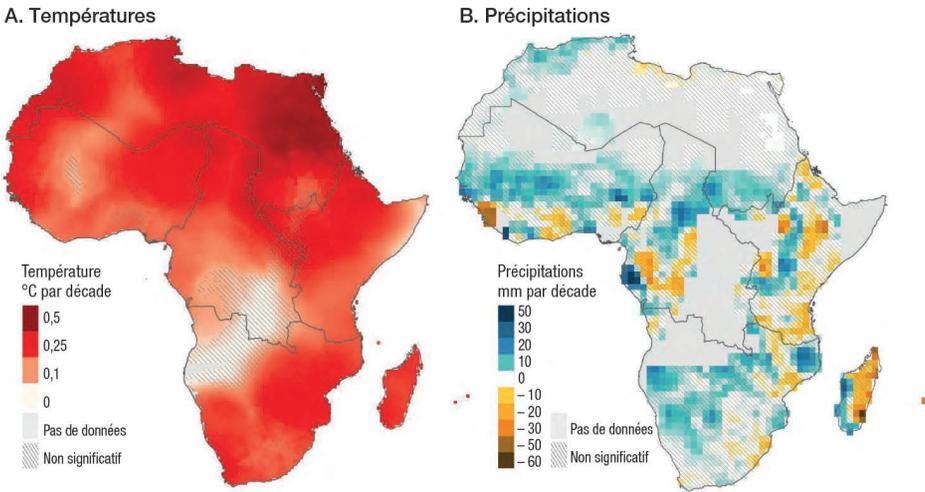


Figure 4.4. Tendances de l'évolution des températures et des précipitations sur les dernières décennies (1980-2015) en Afrique. Source : IPCC AR6 (2022).

5.1.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Afrique

Le changement climatique pose des défis complexes pour l'agriculture en Afrique, nécessitant des stratégies d'adaptation robustes pour assurer la résilience des systèmes agricoles et la sécurité alimentaire. L'augmentation de la variabilité des précipitations est un problème majeur, en particulier dans les zones fortement dépendantes du régime de précipitation telles que le Sahel (encadré 4.2), l'Afrique australe et la corne de l'Afrique. D'une part, l'imprévisibilité des précipitations par endroit complique la planification des cycles de culture, et les pluies tardives ou irrégulières peuvent entraîner une baisse des rendements ou la perte totale de certaines récoltes. D'autre part, le risque de sécheresses prolongées va augmenter et aura des impacts sur la production agricole. À noter que l'augmentation des températures accentue l'évapotranspiration et donc le risque de sécheresse agricole. Cette augmentation représente également un risque direct sur les cultures en renforçant le risque de stress thermique et donc de baisses de rendements. Le changement climatique risque également d'induire une extension des maladies et des ravageurs affectant à la fois les cultures et le bétail. Dans le même temps, les événements météorologiques extrêmes tels que les pluies torrentielles et les sécheresses accélèrent l'érosion des sols et la dégradation des terres, réduisant la fertilité des sols et la capacité de production agricole à long terme. L'augmentation de l'irrégularité des précipitations ainsi que l'augmentation des besoins en denrées agricoles liée à celle de la population (et à une éventuelle évolution du régime alimentaire) augmentent les besoins en irrigation, ce qui peut exacerber les conflits entre les agriculteurs, les éleveurs et les autres utilisateurs de l'eau, compliquant la gestion durable des ressources hydriques. Enfin, les contraintes climatiques forcent parfois les agriculteurs à abandonner des cultures traditionnelles diversifiées

Encadré 4.2. L'Afrique de l'Ouest sera fortement affectée par le changement climatique

Représentant actuellement seulement 1,8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), les pays de l'espace Cedeao (Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest) contribuent de façon très faible aux changements climatiques. Selon les scénarios les plus pessimistes, l'Afrique de l'Ouest connaîtra, d'ici à 2060, une augmentation de température de +2,3°C, soit un réchauffement de +0,6°C par décennie. En effet, en Afrique de l'Ouest, le nombre de jours de chaleur potentiellement létale pourrait atteindre 50 à 150 jours par an pour un réchauffement climatique de 1,6°C et 100 à 250 jours par an pour un réchauffement climatique de 2,5°C, avec les augmentations les plus fortes dans les zones côtières. Les enfants nés en Afrique de l'Ouest en 2020 seront, en cas de réchauffement climatique de 1,5°C, exposés à 4 à 6 fois plus de vagues de chaleur au cours de leur vie que ceux nés en 1960. Pour la zone tropicale de l'Afrique de l'Ouest, le risque de mortalité lié à la chaleur est 6 à 9 fois plus élevé que la moyenne des années 1950-2005 à 2°C de réchauffement climatique. Avec l'urbanisation croissante, les villes comme Lagos, Niamey, Kano et Dakar sont particulièrement exposées (Trisos *et al.*, 2022). Quant à la pluviométrie, il est attendu qu'elle soit plus erratique et devrait entraîner un accroissement de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques extrêmes déjà connus dans la région : inondations, variabilité pluviométrique accrue (translation des isohyètes), poches de sécheresse extrêmement longues, entre autres corollaires, avec des conséquences humaines (dégradations des écosystèmes) et économiques dramatiques sur l'ensemble des secteurs économiques et sur les populations les plus vulnérables, dont notamment les femmes, les jeunes et les personnes âgées. Concernant la région emblématique du Sahel, les analyses récentes sur l'évolution actuelle du climat montrent une intensification encore plus aiguë des extrêmes. Les sécheresses sont de plus en plus intenses tout comme les inondations, au point que les chercheurs parlent de l'avènement d'une nouvelle ère climatique (Panthou *et al.*, 2018).

Les conséquences sont déjà dramatiques. En octobre 2022, des pluies intenses et des inondations ont tué des centaines de personnes, déplacé des milliers d'autres et détruit plus d'un million d'hectares de terres cultivées au Niger, au Mali et au Burkina Faso (UN News*). Par rapport à la période 1986-2005, un réchauffement planétaire de 3°C devrait réduire la capacité de travail dans l'agriculture de 30% à 50% en Afrique subsaharienne, en raison de la hausse des températures. Le changement climatique a renforcé l'extrême pauvreté dans la région d'Afrique de l'Ouest de près de 3% en 2021. Les inégalités de genre au Sahel et en Afrique de l'Ouest sont parmi les plus élevées au monde. De multiples crises (climatiques, sécuritaires, sanitaires et alimentaires) interconnectées exacerbent ces inégalités et accroissent la vulnérabilité des femmes.

Concernant les secteurs agricoles, le secteur de l'élevage est particulièrement affecté du fait de la diminution de la disponibilité en eau, d'une régression du potentiel de biomasse, d'une dégradation des pâturages (Sawadogo *et al.*, 2011) et d'une augmentation des cas de maladies thermiques. Avec un réchauffement global de 1,5°C, les rendements du sorgho devraient diminuer en Afrique de l'Ouest, et une baisse de 9% des rendements du maïs est attendue (figure 4.5). Chez les cacaoyers, plante qui croît à des températures optimales autour de 25°C en Afrique de l'Ouest, des hausses des températures engendreront des chutes drastiques de la production de cacao d'ici 2030 au Ghana et en Côte d'Ivoire.

* UN News Global perspective Human stories. <https://news.un.org/en/story/2022/10/1129997>.

Encadré 4.2. (suite)

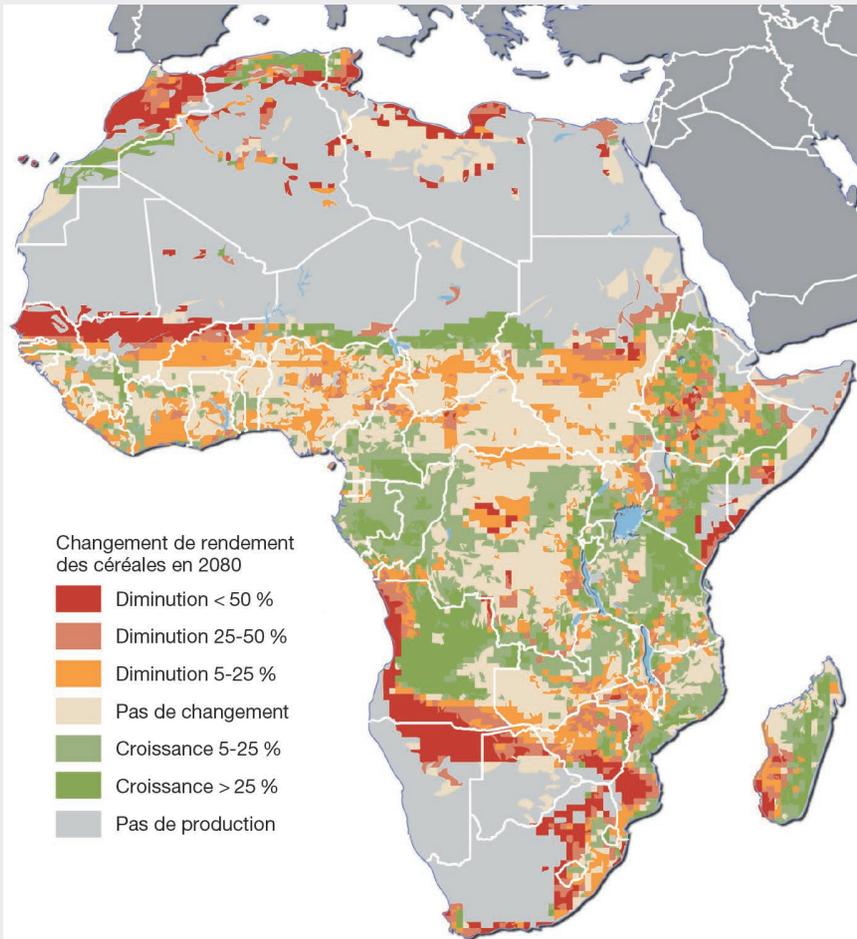


Figure 4.5. Changement des rendements en céréales à l'horizon 2080 en Afrique par rapport à l'année 2000 dans le cas d'un scénario à forte émission (A2). Source : Fischer *et al.* (2005).

au profit de cultures plus résistantes ou de monocultures, ce qui peut réduire la biodiversité agricole et augmenter la vulnérabilité à d'autres menaces, comme les ravageurs. Ces différents risques sont accrus par le fait que la majorité des agriculteurs en Afrique sont de petits exploitants, souvent pauvres : leur capacité (financières et technologiques) à s'adapter aux impacts du changement climatique est limitée, ce qui les rend particulièrement vulnérables.

5.1.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

Alors que l'Afrique représente une des régions les plus vulnérables au changement climatique, l'impact direct de son agriculture sur les émissions de GES est plus modéré que les grandes régions développées (figure 4.6). L'agriculture est en effet nettement moins mécanisée et utilise moins d'engrais, et le régime alimentaire est moins carné que dans les pays développés. En revanche, si l'on prend en compte l'impact lié au

changement d'utilisation des terres, principalement lié à la déforestation, le bilan des émissions de GES devient nettement plus important et représente alors 22% des émissions mondiales de GES du secteur AFOLU (Brouziyne *et al.*, 2023). L'impact du changement d'utilisation des terres en Afrique représente alors la moitié des émissions de GES. De même, la tendance est à une augmentation des émissions passant de 1,8 Gt eqCO₂ en 2000 à 2,2 Gt eqCO₂ en 2018 (FAO, 2020).

5.2. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Asie du Sud-Est

Alain Rival

5.2.1. Les évolutions du climat en Asie du Sud-Est

Archipélagiques par nature, les pays d'Asie du Sud-Est subissent de fortes interactions terre-océan-atmosphère. Le climat est principalement tropical, chaud et humide avec des précipitations abondantes. La variabilité saisonnière des précipitations dans la région est principalement influencée par les systèmes de mousson, par la migration nord-sud de la zone de convergence intertropicale et par les cyclones tropicaux (principalement pour les Philippines et l'Indochine). L'Asie du Sud-Est (SEA) s'avère être l'une des régions du monde les plus vulnérables au changement climatique en raison de ses longs littoraux, de sa forte dépendance à l'égard de l'agriculture et de la sylviculture et plus généralement des ressources naturelles, notamment minières. Chaque année, les pluies torrentielles de la mousson et plusieurs cyclones font des centaines de morts en Asie du Sud-Est (et affectent des millions de personnes); elles contribuent aussi à la hausse du prix du riz et des denrées alimentaires.

L'Asie du Sud-Est abrite une concentration importante de pays fortement touchés par le changement climatique : quatre des dix pays les plus touchés au monde appartiennent à cette région, à savoir le Myanmar, les Philippines, la Thaïlande et le Viêt Nam. L'Indonésie est devenue le pays ayant le taux d'émissions de GES le plus élevé dans la région en 2021, enregistrant 2,05 milliards de tonnes. Après l'Indonésie, le Viêt Nam occupe la deuxième place avec 507,34 t, tandis que la Thaïlande occupe la troisième place avec 452,12 Mt. À l'inverse, le Timor-Leste présente les émissions de GES les plus faibles, soit 9,38 Mt (Sonobe *et al.*, 2024).

La région est confrontée à des émissions croissantes de GES d'origine agricole : les activités liées à l'agriculture, à la foresterie et aux diverses utilisations des terres sont essentielles pour la région, pour sa sécurité alimentaire et pour le maintien des moyens de subsistance dans les zones rurales. Ces activités affectent également de manière significative les émissions anthropiques de GES.

La déforestation est l'une des principales causes d'émissions de GES par le secteur agricole. La conversion massive des terres à des fins agricoles, notamment pour l'agriculture commerciale à grande échelle dont les plantations de palmiers à huile, libère le carbone retenu dans les arbres et diminue la capacité des forêts à absorber le CO₂.

Le développement des activités agricoles en Indonésie (Sonobe *et al.*, 2024) a stimulé la croissance économique, mais a aussi entraîné des coûts écologiques et économiques excessifs. Entre 2007 et 2018, ce développement a généré environ 48 milliards de dollars (5,7% du produit intérieur brut, PIB), mais la pollution de l'air et les incendies ont compensé plus de la moitié de cette somme. Les mesures de prévention des incendies et de restauration des tourbières réduisent désormais ces coûts.

Encadré 4.3. La région Afrique du Nord et Proche-Orient : un point chaud du changement climatique

La région Afrique du Nord – Proche-Orient (ANMO ou Mena en anglais) est à la fois une région particulièrement émettrice de GES (en 2018, cette région a produit 8,7% des GES, alors qu'elle ne représentait que 6% de la population mondiale) et une région particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. Elle comprend à la fois des pays exportateurs de pétrole à revenu élevé dans la zone du golfe Persique, des pays à revenu intermédiaire (Maroc, Turquie, Égypte, etc.) et des pays parmi les moins avancés tels que le Soudan, le Yémen et la Mauritanie.

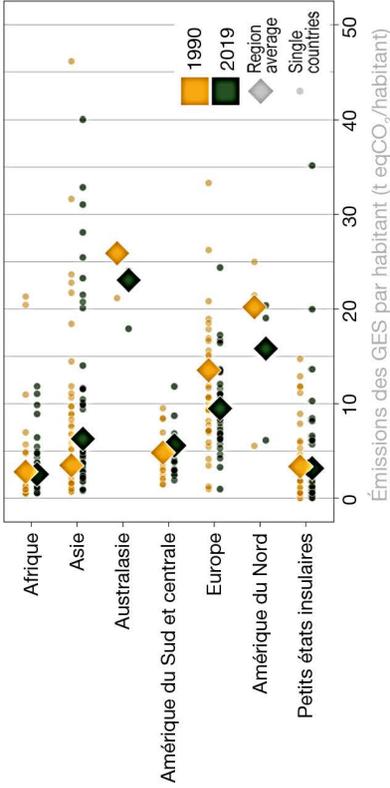
Le changement climatique va en effet exercer une pression de plus en plus importante sur les ressources en eau et agricoles déjà rares dans la région Mena, menaçant ainsi la sécurité nationale et la stabilité politique de toute la région. L'augmentation de la température observée dans cette région a été presque deux fois plus rapide que la moyenne mondiale. En plus des épisodes de chaleur, qui devraient être plus intenses et fréquents, les régions adjacentes à la mer Méditerranée devraient connaître une baisse des précipitations allant de 20% à 40%. Les sécheresses devraient quant à elles durer jusqu'à 90% plus longtemps. La région est également particulièrement sensible au phénomène de désertification. L'Égypte, la Jordanie et la Palestine connaissent déjà un déclin de leur végétation, et ce, jusqu'à 80% de leurs superficies terrestres. En plus d'augmenter l'aridité de la région, perturbant largement les modèles agricoles, ce phénomène devrait également accentuer le nombre et l'intensité des tempêtes de sable. Dans cette partie du monde, qui abrite déjà douze des dix-sept pays les plus touchés par le manque d'eau, et où la population est amenée à doubler d'ici 2050, les conséquences de la crise climatique sur les sociétés devraient être considérables. Les conséquences sur l'agriculture seront majeures, puisque le Giec estime que près de 45% des terres agricoles devraient être exposées à la salinité, à l'épuisement des nutriments du sol et à l'érosion. Dans le même temps, cette région dépend fortement des importations de produits agricoles : 40% de ses besoins alimentaires sont aujourd'hui couverts par des importations, et le changement climatique devrait encore accentuer cette tendance.

La poursuite du *statu quo* entraînera un réchauffement régional moyen supplémentaire pouvant atteindre 5°C avant la fin de ce siècle, risquant ainsi de rendre inhabitable une partie de la région Mena, même si tous les pays ne sont pas égaux face aux impacts du changement climatique.

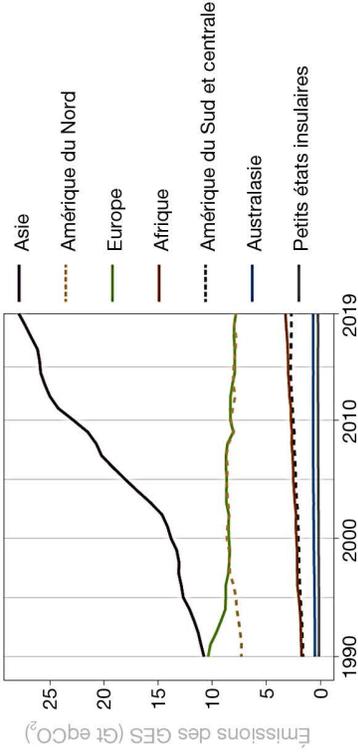
Figure 4.6. Tendances historiques des émissions de gaz à effet de serre (GES) en Afrique par rapport aux autres régions du monde.

(a) Émissions de GES par personne et par région, et leur évolution de 1990 à 2019 (les cercles représentent les pays, les losanges représentent la moyenne de la région); (b) Émissions totales de GES par région depuis 1990; (c) Émissions totales de GES en 1990 et en 2019 pour les quinze pays d'Afrique les plus émetteurs; (d) Émissions totales en Afrique depuis 1990, ventilées par GES (à gauche) et par secteur (à droite). Les émissions de méthane et de CO₂ représentent une part presque égale des émissions de GES en Afrique, les secteurs d'émissions les plus importants étant l'énergie et l'agriculture (Crippa *et al.*, 2021). Les émissions de l'agriculture dans le panneau (d) ne comprennent pas l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (LULUCF CO₂). Les potentiels de réchauffement planétaire sur cent ans, conformes aux estimations du groupe de travail I (GTI ou WGI en anglais), sont utilisés. Les données sur les émissions proviennent de Crippa *et al.* (2021), compilées dans le chapitre 2 du groupe de travail III (GTIII) de l'AR6 du Giec.

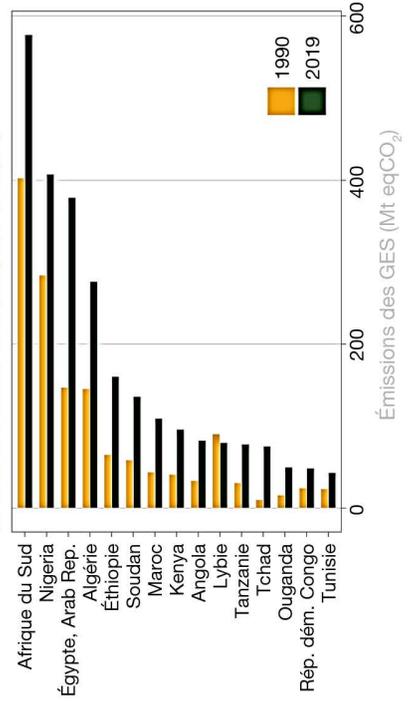
(a) Émissions régionales de GES par habitant



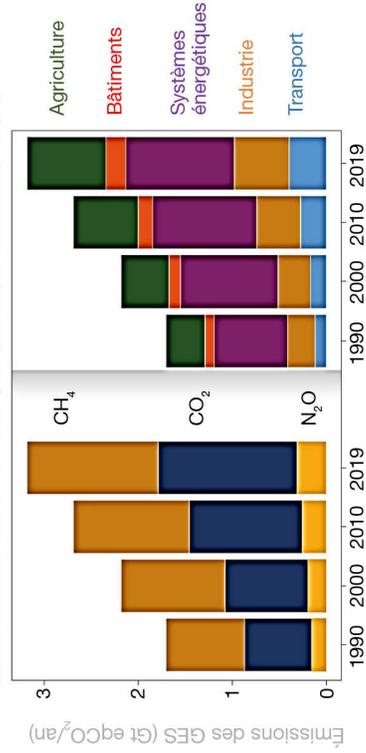
(b) Tendances régionales des émissions de GES



(c) Émissions des GES par pays (Afrique)



(d) Émissions totales de GES par gaz et par secteur (Afrique)



Très exposée, car majoritairement insulaire, et peu résiliente, la région est vulnérable aux effets du changement climatique (IPCC, 2022), avec une augmentation prévisible de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes liés au climat (inondations et sécheresses). Ce changement radical des régimes de précipitations saisonnières aurait d'énormes répercussions sur les moyens de subsistance, sur les infrastructures, sur la production agricole et sur la sécurité alimentaire de la région.

5.2.1.1. Température

La température moyenne en Asie du Sud-Est devrait continuer à augmenter au cours du xxi^e siècle. Les projections des simulations climatiques régionales multimodèles données par l'initiative du Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (Cordex-Sea) montrent que l'augmentation de la température sur les terres émergées serait comprise entre $3^{\circ}C$ et $5^{\circ}C$ d'ici la fin du xxi^e siècle par rapport à la période antérieure à 1986-2005. Pour tous les niveaux de réchauffement planétaire (voir chapitre 1), la région terrestre devrait se réchauffer légèrement moins que la moyenne mondiale.

5.2.1.2. Précipitations

Les projections de l'évolution future des précipitations sont très variables entre les sous-régions de l'Asie du Sud-Est et entre les modèles (figure 4.7). Ainsi, les jeux de données fournis par le projet Coupled Model Intercomparison Project (CMIP7) ont montré une augmentation des précipitations moyennes annuelles sur la plupart des zones terrestres d'ici le milieu et la fin du xxi^e siècle, avec une forte corrélation au modèle montrée pour les niveaux de réchauffement plus élevés seulement². Sur la base des simulations multimodèles Cordex pour l'Asie du Sud-Est, des augmentations significatives et solides des précipitations moyennes sur l'Indochine et sur les Philippines sont projetées, alors que l'on note une tendance à l'assèchement sur la partie maritime pour les périodes du début, du milieu et de la fin du xxi^e siècle.

À la fin du xxi^e siècle, une augmentation de 20% des précipitations moyennes est prévue au Myanmar, dans le centre nord de la Thaïlande et dans le nord du Laos, et de 5% à 10% aux Philippines orientales et dans le nord du Viêt Nam. Des conditions nettement plus sèches sont prévues dans les autres régions de l'Asie du Sud-Est. Dans la région indonésienne, en particulier sur Java, Sumatra et Kalimantan, une diminution de 20% à 30% des précipitations moyennes est prévue d'ici à la fin du xxi^e siècle.

5.2.1.3. Feux

Près de la moitié des tourbières tropicales du monde se trouvent en Asie du Sud-Est, où elles constituent d'importants réservoirs de carbone. Au cours des trois dernières décennies, la plupart des 25 Mha de tourbières tropicales de la région ont été déboisées et asséchées. En conséquence, la baisse du niveau des nappes phréatiques expose la tourbe à l'oxydation, transformant en dioxyde de carbone le matériel végétal accumulé au cours des millénaires et provoquant alors un affaissement des terres. Près de 80% des tourbières naturelles de la région ont été déforestées et drainées, la majorité d'entre elles étant aujourd'hui occupée par des plantations pérennes, forestières ou agricoles. Cette conversion accroît l'oxydation de la tourbe, ce qui contribue à une perte rapide de carbone dans l'atmosphère sous forme d'émissions de gaz à effet de serre, et augmente leur vulnérabilité aux incendies qui génèrent régulièrement des brouillards secs, avec de graves incidences sur la santé humaine (Mishra *et al.*, 2021).

2. <https://cordex.org/>.

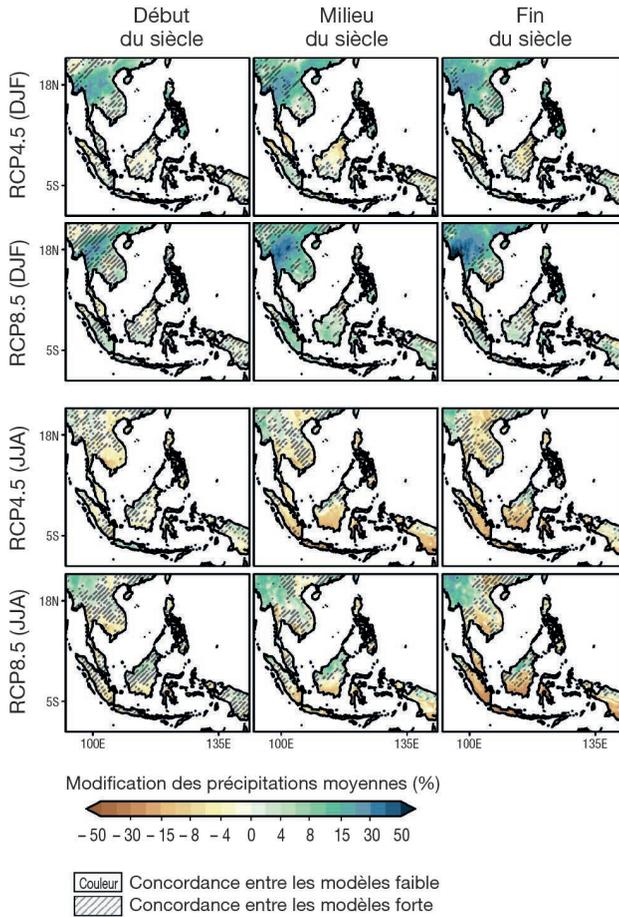


Figure 4.7. Projection des changements attendus par le biais de modèles climatiques régionaux (MCR) pour les précipitations moyennes entre le début (2011-2040), le milieu (2041-2070) et la fin (2071-2099) du xxi^e siècle et la période historique 1976-2005. Source : Tangang *et al.* (2020 ; figure 10).

Les données proviennent des simulations de réduction d'échelle Cordex-Sea. Les lignes hachurées indiquent les zones où la concordance entre les modèles est faible (moins de 80%). DJF : décembre-janvier-février ; JJA : juin-juillet-août.

Les incendies de forêt et de végétation, utilisés comme outils pour l'agriculture et la déforestation, sont une source majeure de pollution atmosphérique et peuvent causer de graves problèmes sanitaires dans de nombreuses régions d'Asie du Sud-Est. Le coût économique des incendies de forêt qui ont ravagé l'Indonésie au cours de l'épisode El Niño de 2015 a été estimé à plus de 16 milliards de dollars américains, avec plus de 100 000 décès prématurés. Pendant plusieurs jours, les incendies ont émis dans la région plus de dioxyde de carbone que l'ensemble de l'économie des États-Unis d'Amérique.

5.2.1.4. Niveau des mers

Les variations de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale ont indéniablement commencé à avoir un impact sur les économies insulaires d'Asie du Sud-Est, déjà

très vulnérables (Idris *et al.*, 2023). L'élévation du niveau de la mer peut menacer la durabilité à long terme des communautés côtières et des écosystèmes fragiles tels que les récifs coralliens, les zones marécageuses et les mangroves. La région indopacifique abrite la plupart des forêts de mangrove du monde, bien que l'apport de sédiments dans cette région diminue, en raison de la construction de barrages sur les cours d'eau.

Bien que la région ait tendance à se réchauffer un peu moins que la moyenne mondiale, le niveau des mers augmentera plus rapidement qu'ailleurs et les lignes de rivage vont reculer dans les zones côtières où vivent 450 millions de personnes. La montée des eaux devrait coûter des milliards de dollars de dégâts aux grandes villes d'Asie au cours de la présente décennie, et son impact est amplifié par les mouvements tectoniques de la ceinture de feu et par les effets du pompage massif des eaux souterraines. Ainsi, dix-neuf des vingt-cinq villes les plus exposées à une élévation d'un mètre du niveau de la mer se trouvent en Asie, dont sept rien qu'aux Philippines.

Les zones côtières d'Asie du Sud-Est sont densément peuplées et soutiennent un large éventail d'activités économiques. L'impact physique de l'élévation du niveau de la mer se manifeste par l'érosion côtière et par l'inondation des zones les plus basses, l'intrusion de sel, les inondations dues aux ondes de tempête et aux marées hautes ainsi que la perte d'habitat. L'impact économique de l'élévation du niveau de la mer a pour conséquences la destruction de zones naturelles, de champs et d'habitations le long des côtes, des changements d'utilisation des terres, de systèmes de gestion de l'eau, de navigation et de gestion des déchets sur les zones littorales.

5.2.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture et de la forêt en Asie du Sud-Est

Le dernier rapport de l'Association des nations de l'Asie du Sud-Est (ASEAN) sur l'état du changement climatique (ASEAN, 2022) suggère que les actions d'adaptation et d'atténuation soient mises en synergie sur le terrain. Divers exemples incluent l'agriculture intelligente face au climat et les solutions basées sur la nature, intégrant l'adaptation basée sur les écosystèmes comme l'agroforesterie, la protection des forêts de mangroves et le renforcement de la gestion des forêts par la certification et par la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+) (voir chapitre 6). Une gestion appropriée des réservoirs destinés à l'hydroélectricité protégera également les communautés locales des inondations fluviales et d'autres événements extrêmes, tout en contribuant à l'atténuation du changement climatique.

Le rapport de l'IPCC prévoit des conséquences particulièrement graves pour l'Asie du Sud-Est, l'une des régions de la planète les plus vulnérables au changement climatique. Le bloc régional, essentiellement archipélagique, sera directement frappé par la montée du niveau des mers, les vagues de chaleur, la sécheresse et des épisodes de pluie plus intenses et plus fréquents. Connus sous le nom de « bombes à pluie », les épisodes de fortes précipitations s'intensifieront de 7 % pour chaque degré de réchauffement de la planète.

La biodiversité et les services écosystémiques jouent un rôle essentiel dans le développement socio-économique ainsi que dans l'épanouissement culturel et spirituel de la population asiatique. La richesse en espèces atteint son maximum dans le triangle corallien de l'Asie du Sud-Est (Philippines et Indonésie), et l'étendue des forêts de mangroves en Asie représente environ 38,7 % du total mondial. Ces écosystèmes

côtiers fournissent de multiples services écosystémiques liés à la production alimentaire par la pêche et l'aquaculture, à la séquestration du carbone, à la protection des côtes et au tourisme et loisirs.

La figure 4.8 représente schématiquement les impacts attendus du changement climatique dans certains pays d'Asie du Sud-Est. Elle illustre bien la diversité spatio-temporelle des impacts futurs sur la production alimentaire, soulignant qu'il y a des « gagnants » et des « perdants » associés au changement climatique à différentes échelles. La sécurité alimentaire de la région reste fortement dépendante de la production de riz, qui montre une vulnérabilité importante, notamment au Viêt Nam et en Thaïlande. D'autres scénarios prévoient au contraire une augmentation des rendements liée au changement climatique, du fait d'une augmentation de la productivité en riz à l'hectare.

Asie du Sud-Est

Pays/Région		Denrée	Température	Précipitations	Impact sur la production	Année de projection	
	Cambodge	Riz			▼ 45 %	2080	
			+ 1 °C		▼ 4 %		
	Viêt Nam (nord-ouest)	Agriculture			▼	2050 et 2100	
	Viêt Nam	Riz	+ 1 °C		▼ 5,5-8,5 %		
		Aquaculture			▼		
	Thaïlande (nord-est)	Riz		+	▼		
						14 %	2080
						▼ 10 %	2080
						▲ 2,6 %	2080-2099
				▲ 22,7 %	2080 et 2100		
	Philippines	Céréales	+ 1 °C		▼		
	Asie du Sud-Est (5 pays)	Bétail			▼	2080	

Figure 4.8. Projection des impacts du changement climatique sur l'agriculture et sur les systèmes alimentaires dans les sous-régions d'Asie, qui ont fait suite à l'AR5 de l'IPCC. Source : Shaw *et al.* (2022 ; figure 10.6).

Les données relatives aux effets observés du changement climatique sur l'agriculture et sur les systèmes alimentaires en Asie du Sud-Est restent peu nombreuses. La plupart des incidences ont été associées à la sécheresse, à la mousson et aux oscillations océaniques, dont la fréquence et la gravité ont été mises en relation et associées par plusieurs auteurs au changement climatique. En général, les conséquences majeures sur la production agricole, telles qu'observées par les agriculteurs aux Philippines et en Indonésie, concernent principalement les retards dans les dates de récolte, la baisse des rendements et de la qualité des produits, l'augmentation de l'incidence des ravageurs et des maladies, des retards de croissance, une mortalité accrue du bétail et une chute des revenus agricoles.

Dans la plupart des pays d'Asie du Sud-Est, les pêcheries sont des activités conduites à petite échelle, qui sont plus vulnérables aux impacts du changement climatique que les secteurs commerciaux, avec une tendance générale à la baisse du nombre de petites unités. L'analyse des activités liées à la pêche montre une diminution continue des prises, qui aura un impact sur le futur du secteur des pêches aux Philippines, en Thaïlande, en Malaisie et en Indonésie. Le changement climatique devrait réduire le potentiel de production global des pêcheries sous l'effet d'une augmentation de la température d'environ 2 °C d'ici à 2050.

Tout comme les pêcheries, l'aquaculture asiatique est très vulnérable au changement climatique. La majorité des éleveurs de crevettes ont observé que les conditions météorologiques ont changé brusquement au cours des cinq dernières années et que les températures élevées sont les plus préjudiciables parce qu'elles réduisent le taux de croissance, augmentent la sensibilité aux maladies et affectent la productivité des élevages. Les élevages de crevettes sont également affectés par les changements dans la variabilité et dans l'intensité des précipitations, perçues par la majorité des agriculteurs comme faisant partie des impacts du changement climatique. Au Viêt Nam, les petits agriculteurs sont vulnérables au changement climatique : ceux qui pratiquent un type d'élevage extensif avec peu d'intrants s'avèrent plus fragiles que ceux qui suivent un modèle plus intensif, soutenu par davantage d'investissements en capital. Les vagues de chaleur marine constituent une nouvelle menace pour la pêche et pour l'aquaculture, notamment en ce qui concerne la propagation des maladies. Dans les pays d'Asie du Sud-Est, on prévoit que plus de 30 % des zones aquacoles deviendront impropres à la production d'ici 2050-2070 et que la production aquacole diminuera de 10 % à 20 % d'ici 2050-2070 en raison du changement climatique.

L'Asie du Sud-Est abrite près de 15 % des forêts tropicales de la planète et comprend au moins quatre des vingt-cinq points chauds de biodiversité d'importance mondiale. La région fait également partie des principaux responsables de la disparition des forêts tropicales humides et de basse altitude. Ainsi, entre 1990 et 2010, l'Asie du Sud-Est a enregistré une perte nette moyenne de 1,6 Mha/an (0,6 % par an), réduisant le couvert forestier de la région de 268 Mha à 236 Mha. Compte tenu de ces taux et du fait que plus de 90 % des forêts d'Asie du Sud-Est n'étaient toujours pas protégées au début des années 2010, on craint que plus de 40 % de la biodiversité de la région ne disparaisse d'ici à 2100 (Estoque *et al.*, 2019).

Un grand nombre d'études publiées concerne les impacts prévus du changement climatique sur la production et sur l'économie des grandes cultures : le riz, le maïs et le blé étant les cultures qui bénéficient de la plus grande attention. Le changement climatique a, et continuera d'avoir, un impact significatif sur la production agricole sous diverses manières dans toute l'Asie. Un nombre croissant d'études sous-régionales et régionales mobilisant plusieurs outils de modélisation ont fourni des preuves significatives de l'impact prévu du changement climatique sur la production végétale, avec des indications claires sur les gagnants et les perdants en fonction des pays concernés (figure 4.8).

S'il est généralement admis que le CO₂ favorise la croissance et la productivité des plantes grâce à l'intensification de la photosynthèse, l'incertitude demeure quant à la mesure dans laquelle la fertilisation carbonée influencera la production agricole en Asie. En effet, la nutrition des plantes est sensible à l'augmentation des températures, à

l'évolution de la disponibilité de l'eau et aux différentes mesures d'adaptation employées sur le terrain. Les informations disponibles dans la littérature indiquent une nette tendance à la détérioration de la qualité des grains et donc à une valeur commerciale plus faible pour le riz cultivé dans un environnement à forte teneur en CO₂. À mesure que le réchauffement climatique se poursuivra au-delà de 1,5 °C, la probabilité d'incidences négatives sur la sécurité agricole et alimentaire dans de nombreuses régions asiatiques en développement augmentera. On observe une tendance croissante à la mise en place d'études et de modélisations plus intégrées, qui combinent des variables biophysiques et socio-économiques (y compris les pratiques de gestion) dans un contexte d'évolution du climat, afin de réduire l'incertitude liée aux impacts futurs du changement climatique sur le secteur agricole.

5.3. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Amérique centrale et du Sud

Lilian Blanc, Sylvain Schmitt

5.3.1. Les évolutions du climat en Amérique centrale et du Sud

L'Amérique centrale et du Sud subissent déjà les effets du réchauffement climatique avec l'augmentation des cyclones, des ouragans, des inondations, des sécheresses, de l'élévation du niveau de la mer ou de la disparition des glaciers. Au-delà des conséquences sociales (mouvements migratoires notamment), le changement climatique affecte également l'approvisionnement en eau potable, la production alimentaire (agriculture et élevage) et les écosystèmes naturels de cette région qui contiennent 40 % de la biodiversité mondiale et 25 % des forêts du monde. Le changement climatique pourrait amplifier les émissions nettes de gaz à effet de serre des secteurs de l'agriculture, de la forêt et du changement d'utilisation des terres, responsables respectivement de 25,3 % et 20 % des émissions (Climate Watch, 2022).

5.3.1.1. Température

En Amérique centrale et du Sud, l'augmentation de l'effet de serre entraîne une hausse des températures moyennes et des températures moyennes maximales de 2 °C à 6 °C selon les régions et les scénarios climatiques (figures 4.9 et 4.10), et une diminution des températures extrêmes basses. Le Giec projette avec certitude que ces changements affecteront toutes les sous-régions du continent avec une certitude élevée à forte. De plus, la région présente actuellement des taux d'augmentation des températures supérieurs à la moyenne mondiale, augmentation qui devrait se poursuivre à l'avenir. Il s'agit d'un phénomène avec une forte certitude qui affecte(ra) toutes les sous-régions du continent.

5.3.1.2. Précipitations

Les évolutions des précipitations dans cette région sont moins certaines, mais de nombreux travaux prédisent des augmentations dans le nord-ouest de l'Amérique du Sud et le Sud-Est alors que des diminutions sont prévues dans le Nord-Est et le Sud-Ouest avec des taux très variables selon les scénarios. Ces résultats sont cohérents pour la fin du XXI^e siècle avec les scénarios d'augmentations les plus intenses (figure 4.9). Au-delà des tendances, une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes et des inondations est prévue dans le nord, le nord-est, le sud-est et le sud de l'Amérique du Sud si l'augmentation de la température mondiale dépasse 2 °C (figure 4.9). Ces précipitations extrêmes entraînent de fortes inondations et des

glissements de terrain. Inversement, dans ces régions, le nombre et la fréquence des jours secs et des sécheresses sont également susceptibles d'augmenter. Le sud de l'Amérique centrale, le sud et le sud-ouest de l'Amérique du Sud devraient même connaître une augmentation des sécheresses agricoles et écologiques d'ici le milieu du xxi^e siècle. Enfin, dans la cordillère des Andes, la perte de volume des glaciers et le dégel du permafrost se poursuivront très probablement selon tous les scénarios du Giec, entraînant des inondations glaciaires à grande échelle et le débordement des lacs glaciaires.

5.3.1.3. Feux

La hausse des températures, de l'aridité et les épisodes de sécheresse plus intenses créent des conditions météorologiques propices aux incendies, plus fréquents et plus intenses, comme l'illustrent les récents méga-incendies qui ont touché l'Amazonie. Ces conditions météorologiques propices aux incendies devraient se multiplier dans le sud de l'Amérique centrale et dans le sud-ouest de l'Amérique du Sud. En moyenne, les habitants de la région ont été davantage exposés à un risque élevé d'incendie, entre 1 et 26 jours supplémentaires selon la sous-région, pour les années 2017-2020 par rapport

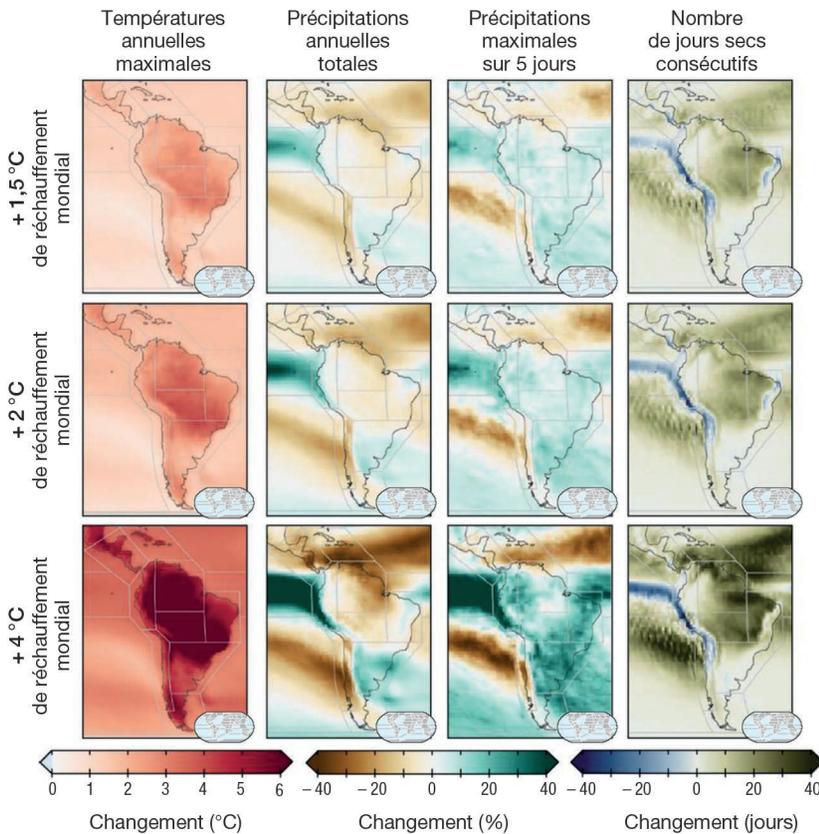


Figure 4.9. Changement des moyennes des températures annuelles maximales et des précipitations en Amérique du Sud et centrale sous trois scénarios d'augmentation de température globale : +1,5°C, +2°C et +4°C par rapport à la période 1850-1900. Source : IPCC AR6 (2022).

Les résultats sont basés sur des simulations de l'ensemble multimodèle CMIP6 (32 modèles mondiaux), en utilisant le scénario SSP5-8.5 pour calculer les niveaux de réchauffement.

à 2001-2004 (Romanello *et al.*, 2021). Cette augmentation des incendies et de l'aridité aura un impact potentiel sur un large éventail de secteurs (notamment l'agriculture, la sylviculture, la santé et les écosystèmes).

5.3.1.4. Niveau marin

Outre la hausse des températures plus importante que la moyenne mondiale en Amérique du Sud, le niveau relatif des mers a augmenté plus rapidement que la moyenne mondiale dans l'Atlantique sud et l'Atlantique nord subtropical, et moins rapidement dans le Pacifique oriental. Cette hausse devrait se poursuivre avec un degré élevé de certitude (figure 4.10), contribuant à l'augmentation des inondations côtières dans les zones de basse altitude et au recul du littoral le long de la plupart des côtes sablonneuses.

5.3.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture et de la forêt en Amérique centrale et du Sud

Cette région joue un rôle majeur à l'échelle mondiale à la fois pour la conservation de la biodiversité (en particulier avec les écosystèmes marins et terrestres en région amazonienne) et pour l'agriculture avec la production de denrées agricoles (bétail, café, banane, sucre, soja, maïs, canne à sucre). Cette région se caractérise également par deux facteurs majeurs qui la rendent particulièrement vulnérable aux changements climatiques. D'une part, les importants changements d'usage des terres (déforestation en région amazonienne) forment avec les changements climatiques une rétroaction positive accentuant ses effets. D'autre part, la région se caractérise par de fortes inégalités sociales (accès au foncier par exemple) et géographiques (urbains *vs* ruraux), avec notamment un pourcentage élevé de la population en dessous du seuil de pauvreté.

Le changement climatique a eu un impact significatif sur les secteurs de productions agricoles dans la plupart des régions avec l'ampleur des changements des précipitations, les températures extrêmes et les changements dans le calendrier. Les cultures, l'élevage, la pêche et les systèmes alimentaires en général ont subi des impacts des changements climatiques moyens à élevés. Dans toutes les régions, des réductions sur la durée de croissance des cultures ont été observées pour les blés (hiver et été), le riz, le maïs et le soja, entre 1981 et 2019. Cette réduction s'élève à 10% pour le riz dans le sud-ouest de l'Amérique du Sud et à 5% pour le maïs en Amérique centrale. La réduction des durées de croissance diminue les rendements.

Pour les trois secteurs de production (cultures annuelles et pérennes, et élevage), on observe cependant de fortes variabilités régionales. Dans le nord-est de l'Amérique du Sud, les épisodes secs, avec de fortes températures et une diminution des précipitations, ont été dommageables à ces trois secteurs agricoles. D'autres régions ont également été touchées comme l'Amérique centrale, le sud-est et le sud-ouest de l'Amérique du Sud (cultures annuelles), et l'extrême sud du continent (élevage). À l'avenir, ces trois secteurs de production seront très affectés dans les régions du nord-est et du nord-ouest, et dans une moindre mesure dans la région du Cerrado (centre du continent). Dans cette région, les rendements du soja et du maïs subiront l'un des impacts négatifs les plus forts selon les estimations des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et nécessiteront des niveaux élevés d'investissements dans l'adaptation s'ils continuent à être cultivés dans les mêmes zones qu'actuellement (confiance élevée).

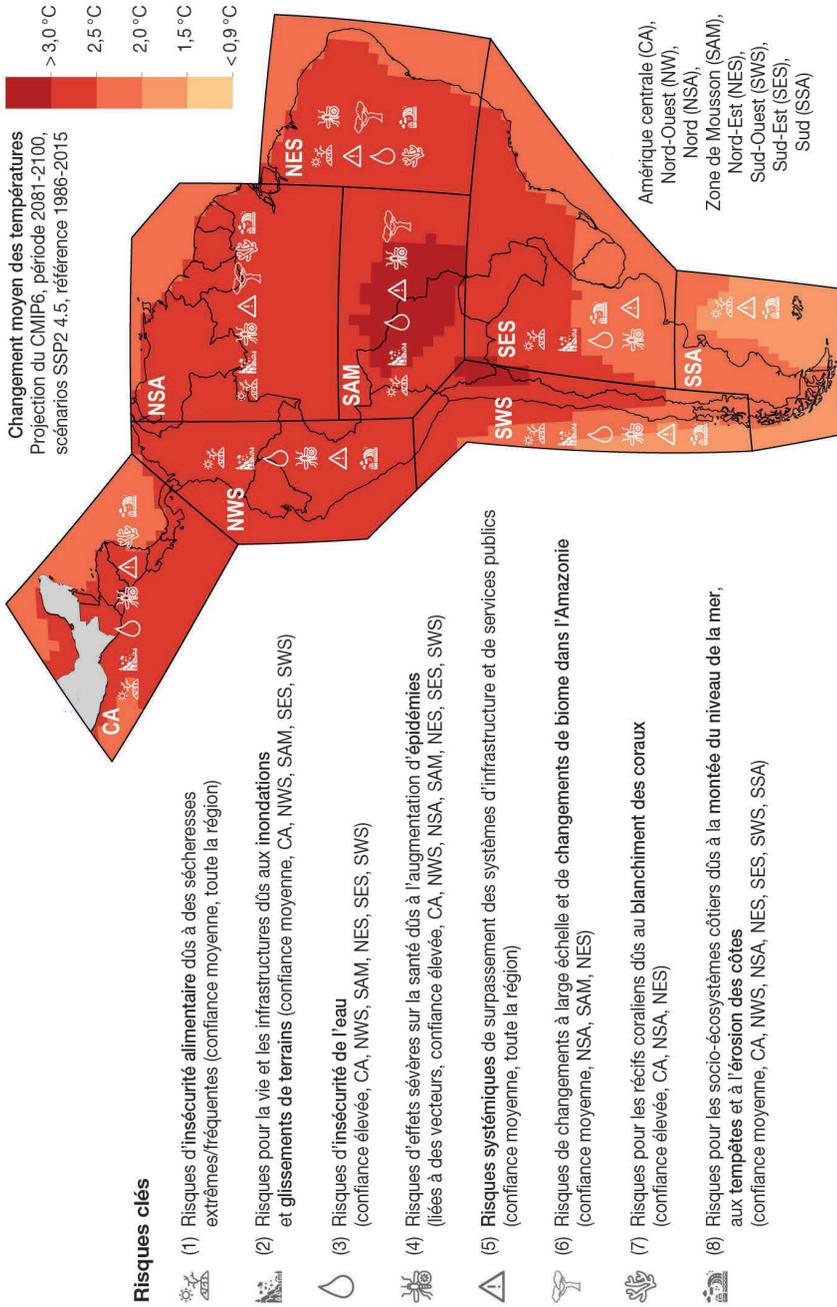


Figure 4.10. Synthèse des principaux risques liés aux changements climatiques pour l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale. Source : IPCC AR6 (2022). La carte de base indique le changement de température moyenne entre le scénario SSP2-4.5 utilisant les projections du modèle CMIP6 pour 2081-2100 et une période de référence de 1986-2015.

En Amérique centrale et dans les contreforts andins, les cultures annuelles seront également très affectées. Ces effets devraient aggraver la situation pour les petits et moyens agriculteurs et pour les populations autochtones dans les zones montagneuses de ces régions. Dans le cadre du scénario A2 (futur avec de fortes émissions de GES entraînant un réchauffement de 3,2 à 5,4 °C avec une croissance économique régionalisée et une forte augmentation de la population), les réductions de rendement en 2050 sont estimées à 19% (haricots) et entre 4% à 21% (maïs) pour l'Amérique centrale. La sécurité alimentaire dans ces deux régions sera donc largement compromise (confiance élevée).

La forêt amazonienne, l'un des plus grands réservoirs de biodiversité et de carbone au monde, a déjà été et continuera d'être très vulnérable à la sécheresse (degré de confiance élevé). La forêt amazonienne a ainsi été fortement touchée par les sécheresses sans précédent et les températures élevées observées en 1998, 2005, 2010 et 2015/2016, qui sont attribuées en partie au changement climatique, provoquant une surmortalité des arbres. Les conséquences de ces fortes anomalies climatiques sont une surmortalité des arbres et une réduction de la productivité forestière à l'échelle du bassin. Ces fortes modifications dans le fonctionnement des forêts transforment momentanément les forêts de puits de carbone à source de carbone (confiance élevée). En outre, l'effet combiné de la déforestation provoquant un changement d'utilisation des terres, de la dégradation forestière (Bourgoin *et al.*, 2024; Le Roux *et al.*, 2022) et du changement climatique augmente la vulnérabilité de ces écosystèmes terrestres aux événements climatiques extrêmes (Phillips *et al.*, 2009; Bennett *et al.*, 2023). Avec ces changements, la probabilité de transition, c'est-à-dire d'une transition de la forêt tropicale vers d'autres systèmes forestiers (forêt saisonnière) ou savanicoles, est désormais évaluée avec un degré de confiance moyen.

5.4. Les évolutions et les impacts du climat prévus dans les petits États et territoires insulaires d'Océanie

Séverine Bouard, Catherine Sabinot, Pierre-François Duyck, Philippe Birnbaum, Audrey Leopold, Julien Drouin, Fabian Carriconde, Laurent L'Huillier, Christophe Menkès

5.4.1. Un équilibre incertain face au changement climatique

Les territoires et pays d'Océanie présentent une grande diversité en matière de géographie, d'histoire géologique, de superficie, de topographie et de conditions climatiques locales. Cependant, cette diversité, à l'origine d'une richesse culturelle, biologique et alimentaire unique, les expose également à une forte vulnérabilité face aux aléas climatiques. Un seul cyclone, une année de sécheresse ou une invasion biologique peut réduire à néant les productions agricoles d'un pays entier et éradiquer de nombreuses espèces endémiques.

Très éloignés les uns des autres, ils ont des superficies très variables³, conduisant Hau'ofa à nommer la région « notre mer d'îles » (2013) (figure 4.11). Situés dans une région du monde géologiquement très active, ces archipels ont des histoires géologiques complexes, conduisant à une diversité conséquente de leurs substrats géologiques et pédologiques. Les pays mélanésiens sont plutôt vastes et montagneux, riches en

3. Superficie de 462 840 km² pour la Papouasie–Nouvelle-Guinée, et de 20 km² pour Nauru.

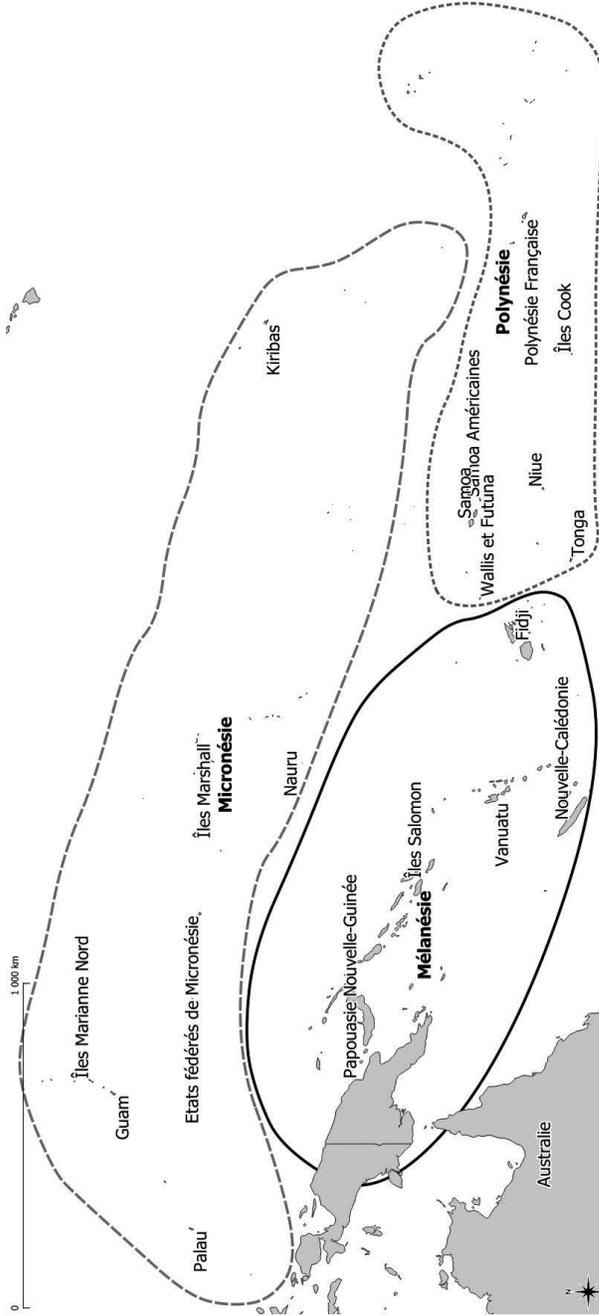


Figure 4.11. Les trois grandes sous-régions du Pacifique sud insulaire.
Source : carte réalisée par Jonas Brouillon, Institut agronomique néo-calédonien (IAC).

ressources minérales, tandis que les îles polynésiennes et micronésiennes varient depuis les petites îles volcaniques aux atolls coralliens. Ces îles possèdent une grande diversité d'écosystèmes terrestres et récifaux, abritant une biodiversité très riche, source de nourriture pour les communautés.

Si les pays insulaires du Pacifique ne représentent que 0,06 % des émissions totales de dioxyde de carbone dans le monde en 2019⁴, ils sont particulièrement touchés par le changement climatique, remettant même en cause leur existence, puisque certains sont menacés de submersion (Kiribati, Tuvalu et les îles Marshall notamment).

5.4.2. L'insularité, un défi géographique qui complexifie les projections climatiques

Dans cet « océan d'îles », les scénarios du futur les plus probables se situent entre le SSP2-4.5 et SSP3-7.0 (IPCC, 2022). Or les modèles climatiques globaux utilisés dans le Pacifique et employés dans les rapports du Giec présentent de nombreux biais et incertitudes, en particulier en ce qui concerne les simulations incertaines de la zone de convergence du Pacifique sud (SPCZ) (Brown *et al.*, 2020) quels que soient les scénarios (figure 4.12).

Ces incertitudes se répercutent sur l'évaluation future d'événements climatiques tels qu'El Niño-Southern Oscillation (ENSO), les cyclones, les canicules, les pluies intenses et les sécheresses. Dans le Pacifique sud, les études prévoient une tendance à la diminution du nombre de cyclones (avec cependant une faible confiance) dans les scénarios considérés comme réalistes, mais sans consensus sur l'intensité des vents cycloniques futurs de ces phénomènes. En revanche, l'intensité des pluies cycloniques va augmenter (Dutheil *et al.*, 2020; Dutheil, 2019; Walsh *et al.*, 2012 et 2020; Knutson *et al.*, 2020). Quels que soient les scénarios, l'augmentation prévue du nombre des canicules, de la durée des vagues de chaleur et des records de température est quasiment certaine (Power et Delage, 2019), mais reste difficile à quantifier en raison des biais des modèles. En effet, les modèles du Giec ne tiennent pas compte des phénomènes locaux résultant de l'interaction avec la topographie complexe des îles, car leur maille est trop grossière, de l'ordre de la centaine de kilomètres (Evans *et al.*, 2024). Ces lacunes compromettent la capacité à estimer de manière fiable l'évolution future des précipitations, des sécheresses et des vagues de chaleur.

Les quelques projections climatiques pour la région, à plus haute résolution, indiquent néanmoins un assèchement général du Pacifique central (Dutheil *et al.*, 2020). Les épisodes pluviométriques extrêmes pourraient augmenter en fréquence passant d'une occurrence tous les vingt ans (période 1986-2005) à un événement tous les dix, voire 4 à 6 ans d'ici 2090, selon certains scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Leur intensité devrait augmenter. Une hausse de 0,5 à 1,3 °C de la température atmosphérique moyenne a été observée sur les îles du Pacifique ouest depuis la période préindustrielle (Whan *et al.*, 2014). Selon les scénarios d'émissions, cette augmentation de la température moyenne pourrait atteindre 2 °C à 3,7 °C d'ici 2090 (figure 4.12). Une élévation du niveau des mers de 20 cm à 120 cm d'ici 2100 est projetée selon les

4. Données de la Banque mondiale Wallis et Futuna qui n'apparaît pas dans cette base de données. Avec l'Australie et la Nouvelle-Zélande, ce chiffre grimpe à 1,3 % en 2023 (<https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.ALL.MT.CE.AR5>). Les chiffres montrent l'importante contribution du secteur minier aux émissions. Avec 6,614 Mt de CO₂ pour 270 000 habitants en Nouvelle-Calédonie contre 3,401 Mt de CO₂ pour 918 000 habitants aux Fidji (dernières données disponibles de 2023).

scénarios, comparativement aux moyennes 1995-2014 (figure 4.12). La montée du niveau de la mer varie considérablement entre les archipels de la région. Surtout, cette élévation observée n'est pas entièrement attribuable à la modification du niveau marin par le changement climatique, car bien des îles du Pacifique subissent aussi un enfoncement tectonique (Martinez-Ascencio *et al.*, 2019). Les îles basses comme Kiribati, Tuvalu et les îles Marshall sont déjà menacées de disparition. Un premier traité bilatéral offrant une voie migratoire aux Tuvaluans vers l'Australie a été signé en novembre 2023. Aux îles Fidji, on observe une augmentation du niveau de la mer proche de 5 mm par an. Cette hausse augmentera ainsi les risques d'inondations côtières et intensifiera l'érosion côtière causée par les cyclones, les houles distantes extrêmes ou les tsunamis.

Projection des modifications moyennes (en %) des précipitations sur la période juin-juillet-août en 2081-2100 par rapport à 1995-2014 selon RCP8.5

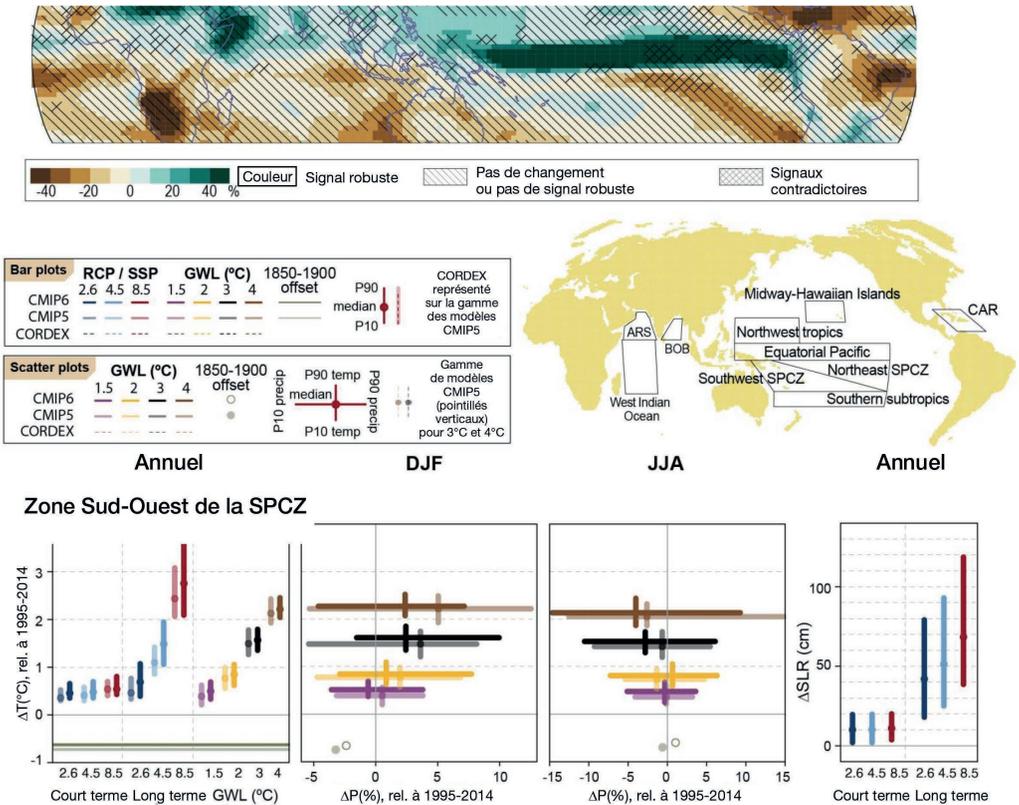


Figure 4.12. Extrait de l'atlas du Giec pour la zone SPCZ.

Panneau du haut, modification moyenne attendue (en%) des précipitations dans le Pacifique tropical, avec en hachuré les zones non significatives (dont la SPCZ). Panneaux du bas : changements moyens de la température annuelle moyenne de l'air en surface, des précipitations et de l'élévation du niveau de la mer par rapport à la ligne de base 1995-2014 dans la zone Southwest SPCZ. Ces évolutions sont données annuellement ou sur une base saisonnière – décembre-janvier-février (DJF), juin-juillet-août (JJA) – pour les différents scénarios (RCP/SSP), mais également pour les niveaux de réchauffement (GWL : Global Warming Level), et pour les exercices CMIP6 et CMIP5 (couleurs). Les barres représentent 90 % des distributions. Source : IPCC (2021).

5.4.3. Une forte dépendance climatique des écosystèmes et des agrosystèmes

Le Pacifique rassemble cinq des trente-six « points chauds de la biodiversité mondiale » et présente une forte endémicité de ses ressources biologiques. Cette dernière est le résultat de l'isolement géographique de ces îles, de la diversité des habitats disponibles et de processus évolutifs spécifiques. Ces territoires abritent de très nombreuses espèces végétales et animales remarquables qui ne se trouvent nulle part ailleurs (Payri et Vidal, 2019). Mais l'élévation du niveau de la mer, les phénomènes météorologiques extrêmes, la modification des températures et les changements des régimes de précipitations menacent les habitats spécifiques de ces espèces.

Une simulation basée sur neuf scénarios de changement climatique prédit que l'aire de répartition de 87 % à 96 % des espèces d'arbres indigènes et endémiques de Nouvelle-Calédonie aura diminué d'ici 2070, que 52 % à 84 % des espèces perdront au moins la moitié de leur aire de répartition actuelle et que 0 % à 15 % disparaîtront (Pouteau et Birnbaum, 2016). Par ailleurs, la fragmentation intensive de ces écosystèmes et les invasions d'espèces exotiques perturberont l'équilibre écologique dans lequel ces espèces endémiques se sont développées. Le changement climatique, en interaction avec l'augmentation des flux de passagers et des échanges commerciaux, change la distribution géographique des ravageurs et des maladies des cultures, mais aussi modifie directement leurs impacts (Bale *et al.*, 2002; Hulme, 2011).

Les îles font face à des menaces multiples sur leurs ressources terrestres (Nurse *et al.*, 2014; Wong *et al.*, 2014) et tout particulièrement sur les sols. Les effets de l'accroissement des températures sont multiples et peuvent affecter leur fertilité et leur santé (Filho *et al.*, 2023). La matière organique des sols (MOS) est cruciale pour la fertilité des sols (voir chapitre 17), mais son stock peut diminuer avec l'augmentation des températures qui favorise la minéralisation de la MOS, affectant la capacité de rétention en eau des sols, leur porosité, et pouvant les rendre plus sensibles à l'érosion. L'intensification des événements pluvieux augmente la déstructuration, la lixiviation (perte d'éléments nutritifs) et l'acidification des sols, tandis que les sécheresses et l'élévation du niveau marin augmentent la salinité, réduisent la disponibilité en eau et favorisent la désertification. Le changement climatique peut aussi modifier la biodiversité des sols. Ainsi, les sols des territoires insulaires étant souvent naturellement peu fertiles (Nouvelle-Calédonie, Pillon *et al.*, 2021) et disposant d'une biodiversité unique (Carriconde *et al.*, 2019), les systèmes agricoles et forestiers pourraient être particulièrement transformés. Si les sols de la région et leur fonctionnement restent très méconnus malgré de récents travaux sur le sujet (comme Carriconde *et al.*, 2019; Demenois *et al.*, 2020; Kulagowski *et al.*, 2021; Leopold *et al.*, 2021), limiter les effets du changement climatique sur les agroécosystèmes pourra se faire en s'appuyant tant sur les savoirs déjà éprouvés par les populations que sur ceux apportés par le monde scientifique. Une dynamique de cocréation de savoirs sera essentielle pour assurer une résilience suffisante des productions agricoles.

5.4.4. Des sociétés insulaires du Pacifique résilientes... mais jusqu'à quel point ?

Les systèmes agricoles des États et territoires insulaires du Pacifique reposent principalement sur des agricultures de types familiales dont la production est destinée majoritairement à la consommation locale. Les cultures alimentaires de base comprennent l'igname, le taro, la patate douce, le manioc, les bananes, les fruits tropicaux et les légumes. Cultiver ces produits aux besoins hydriques contrastés repose sur des

techniques adaptées aux conditions locales, différentes en Mélanésie, en Polynésie et en Micronésie. Les savoirs autochtones associés à ces pratiques sont riches et diversifiés, mais ils sont mis à mal avec les transformations des modes de vie (migrations et réorganisation du travail, etc.), avec la réduction du foncier disponible et avec les nouvelles contraintes climatiques et environnementales. Les systèmes de production en agriculture et élevage pour le marché local et l'export (kava, cacao, épices, canne à sucre, bovins, etc.) sont aussi soumis aux effets du changement climatique. Les changements dans les sols, la gourmandise en eau de ces systèmes, les pressions des ravageurs et maladies mettent en péril les ressources financières des ménages qui en dépendent, ainsi que celles de ces pays aux balances commerciales déjà déséquilibrées. Même les investissements capitalistiques permettant une relative artificialisation des conditions de cultures (serres, cultures hors-sol) sont vulnérables aux événements climatiques les plus violents. Quant à l'élevage, les efforts de tropicalisation des troupeaux bovins, comme en Nouvelle-Calédonie, pourraient rendre ces systèmes de production relativement résilients, mais la gestion des pâturages, encore peu sophistiquée, soumise à la pression des espèces végétales envahissantes, et peu agile face à l'irrégularité de l'allongement et l'intensification des sécheresses, permettra difficilement d'atteindre une production satisfaisant les besoins locaux.

Le changement climatique aura des répercussions significatives sur les systèmes agricoles et alimentaires, avec des conséquences sur la sécurité alimentaire, la santé et le développement économique (Barnett, 2020; McCubbin *et al.*, 2015; Klöck et Fink, 2019). L'intensification des inondations et des sécheresses a des conséquences à court terme — les catastrophes naturelles pouvant détruire des récoltes entières et décimer les cheptels — comme à long terme sur la production alimentaire. Ces phénomènes accélèrent également la perte de terres arables déjà à l'œuvre dans certaines zones en raison de l'érosion côtière, de l'élévation du niveau de la mer et des intrusions salines. Associées aux processus décrits ci-dessus, les superficies cultivées et cultivables risquent de diminuer ainsi que la diversité des plantes adaptées à ces nouveaux climats et milieux.

Cependant, les habitants des archipels du Pacifique ont des expériences locales différentes de la vision scientifique du changement climatique (Fache *et al.*, 2019). Les changements environnementaux et sociaux sont perçus comme très étroitement liés et doivent être traités simultanément (Pascht, 2019). Les habitants ont déjà développé des pratiques et des stratégies de diversification pour limiter les dégâts sur leurs cultures, pour faire face aux pertes, et pour s'adapter aux contraintes environnementales. Les stratégies de subsistance reposant sur la pluriactivité sont particulièrement mises à contribution après les catastrophes naturelles (voir chapitre 5). Se tourner vers le lagon et ses ressources halieutiques est fréquent à la suite de la destruction des cultures et permet d'attendre un nouveau cycle de production lancé juste après l'événement. Toutefois, la fréquence des événements dévastateurs et la transformation concomitante des écosystèmes terrestres, marins et coralliens fragilisent nettement la sécurité offerte par la pluriactivité. Cela soulève des questions sur les risques, les enjeux et la résilience de ces habitants face aux aléas climatiques intenses et pousse à s'interroger sur les politiques locales et globales à mettre en œuvre⁵.

5. Le projet Clipssa, construit sur un partenariat impliquant en particulier l'AFD, l'IRD, Météo-France, l'IAC, le Criobe et les collectivités des territoires d'outre-mer et du Vanuatu, s'intéresse à ces questions : www.clipssa.org.

Les petits États et territoires insulaires du Pacifique, souvent peu considérés par les grands États, alors qu'ils enregistrent les impacts négatifs les plus importants du changement climatique, font face à un besoin urgent et vital de plus de recherches et de données.

5.5. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Europe

Nicolas Viovy

5.5.1. Les évolutions du climat en Europe

5.5.1.1. Température

Le premier effet directement lié à l'effet de serre consécutif à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère est l'augmentation des températures. C'est un phénomène sur lequel on a une large certitude et qui affectera l'ensemble du continent. L'accroissement des températures étant plus rapide sur les continents que sur l'océan, et plus rapide dans les zones tempérées et boréales qu'au niveau des tropiques, cette augmentation des températures sur l'Europe sera plus importante que la moyenne globale. À ce phénomène s'ajoute le fait que les politiques d'amélioration de la qualité de l'air depuis les années 1980, qui ont permis de réduire fortement la pollution, ont réduit la quantité d'aérosols. Or ces aérosols ont un pouvoir refroidissant, leur diminution a ainsi participé à l'augmentation des températures récemment. Ainsi, l'accroissement de la température en France sur la dernière décennie a atteint 1,5°C depuis l'époque préindustrielle (1860) contre 1,1°C en moyenne globale. Si l'on regarde plus en détail la répartition spatiale et saisonnière de l'augmentation de la température future, on constate une augmentation plus importante dans le nord et le centre de l'Europe que dans le Sud pendant l'hiver, alors que cette augmentation sera plus forte sur tout le pourtour méditerranéen pendant l'été. Cette augmentation plus forte dans le Nord et le Centre en hiver est liée à la rétroaction de la neige dont la couverture va fortement diminuer avec l'augmentation des températures. Les surfaces vont ainsi être plus sombres (baisse de l'albédo) et absorber plus d'énergie. L'augmentation des températures dans le Sud durant l'été est liée à une baisse de l'évapotranspiration et donc de son effet refroidissant (les sols étant plus secs). Le changement climatique s'accompagnant d'une augmentation de la variabilité climatique, l'augmentation des températures moyennes combinées à une plus forte probabilité d'événements extrêmes chauds conduira à une forte augmentation des périodes de canicules que l'on constate déjà depuis quelques années (par exemple 2019, 2020, 2022 et 2023).

5.5.1.2. Précipitations

Même si l'incertitude liée au changement des précipitations est plus importante que pour les températures, il se dégage un consensus sur une réponse contrastée entre le sud et le nord de l'Europe. Pendant l'hiver, une large partie de l'Europe devrait voir ses précipitations augmenter, alors qu'elles seront en baisse sur le pourtour méditerranéen. Durant l'été, c'est une plus large part de l'Europe du Sud et une majorité de l'Europe centrale qui devrait voir ses précipitations baisser, alors que de l'Allemagne à la Scandinavie les précipitations devraient augmenter.

5.5.1.3. Événements extrêmes

Pour ce qui est des événements extrêmes, alors même que l'on devrait observer une augmentation des périodes de sécheresses estivales sur une large partie de l'Europe

(excepté l'extrême sud et nord) liée à l'effet combiné des baisses de précipitations estivales et des plus fortes températures, à l'inverse on projette une augmentation des événements de pluie intense (figure 4.13). Ce phénomène s'explique à la fois par l'augmentation des températures océaniques et atmosphériques, qui conduira à une augmentation de l'évaporation, et à l'augmentation de la capacité de l'atmosphère à contenir une plus grande quantité de vapeur. La quantité d'eau précipitable sera alors plus importante pour des conditions météorologiques données. La conséquence indirecte sera alors l'augmentation des fréquences de crues.

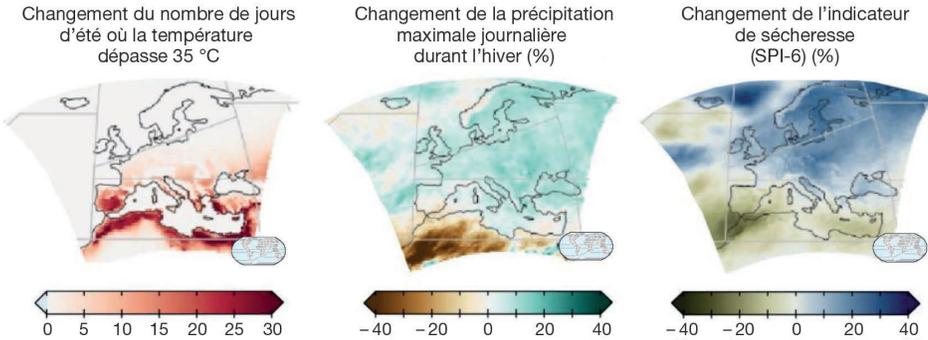


Figure 4.13. Changement des indicateurs de canicule, de pluie intense et de sécheresse à l'horizon 2050 pour l'Europe. Source : IPCC AR6 (2022).

5.5.1.4. Vents

Il n'y a pas de tendance nette qui se dégage au niveau du risque de tempêtes. Alors même que leur fréquence ne devrait pas augmenter, il est possible qu'une augmentation de leur intensité se produise, liée en particulier à l'accentuation des contrastes thermiques entre l'océan et les continents. Cela reste toutefois hypothétique et il est donc difficile de conclure sur l'évolution du risque de tempête.

5.5.1.5. Niveau marin

L'augmentation des températures a un impact sur la montée du niveau des mers liée à la fonte des calottes polaires et à la dilatation des océans en lien avec l'augmentation de la température (la proportion de ces deux facteurs étant, à l'heure actuelle, à peu près équivalente). Cela concerne l'ensemble des zones côtières européennes. En raison de la grande inertie de l'océan, la montée des eaux continuera, même si l'on parvient à stabiliser le CO₂ atmosphérique, et même bien après que celui-ci commencera à diminuer. Le niveau marin a augmenté d'environ 23 cm depuis 1880 et devrait gagner encore 30 cm d'ici à 2050 (IPCC, 2013). L'effet sera surtout sensible lors des épisodes de tempêtes combinés à de fortes marées qui augmenteront les probabilités de submersion. Il contribuera également à accentuer l'érosion côtière.

5.5.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Europe

L'effet du changement climatique sera contrasté en particulier entre le sud et le nord de l'Europe. La combinaison de l'accroissement des températures et de la baisse des précipitations estivales, en particulier dans le sud de l'Europe, va conduire à une

augmentation des périodes de sécheresse agricole particulièrement sensible sur le pourtour méditerranéen. Cela va avoir pour conséquence une augmentation du stress hydrique et également du stress thermique pendant la période estivale, qui affectera l'ensemble des secteurs agricoles. À l'inverse, l'augmentation des températures permettra un démarrage plus précoce du cycle végétatif et un allongement de ce dernier. L'impact sera donc contrasté, à la fois selon le type de culture et les régions (figure 4.14). Avec les pratiques agricoles actuelles, les cultures d'hiver comme le blé — ce dernier étant assez peu sensible à la sécheresse estivale, mais pouvant profiter d'un démarrage plus précoce — devraient voir leur rendement augmenter dans le nord de l'Europe, alors qu'elles devraient légèrement diminuer dans le Centre et le Sud. De même, le soja, excepté dans le scénario le plus pessimiste, devrait pouvoir être cultivé sur une large partie de l'Europe, là où il reste cantonné à une limite de 50° N actuellement. Seule l'Espagne verrait ses rendements baisser. En revanche, le maïs, très gourmand en eau et poussant durant l'été, ne pourrait voir ses rendements maintenus sur une large partie de l'Europe qu'au prix d'une forte augmentation de l'irrigation qui semble difficilement atteignable et qui amènerait à une forte tension d'usage sur la ressource en eau, déjà perceptible aujourd'hui. En matière d'adaptation, de nouvelles cultures, comme le sorgho à destination de l'alimentation animale, nécessitant moins d'eau et bien adaptées aux fortes températures, pourraient être amenées à se développer en particulier dans le sud et le centre de l'Europe. L'accroissement des périodes de canicules et de sécheresses va également fortement affecter le secteur forestier, où l'on observe déjà un accroissement des dépérissements, en particulier pour des essences comme le douglas ou le hêtre, très sensibles au stress hydrique.

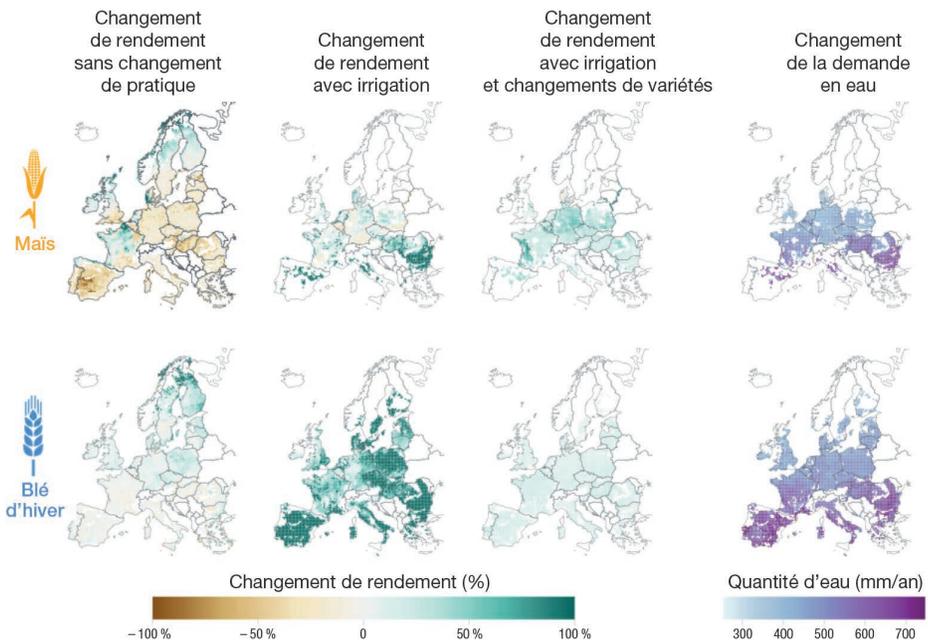


Figure 4.14. Changement des rendements du blé et du maïs en Europe pour les pratiques actuelles et en prenant en compte des adaptations avec les demandes en eau associées pour un scénario d'accroissement de température de 2°C. Source : Bednar-Friedl *et al.* (2022).

Les sécheresses et les canicules augmentent également fortement le risque d'incendie qui deviendra alors possible sur une large partie de l'Europe. On a ainsi connu, en 2022, un incendie important en forêt armoricaine, ce qui n'était jamais arrivé auparavant. Pour le secteur de l'élevage, les sécheresses diminueront la production fourragère estivale. Ce phénomène pourrait cependant être en partie compensé par une croissance plus précoce au printemps et une possibilité de faire paître les troupeaux plus tôt et de réaliser des stocks fourragers d'été, alors qu'ils étaient habituellement destinés à la période d'hiver qui au contraire va se réduire. Mais l'accroissement des canicules posera également un problème direct pour le bétail. La fermentation entérique des ruminants étant exothermique, ces derniers sont très sensibles aux fortes températures, les obligeant à réduire le broutage par forte chaleur, réduisant d'autant la production de viande ou de lait.

Un autre phénomène lié à l'augmentation des températures est paradoxalement l'augmentation du risque de gelée en début de cycle végétatif. En effet, bien que les dates de dernières gelées soient de plus en plus précoces, l'avancée du cycle végétatif liée à l'augmentation des températures hivernales est plus rapide que celle de la période des dernières gelées, augmentant ainsi le risque qu'une gelée survienne dans les phases critiques de débourrement et de floraison. La vigne et les fruitiers précoces sont à ce titre les plus vulnérables.

5.5.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

On estime que l'agriculture est responsable de 11,4% des émissions de gaz à effet de serre au niveau européen, sur un total de 3,31 milliards de t eqCO₂. La part des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole émises varie d'un état membre à un autre. La France est ainsi le pays qui émet le plus dans ce secteur, avec 85 Mt de CO₂, suivie par l'Allemagne (66 Mt) et la Pologne (57 Mt). Ces émissions sont liées à différents facteurs. Il y a bien sûr les émissions de CO₂ liées à la consommation de carburant sur l'ensemble de la ferme et pour la fabrication des intrants et des produits phytosanitaires, mais une grande part des émissions est également liée aux émissions de méthane (CH₄) produit par les ruminants et de protoxyde d'azote (N₂O) lié aux engrais. Les émissions de CH₄ sont estimées à 5 Mt et celles de N₂O à 660 Mt. Comme évoqué dans l'introduction, bien que ces émissions soient faibles, le potentiel de réchauffement global du CH₄ et du N₂O est beaucoup plus important que celui du CO₂. Mais la durée de vie de ces différentes molécules est aussi à prendre en compte. Les pratiques agricoles affectent également le bilan de CO₂ par la modification du carbone du sol. Pour la France par exemple (la situation étant proche dans le reste de l'Europe), les zones de grandes cultures ont déjà perdu une grande partie du carbone du sol et continuent à être une très légère source de carbone de 0,06 t eqCO₂/ha/an. Mais l'agriculture peut également participer à la séquestration du carbone dans les sols et donc à l'atténuation du changement climatique. En France, les sols prairiaux et de forêts ont des contenus en carbone du sol importants (respectivement 84 t/ha et 81 t/ha) et représentent un puits de carbone (de 0,37 à 0,80 t eqCO₂/ha/an pour les prairies, et de 1,60 à 5,06 t eqCO₂/ha/an pour les forêts suivant les études) (Rapport EFSE, 2019; Rapport INRAE, 2020). De ce fait, il est surtout important de maintenir les stocks existants en prairies et en forêts. Ainsi, la reforestation, liée en particulier à l'abandon d'anciennes terres agricoles sur les dernières décennies (+9% en trente ans), a contribué à faire du continent un puits de carbone (hors émissions anthropiques).

De façon générale, les grandes cultures, du fait de leur faible quantité de carbone dans les sols, offrent un potentiel de stockage important. Les pistes les plus prometteuses sont l'agroécologie, l'utilisation de cultures intermédiaires et la reconstitution des haies (Rapport INRAE, 2020). Même si les réalisations concrètes sont encore très peu développées (par rapport aux États-Unis par exemple), l'approche européenne est beaucoup plus systémique. En effet, les solutions fondées sur la nature doivent suivre les recommandations de l'UICN en prenant en compte l'impact des solutions proposées sur l'ensemble des services écosystémiques.

5.6. Les évolutions et les impacts du climat prévus en Amérique du Nord

Nicolas Viovy

5.6.1. Les évolutions du climat en Amérique du Nord

5.6.1.1. Température

L'augmentation de la température affectera l'ensemble du continent nord-américain (Lee *et al.*, 2021) (figure 4.15). Cette augmentation des températures sur l'Amérique du Nord sera plus importante que la moyenne globale. En étudiant plus en détail la répartition spatiale et saisonnière de l'augmentation de la température future, on constate une augmentation qui s'accroît avec la latitude et qui sera également plus importante au centre du continent que sur les zones côtières. Cette augmentation plus forte dans le Nord et le Centre en hiver est liée à la rétroaction de la neige, dont la couverture va fortement diminuer avec l'augmentation des températures. Les surfaces vont ainsi être plus sombres et absorber plus d'énergie. Cela explique également le fait que l'augmentation des températures sera particulièrement forte en hiver dans la partie nord du continent. Dans le scénario d'une augmentation moyenne mondiale de 4 °C par rapport à l'ère préindustrielle, l'augmentation des températures d'été deviendrait également

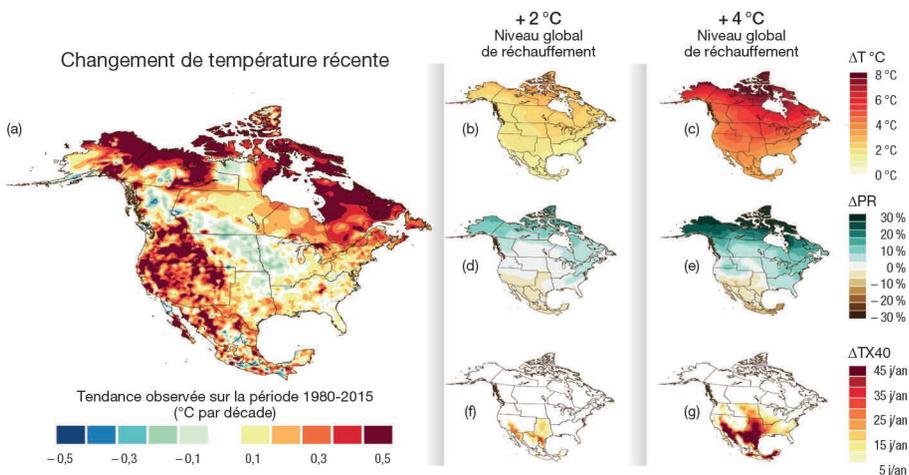


Figure 4.15. Changement climatique observé et projeté pour l'Amérique du Nord. Source : Hicke *et al.* (2022).

(a) Tendances observées des températures de 1980 à 2015; (b et c) changements de température pour des scénarios +2 °C et +4 °C (ΔT); (d et e) changements des précipitations (ΔPR); (f et g) changements du nombre de jours avec une température de plus de 40 °C (ΔTX_{40}) (Hsiang *et al.*, 2017).

très importante. Le changement climatique s'accompagnant d'une augmentation de la variabilité climatique, l'augmentation des températures moyennes combinée à une plus forte probabilité d'événements extrêmes chauds conduira à une forte augmentation des périodes de canicules. Cette augmentation des températures et des canicules va induire une augmentation du risque d'incendie en particulier dans la zone boréale. Les incendies de 2023 au Canada ont par exemple détruit 17 Mha. Aux États-Unis, c'est la partie centrale ouest qui devrait connaître les plus fortes augmentations, aussi bien dans la partie sud (comme l'Arizona ou le Texas) que plus au nord (dans le Montana et le Dakota). En outre, l'accroissement du nombre de jours où la température dépassera les 40°C au Texas ou en Arizona par rapport à la période historique pourrait atteindre une trentaine de jours par an (Lee *et al.*, 2021). L'augmentation moyenne des températures étant plus forte dans les hautes latitudes qu'aux tropiques, cette dernière sera encore plus marquée au Canada qu'aux États-Unis. En particulier, on peut s'attendre à une diminution importante du gel des sols, des lacs et des rivières, avec des conséquences sur la stabilité des sols par exemple (liée à la fonte du pergélisol) ou sur la modification des systèmes de transport (l'installation de campements ou de routes temporaires sur les lacs gelés devenant impossible).

5.6.1.2. Précipitations

Même si l'incertitude liée au changement des précipitations est plus importante que pour les températures, les tendances qui se dégagent sont une augmentation des précipitations d'hiver, forte dans le Nord, modérée au Centre, mais une forte baisse des précipitations sur la Californie, l'Arizona et le Nouveau-Mexique. Pendant l'été, les précipitations devraient augmenter dans le Nord, mais au contraire baisser dans le Centre. Au Canada, les précipitations devraient en moyenne augmenter, en particulier dans le Nord.

5.6.1.3. Événements extrêmes

En ce qui concerne les événements extrêmes, on devrait observer une augmentation des périodes de sécheresses estivales, en particulier sur l'ensemble de la partie centrale à l'ouest des États-Unis en cohérence avec les zones de canicules, liées à l'effet combiné des baisses de précipitations estivales et des plus fortes températures. À l'inverse, les modélisateurs du Giec projettent une augmentation des événements de pluie intense (Lee *et al.*, 2021), qui devrait être particulièrement marquée dans la partie nord-ouest et nord-est du continent avec comme conséquence indirecte une augmentation des fréquences de crues. Ce phénomène s'explique à la fois par l'augmentation des températures océaniques et atmosphériques, qui conduira à une augmentation de l'évaporation, et par l'augmentation de la capacité de l'atmosphère à contenir une plus grande quantité de vapeur. La quantité d'eau précipitable sera alors plus importante pour des conditions météorologiques données.

5.6.1.4. Vents

Les États-Unis sont soumis à de fréquentes tornades. S'il est difficile d'estimer si leur nombre ou leur intensité risquent d'augmenter, il est en revanche très clair que l'on constate un déplacement du « couloir des tornades » vers l'est du continent, ce qui devrait s'amplifier dans le futur. Cela peut être mis en lien avec l'assèchement de la partie centre ouest énoncée plus haut. De même, le sud-est des États-Unis, la Floride en particulier, peut être touché par les ouragans. Or, s'il n'y a pas de tendance qui se dégage sur un changement de fréquence des ouragans, on projette une augmentation

de leur intensité. De même, l'accroissement des températures océaniques devrait conduire à une remontée plus au nord des cyclones, ce qui pourrait aussi affecter le nord de la côte est.

5.6.2. Les conséquences du changement climatique sur les différents secteurs de l'agriculture en Amérique du Nord

L'effet du changement climatique sera contrasté entre l'est et l'ouest du continent. À l'Est, le changement climatique devrait conduire à une baisse de rendement notable ainsi que plus généralement dans le Sud, alors qu'à l'Ouest certaines zones pourraient voir leur rendement augmenter (figure 4.16). Il est à noter cependant que ce sont précisément les grandes plaines agricoles du Midwest, dont la Corn Belt, qui devraient être fortement affectées, alors que les zones où les rendements pourraient augmenter ne sont pas actuellement des zones de cultures importantes. Cette vision globale masque en fait une large disparité en fonction du type de culture. Le maïs, particulièrement sensible à la sécheresse estivale du fait d'une forte demande en eau et d'un développement en plein été, sera le plus affecté. Le soja, qui est également une culture d'été, sera également négativement impacté cependant un peu moins que le maïs. En revanche, le blé, qui arrive à maturité avant les périodes de sécheresse, devrait profiter d'une levée plus précoce et ainsi voir son rendement augmenter. Le maintien de la culture du maïs nécessiterait un fort accroissement de l'irrigation, mais au prix d'une augmentation des volumes d'eau disponibles qui accentuerait encore les fortes tensions sur la ressource en eau déjà très contrainte. Le changement climatique va aussi durement affecter le secteur des forêts sur l'ensemble du continent nord-américain, à la fois par les risques d'incendie accrus et aussi par le changement des aires de répartition des espèces. Dans le centre, l'accroissement des périodes de canicules et de sécheresses va fortement affecter le secteur forestier, où l'on observe déjà un accroissement des dépérissements. Seules les zones côtières du Nord, peu limitées en eau et profitant d'un allongement de la période végétative, devraient au contraire profiter du changement climatique. Pour le secteur de l'élevage, les sécheresses diminueront la production fourragère estivale. Comme en Europe, ce phénomène pourrait cependant être en partie compensé par une croissance plus précoce au printemps et une possibilité de faire paître les troupeaux plus tôt. Mais l'accroissement des canicules posera également un problème direct pour le bétail. La fermentation entérique

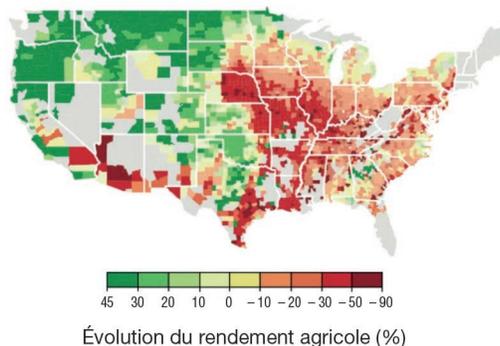


Figure 4.16. Évolution du rendement agricole (toutes cultures confondues) projeté entre 2080-2099, sous un scénario RCP8. Source : Hsiang *et al.* (2017).

des ruminants étant exothermique, ces derniers sont très sensibles aux fortes températures, les obligeant à réduire le broutage par forte chaleur réduisant d'autant la production de viande ou de lait.

Un autre phénomène lié à l'augmentation des températures est, paradoxalement, l'augmentation du risque de gelée en début de cycle végétatif. En effet, bien que les dates de dernières gelées soient de plus en plus précoces, l'avancée du cycle végétatif liée à l'augmentation des températures hivernales est plus rapide que celle de la période des dernières gelées, augmentant ainsi le risque qu'une gelée survienne dans les phases critiques de débourrement et de floraison. Par conséquent, comme sur le continent européen, la vigne et les fruitiers précoces sont à ce titre les plus vulnérables.

5.6.3. Contribution du secteur agricole au bilan des gaz à effet de serre

Le département pour l'Agriculture des États-Unis (United States Department of Agriculture ou USDA) estime que l'agriculture est responsable de 11 % des émissions de gaz à effet de serre aux États-Unis et de 8 % au Canada, sur un total d'environ 6,6 milliards de tonnes équivalent CO₂. Ce pourcentage d'émissions lié à l'agriculture est proche du chiffre européen (9 %). Les émissions par kilogramme produit sont par exemple autour de 30 kg eqCO₂/kg pour les bovins (en poids carcasse et non en poids vif) contre 0,2 kg pour les céréales en moyenne sur l'ensemble du continent (données FAOSTAT 2022⁶). Les émissions de GES du secteur agricole par habitant sont beaucoup plus importantes en Amérique du Nord qu'en Europe) (1,2 t eqCO₂ aux États-Unis, 1,5 t eqCO₂ au Canada, contre 0,87 t eqCO₂ en Europe (données Climate watch 2024⁷). Cela est dû à la fois au ratio entre la production végétale et animale (la production animale étant beaucoup plus émettrice), mais également à la quantité produite par habitant, plus importante en Amérique du Nord (autour de 2,9 t/hab. contre environ 2,3 t/hab. en Europe). Ces émissions sont liées à différents facteurs. Il y a bien sûr les émissions de CO₂ liées à la machinerie, la fabrication des intrants et des produits phytosanitaires, mais une grande part des émissions est également liée aux émissions de méthane (CH₄) produites par les ruminants et les rizières, et de protoxyde d'azote (N₂O), pour la fabrication et l'utilisation des engrais chimiques. Les émissions annuelles pour les États-Unis sont estimées à 20 Mt pour le CH₄ et 930 Mt pour le N₂O. Bien que ces émissions soient faibles, le potentiel de réchauffement global du CH₄ et du N₂O étant beaucoup plus important que celui du CO₂ (28 fois pour le CH₄, 273 fois pour le N₂O), leur effet sur le bilan radiatif est très important. Il est aussi important de garder en tête la durée de vie de ces différentes molécules dans l'air. Le CH₄ a une durée de vie d'environ dix ans; cette durée n'est pas négligeable, mais moins problématique que celle du N₂O qui est de 120 ans. Les pratiques agricoles affectent également le bilan de CO₂ par la modification du carbone du sol. De ce fait, il est surtout important de maintenir les stocks existants en prairies et en forêts. Même si les pratiques agricoles ne sont pas en cause, les méga-incendies des dernières années dans l'ouest du continent ont détruit de grandes surfaces de forêts. À titre d'exemple, les méga-incendies de 2023 au Canada ont émis 431 Mt de carbone (contre 59 Mt en moyenne chaque année), et d'importants programmes de reforestation sont prévus aux États-Unis qui devraient permettre

6. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/cc09fbbc-eb1d-436b-a88a-bed42a1f12f3/content>.

7. <https://www.climatewatchdata.org/>.

de reconstituer une partie des stocks. La reforestation non pilotée (c'est-à-dire liée à l'abandon d'anciennes terres agricoles sur les dernières décennies), même si elle est beaucoup plus faible qu'en Europe par exemple, a partiellement contribué à faire du continent un puits de carbone (hors émissions anthropiques).

6. Références bibliographiques

- ASEAN State of Climate Change Report (ASCCR), 2021. Jakarta, ASEAN Secretariat, October https://asean.org/wp-content/uploads/2021/10/ASCCR-e-publication-Correction_8-June.pdf
- Baccini A., Goetz S., Walker W., *et al.*, 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim Change*, 2, 182-185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Bale J.S., Masters G.J., Hodkinson I.D., Awmack C., Bezemer T.M., Brown V.K., *et al.*, 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores, *Global Change Biology*, 8(1): 1-16.
- Barnett J., 2020. Climate Change and Food Security in the Pacific Islands. In: Connell J., Lowitt K., (eds), *Food Security in Small Island States*, Springer Singapore, 25-38.
- Bednar-Friedl B., Biesbroek R., Schmidt D.N., Alexander P., Børsheim K.Y., Carnicer J., *et al.*, 2022. Europe. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 1817-1927. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.015>
- Bennett A.C., Rodrigues de Sousa T., Monteagudo-Mendoza A., *et al.*, 2023. Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. *Nat. Clim. Chang.*, 13, 967-974. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01776-4>
- Bourgoin C., Ceccherini G., Girardello M., *et al.* 2024. Human degradation of tropical moist forests is greater than previously estimated. *Nature*, 631, 570-576. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07629-0>
- Brouziyne Y., El Bilali A., Epule Epule T., Ongoma V., Elbeltagi A., Hallam J., *et al.*, 2023. Towards Lower Greenhouse Gas Emissions Agriculture in North Africa through Climate-Smart Agriculture: A Systematic Review. *Climate*, 11, 139.
- Brown J.R., Brierley C.M., An S.-I., Guarino M.-V., Stevenson S., Williams C.J.R., *et al.*, 2020. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models, *Climate of the Past*, 16(5): 1777-1805.
- Carriconde F., Gardes M., Bellanger J.-M., Letellier K., Gigante S., Gourmelon V., *et al.*, 2019. Host effects in high ectomycorrhizal diversity tropical rainforests on ultramafic soils in New Caledonia, *Fungal Ecology*, 39, 201-212.
- Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions, *Nature Food*, 2(3) : 198-209.
- Demenois J., Merino-Martín L., Fernandez Nuñez N., Stokes A., Carriconde F., 2020. Do diversity of plants, soil fungi and bacteria influence aggregate stability on ultramafic Ferralsols? A metagenomic approach in a tropical hotspot of biodiversity, *Plant and Soil*, 448(1-2): 213-229. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04364-8>
- Dutheil C., Bador M., Lengaigne M., Lefèvre J., Jourdain N.C., Vialard J., *et al.*, 2019. Impact of surface temperature biases on climate change projections of the South Pacific Convergence Zone, *Climate Dynamics*, 53(5-6): 3197-3219.
- Dutheil C., Lengaigne M., Bador M., Vialard J., Lefèvre J., Jourdain N.C., *et al.*, 2020. Impact of projected sea surface temperature biases on tropical cyclones projections in the South Pacific, *Scientific Reports*, 10(1): 4838.
- Estoque R.C., Ooba M., Avitabile V., *et al.*, 2019. The future of Southeast Asia's forests. *Nat Commun*, 10, 1829. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09646-4>
- Evans J.P., Belmadani A., Menkes C., *et al.*, 2024. Higher-resolution projections needed for small island climates. *Nat. Clim. Chang.*, 14, 668-670. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02028-9>

Fache E., Dumas P., N'Yeurt A.D.R., 2019. Introduction. Synthèse interdisciplinaire de quelques discours et réponses liés au climat dans le Pacifique, *Journal de la société des océanistes*, (149) : 199-210.

FAO, 2020. Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018, FAOSTAT Analytical Brief Series No 18, Rome, FAO. <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>

FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>

FAO, 2024. Greenhouse gas emissions from agrifood systems – Global, regional and country trends, 2000-2022. *FAOSTAT Analytical Brief Series*, No. 94, Rome.

Fischer G., Shah M.N., Tubiello F., Van Velhuizen H., 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067-2083.

Hau'ofa E., 2013. *Notre mer d'îles*, Pacific Islanders éditions, 40 p.

Hicke J.A., Lucatello S., Mortsch L.D., Dawson J., Domínguez Aguilar M., Enquist C.A.F., *et al.*, 2022. North America. *In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1929-2042. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.016>

Hsiang S., Kopp R., Jina A., Rising J., Delgado M., Mohan S., *et al.*, 2017. Estimating economic damage from climate change in the United States, *Science*, 356.6345: 1362-1369. <https://doi.org/10.1126/science.aal4369>

Hulme P.E., 2011. *Biosecurity: the changing face of invasion biology, in Fifty years of invasion ecology: the legacy of Charles Elton*, Wiley Oxford, 73-88. <https://doi.org/10.1002/9781444329988.ch23>

Idris N.H., Munadi M.H.F., Zheng Yong C., Lee B.Y., Vignudelli S., 2023. Sea-level rise in Southeast Asia: a review of the factors, and the observed rates from tide gauge, satellite altimeters and assimilated data techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2282408>

IPCC, 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I. Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (eds.). Cambridge University Press, 364 p.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. *In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

IPCC, 2014. Summary for policymakers. *In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1-32.

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Klöck C., Fink M., 2019. *Dealing with climate change on small islands: Toward effective and sustainable adaptation*, Universitätsverlag Göttingen, 337 p.

Knutson T., Camargo S.J., Chan J.C., Emanuel K., Ho C.-H., Kossin J., *et al.*, 2020. Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3): E303-E322.

Kulagowski R., Thoumazeau A., Leopold A., Lienhard P., Boulakia S., Metay A., *et al.*, 2021. Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia, *Soil and Tillage Research*, 212:105079. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105079>

- Leal Filho W., Nagy G.J., Setti A.F.F., Sharifi A., Donkor F.K., Batista K., Djekic I., 2023. Handling the impacts of climate change on soil biodiversity, *Science of The Total Environment*, 869:161671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161671>
- Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J.P., Engelbrecht F., *et al.*, 2021. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. *In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 553-672. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Léopold A., Drouin J., Drohnu E., Kaplan H., Wamejonengo J., Bouard S., 2021. Fire-fallow agriculture in Mare Loyalty Island: A sustainable cropping system for maintaining organic carbon in Gibbsic Ferralsol (New Caledonia, South West Pacific). *Regional Environmental Change*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01814-x>
- Le Roux R., Wagner F., Blanc L., *et al.*, 2022. How wildfires increase sensitivity of Amazon forests to droughts. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3d>
- Martínez-Asensio A., Wöppelmann G., Ballu V., Becker M., Testut L., Magnan A.K., Duvat V.K.E., 2019. Relative sea-level rise and the influence of vertical land motion at Tropical Pacific Islands, *Global and Planetary Change*, 176, 132-143.
- McCubbin S., Smit B., Pearce T., 2015. Where does climate fit? Vulnerability to climate change in the context of multiple stressors in Funafuti, Tuvalu. *Global Environmental Change*, 30, 43-55.
- Mishra S., Page S.E., Cobb A.R., *et al.*, 2021. Degradation of Southeast Asian tropical peatlands and integrated strategies for their better management and restoration. *J Appl Ecol.*, 58: 1370-1387. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13905>
- Nurse L.A., McLean R.F., Agard J., Briguglio L.P., Duvat-Magnan V., Pelesikoti N., *et al.*, 2014. Small islands, *In: Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA, 1-32. 1613 p.
- Panthou G., Lebel T., Vischel T., Quantin G., Sane Y., Ba A., *et al.*, 2018. Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13(6), p.064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>
- Pascht A., 2019. Klaemet jenj worlds. Approaching climate change and knowledge creation in Vanuatu, *Journal de la société des océanistes*, (149) : 235-244.
- Payri C., Vidal E., 2019. *Biodiversity, a pressing need for action in Oceania, Noumea*, Presses universitaires de la Nouvelle-Calédonie, 64 p.
- Phillips O.L., Aragão L., Fisher J.B., *et al.* 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323: 1344-1347. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1164033>
- Pillon Y., Jaffré T., Birnbaum P., Bruy D., Cluzel D., Ducouso M., *et al.*, 2021. Infertile landscapes on an old oceanic island: the biodiversity hotspot of New Caledonia, *Biological Journal of the Linnean Society*, 133(2): 317-341.
- Pouteau R., Birnbaum P., 2016. Island biodiversity hotspots are getting hotter: vulnerability of tree species to climate change in New Caledonia, *Biological Conservation*, 201, 111-119.
- Power S.B., Delage F.P.D., 2019. Setting and smashing extreme temperature records over the coming century. *Nat. Clim. Chang.* 9, 529-534. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0498-5>
- Rapport EFESE, 2019. La séquestration de carbone par les écosystèmes en France, ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9ma%20-%20La%20sequestration%20de%20carbone%20par%20les%20ecosysteme.pdf>
- Rapport INRAE, 2020. Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>
- Rapport UNEP, 2005. <https://reliefweb.int/map/world/africa-change-potential-cereal-output-2080>
- Romanello M., McGushin A., Di Napoli C., *et al.*, 2021. The 2021 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change. *The Lancet*, 398(10311), 1619-1662. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6)

- Rosenzweig C., Mbow C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., *et al.*, 2020. Climate change responses benefit from a global food system approach, *Nature Food*, 1(2): 94-97.
- Sanderman J., Hengl T., Fiske G., 2017. The soil carbon debt of 12,000 years of human land use, *PNAS*, 114(36): 9575-9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Savadogo M., Somda J., Seynou O., Zabré S., Nianogo A.J., 2011. Catalogue des bonnes pratiques d'adaptation aux risques climatiques au Burkina Faso. Ouagadougou, Burkina Faso: UICN Burkina Faso. https://www.bretagne-solidaire.bzh/wp-content/uploads/sites/11/2020/03/cataloguerisques-climatiques_compressed-1.pdf
- Shaw R., Luo Y., Cheong T.S., Abdul Halim S., Chaturvedi S., Hashizume M., Insarov G.E., *et al.*, 2022. Asia. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1457-1579. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.012>
- Sonobe T., Buchoud N.J.A., Akbar R., Altansukh B., 2024. *Transforming ASEAN Strategies for Achieving Sustainable and Inclusive Growth*. Asian Development Bank Institute, 246 p. <https://doi.org/10.56506/FYUK6909>
- Tangang F., Chung J.X., Juneng L., *et al.*, 2020. Projected future changes in rainfall in Southeast Asia based on CORDEX-SEA multi-model simulations. *Clim Dyn*, 55, 1247-1267. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05322-2>
- Trisos C.H., Adelekan I.O., Totin E., Ayanlade A., Efitre J., Gameda A., Kalaba K., *et al.*, 2022. Africa. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1285-1455. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.011>
- Tubiello F.N., Karl K., Flammini A., Gütschow J., Obli-Laryea G., Conchedda G., *et al.*, 2022. Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems, *Earth System Science Data*, 14(4): 1795-1809.
- Walsh K.J., McInnes K.L., McBride J.L., 2012. Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific—A regional assessment, *Global and Planetary Change*, 80, 149-164.
- Walsh M., Backlund P., Buja L., DeGaetano A., Melnick R., Prokopy L., *et al.*, 2020. *Climate Indicators for Agriculture*, USDA Technical Bulletin 1953. Washington, DC, 70 p. <https://doi.org/10.25675/10217/210930>
- Whan K., Alexander L., Imielska A., McGree S., Jones D., Ene E., *et al.*, 2014. Trends and variability of temperature extremes in the tropical Western Pacific, *International journal of Climatology*, 34(8): 2585-2603.
- Wong P.P., Losada I.J., Gattuso J.-P., Hinkel J., Khattabi A., McInnes K.L., *et al.*, 2014. Coastal systems and low-lying areas, *Climate change*, 2104, 361-409.

Partie 2

Les systèmes agricoles et alimentaires, et le secteur des terres : contributeurs et victimes du changement climatique

Chapitre 5

Les agricultures familiales face au changement climatique : un potentiel d'adaptation par l'agroécologie

Jean-Michel Sourisseau, Jean-François Le Coq

Si les enjeux du changement climatique pour l'agriculture sont relativement connus, peu de travaux analysent en profondeur ou de manière systématique l'importance et les implications des formes et des structures de production — depuis les agricultures familiales jusqu'aux firmes capitalistiques — sur les liens entre agriculture et climat. En particulier, on sait peu de choses sur :

- les impacts du changement climatique sur les exploitations agricoles familiales (EAF), alors même que celles-ci représentent la catégorie humaine la plus vulnérable face à celui-ci;
- le potentiel des EAF à s'adapter au changement climatique, comparativement aux firmes industrielles;
- les leviers pour que ces millions d'EAF puissent atténuer le changement climatique.

Dans ce chapitre, nous proposons d'ébaucher une réflexion sur une possible lecture des enjeux climatiques agricoles au prisme de l'agriculture familiale (AF), en nous focalisant sur l'adaptation de cette agriculture, tant à des phénomènes climatiques extrêmes qu'à des changements structurels. Nous nous reposons sur une revue — non exhaustive — de matériaux bibliographiques puisés dans la littérature académique, parmi lesquels des travaux conduits par le Cirad dans différentes régions des Suds. Il s'agit surtout de donner des pistes de réflexion et quelques recommandations pour mieux appréhender les liens entre l'agriculture familiale et l'adaptation au changement climatique.

Nous proposons d'aborder ces liens à travers l'agroécologie familiale. Nous justifions dans un premier temps notre démarche. Puis, nous analysons le potentiel de l'agriculture familiale à s'adapter au changement climatique sous l'angle des éléments de définition de l'agroécologie. Nous formulons également des hypothèses sur le potentiel des EAF, par rapport aux autres formes d'organisation de la production, à s'adapter au changement climatique par le développement de pratiques agroécologiques. Nous concluons sur des leviers nécessaires et possibles (notamment en matière de politiques) pour créer les conditions de l'expression de ce potentiel.

1. Par quel bout prendre la question ? Le choix de l'agroécologie familiale

Pour clarifier la problématique des relations entre agriculture familiale et enjeux climatiques, un premier point de départ concerne l'importance, la diversité et la

définition des agricultures familiales. En effet, les compilations statistiques de Lowder *et al.* (2021) estiment que 90% des exploitations agricoles dans le monde sont familiales, que ces exploitations familiales occupent près de 80% des surfaces agricoles, et qu'elles produisent plus de 75% de l'alimentation en volume. Toutefois, les « petites » exploitations de moins de 2 ha, qui sont aussi majoritairement familiales, dominent en nombre de fermes (85%), mais occupent 10% de la surface agricole et produisent 35% de l'alimentation. Ainsi, ces chiffres attestent de la très grande diversité des agricultures familiales quant à leur taille et leur capacité de production; celles-ci ne sont définitivement pas que de petites exploitations, même si l'inverse est plutôt vrai.

Ces chiffres montrent aussi, et c'est notre deuxième point, que cibler précisément les agricultures familiales dans les politiques climatiques, et en particulier les plus petites qui sont aussi les plus vulnérables, relève bien de la justice climatique et de la solidarité mondiale. Cependant, ce ciblage n'est pas évident, parce qu'aux échelles nationales et territoriales où se définissent les politiques publiques il existe rarement des données permettant d'identifier les exploitations d'agriculture familiale, en particulier parce que la nature du travail concerné n'est pas renseignée (Bosc *et al.*, 2014; Sourisseau, 2014).

L'identification des agricultures familiales est donc un préalable, mais en supposant qu'il y ait une volonté politique, comment appréhender concrètement le lien entre la forme familiale (ou non) des exploitations agricoles et le changement climatique ?

Commençons par la définition de l'agriculture familiale. Selon la FAO¹ : « L'agriculture familiale est un mode d'organisation dans lequel la production agricole, forestière, halieutique, pastorale ou aquacole est gérée et exploitée par une famille et repose essentiellement sur une main-d'œuvre familiale, à la fois féminine et masculine. La famille et l'exploitation sont liées, évoluent ensemble et remplissent des fonctions économiques, environnementales, reproductives, sociales et culturelles. » Cette définition étant très large, nous considérerons dans ce chapitre une définition plus restrictive basée sur l'absence de travailleurs permanents salariés, proposée par des auteurs du Cirad (Sourisseau, 2014). Cette définition permet d'identifier, à la frontière entre des fermes exclusivement familiales et exclusivement industrielles et capitalistiques, des fermes « patronales » (*family businesses*) pouvant aussi partiellement relever de la catégorie d'agriculture familiale (tableau 5.1). L'important est de reconnaître que la particularité des agricultures familiales n'est pas la taille, mais bien la nature des relations sociales et organisationnelles qui régissent la production de biens agricoles et ses utilisations diverses, avec un lien organique entre sphères domestiques et productives.

Nous proposons de lire les possibles adaptations des agricultures familiales au changement climatique (tant aux événements extrêmes qu'aux changements dans la durée) et les possibles leviers à activer par des politiques adaptées, au prisme de leur organisation familiale de la production couplée (plus classiquement) à leur dotation en moyens de production et en « capitaux et ressources² » (Bosc *et al.*, 2014).

1. <https://www.familyfarmingcampaign.org/fr/agricultura-familiar/>.

2. Le modèle des moyens durables d'existence (*sustainable rural livelihood*) est de mesurer les dotations en cinq principaux « capitaux » (naturel, physique, financier, social et humain) et leurs changements dynamiques pour évaluer les stratégies et les performances des exploitations.

Tableau 5.1. Diversité de structure et d'organisation des exploitations agricoles. Source : adapté de Sourisseau (2014).

Agricultures entrepreneuriales		Agricultures à base familiale	
	Firmes	Exploitations patronales	Dominance familiale, pas de salariés permanents
Main-d'œuvre	Exclusivement salariée	Mixte, présence de salariés permanents	Dominance familiale, pas de salariés permanents
Capital	Actionnaires	Familial ou association familiale	Familial
Management	Technique	Familial et technique	Familial
Consommation	Sans objet	Résiduelle	Autoconsommation partielle à dominante
Statut juridique	SA ou autres formes sociétaires	Statut d'exploitant, formes associatives, rarement formes sociétaires	Informel ou statut de l'exploitant
Statut foncier	Propriété ou faire-valoir indirect formel	Propriété ou faire-valoir indirect formel ou informel	

Au-delà de la diversité en taille d'exploitation, l'autre caractéristique essentielle de ces agricultures est qu'elles mettent en œuvre des systèmes de cultures et d'élevage extrêmement divers, du plus conventionnel au plus agroécologique, du plus technologique au plus artisanal (intensification différentielle en capital physique, financier, et humain).

Cette diversité rend complexe l'analyse de leurs capacités à s'adapter au changement climatique. De fait, s'il existe des analyses par système de production, il n'existe pas d'analyse par type d'organisation de la production permettant de juger des stratégies d'adaptation différenciées propres aux agricultures familiales. Toutefois, du fait de leur nombre, les agricultures familiales (les petites comme les grandes) sont les plus concernées par le besoin de s'adapter. Elles ont des capacités très diverses pour ce faire, même si la majorité subit les effets du changement climatique avec de faibles marges de manœuvre, en raison de la faiblesse de leur structure de production (FAO, 2024). Les mieux dotées en capital, notamment naturel et physique, qui sont donc aussi les plus grandes et souvent des exploitations patronales dans notre terminologie, auraient les ressources pour transformer leurs systèmes de culture et de production. Mais elles ont souvent des marges de manœuvre contraintes par des niveaux d'endettement importants, ce qui les pousse à limiter les changements techniques nécessaires pour réaliser une transition agroécologique transformative.

Pour appréhender le lien entre agricultures familiales et changement climatique, nous nous appuyons sur les conclusions du rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), qui stipulent que « les approches fondées sur les écosystèmes, l'agroécologie et d'autres solutions fondées sur la nature dans l'agriculture et la pêche peuvent renforcer la résilience au changement climatique avec de multiples cobénéfices » (IPCC, 2022 ; p. 90). Le Giec propose de privilégier les formes

agroécologiques de production, notamment sur les critères de la biodiversité cultivée et de résilience, par rapport aux réponses possibles par les modèles productivistes : « Les options d'adaptation basées sur l'intensification conventionnelle de la production ont été largement adoptées dans l'agriculture pour l'adaptation au changement climatique, mais avec des effets négatifs potentiels » (IPCC, 2022).

Le rapport du Giec se réfère à la définition de l'agroécologie telle que construite par la FAO (2018), autour de dix principes devant guider la transformation des systèmes agricoles (figure 5.1). Les préconisations font aussi référence, dans ce cadre, à des formes agroécologiques dites « transformatives » dans la terminologie de Gliessman (2015). Ce dernier distingue en effet cinq formes de transition agroécologique, depuis l'amélioration simple des intrants conventionnels, jusqu'à la refonte en profondeur des systèmes agricoles et alimentaires. La nature transformative impose non pas des ajustements à la marge du modèle conventionnel, mais la reconception des agroécosystèmes et la sortie d'une focalisation sur la production pour intégrer les exigences environnementales et sociales vers une autre alimentation.

Nous postulons donc, en accord avec le Giec et avec les conclusions du rapport de 2019 du Groupe d'experts de haut niveau sur l'alimentation (HLPE, 2019), que ces formes transformatives sont les moins déstabilisantes pour le climat et les plus adaptatives aux changements climatiques. Et nous proposons de formuler une série d'hypothèses sur les liens entre agricultures familiales et leur potentiel d'adaptation au changement climatique par leur potentiel d'adoption de pratiques agroécologiques. Ce faisant, nous prenons acte que les agricultures familiales ne sont pas en elles-mêmes vertueuses ou intelligentes face au climat. Mais nous faisons l'hypothèse qu'elles ont des caractéristiques sociales, organisationnelles et économiques qui pourraient leur faciliter la transition d'une agroécologie transformative qui leur permettrait de s'adapter à des événements extrêmes et à des changements plus modérés mais profonds du climat. Pour systématiser et organiser notre propos, nous mobilisons, comme le Giec, les principes devant guider l'agroécologie proposés par la FAO (2024).

2. L'agroécologie familiale et son potentiel d'adaptation au changement climatique au prisme des éléments de l'agroécologie

Dans cette seconde partie, nous passons d'abord en revue les dix principes guidant l'agroécologie de la FAO pour juger de la capacité des exploitations agricoles familiales (plus que des fermes) et de leur communauté sociale d'appartenance à s'adapter au changement climatique, en mettant en œuvre des pratiques agroécologiques. Puis, nous analysons plus en détail les capacités des exploitations agricoles familiales pour quatre de ces principes guidant l'agroécologie. Enfin, nous discutons des dimensions politiques pour favoriser l'adaptation des agricultures familiales aux enjeux climatiques.

2.1. Potentiel des agricultures familiales en matière d'agroécologie

Le tableau suivant (tableau 5.2) compile, de façon synthétique et élément par élément, des hypothèses de travail (qui restent à mettre en débat) issues de notre revue de la littérature. Ces hypothèses dessinent des caractéristiques et des aptitudes propres aux agricultures familiales (y compris en matière de dotations en capitaux matériels et immatériels), qui sont autant de leviers potentiels pour réaliser la transition agroécologique.

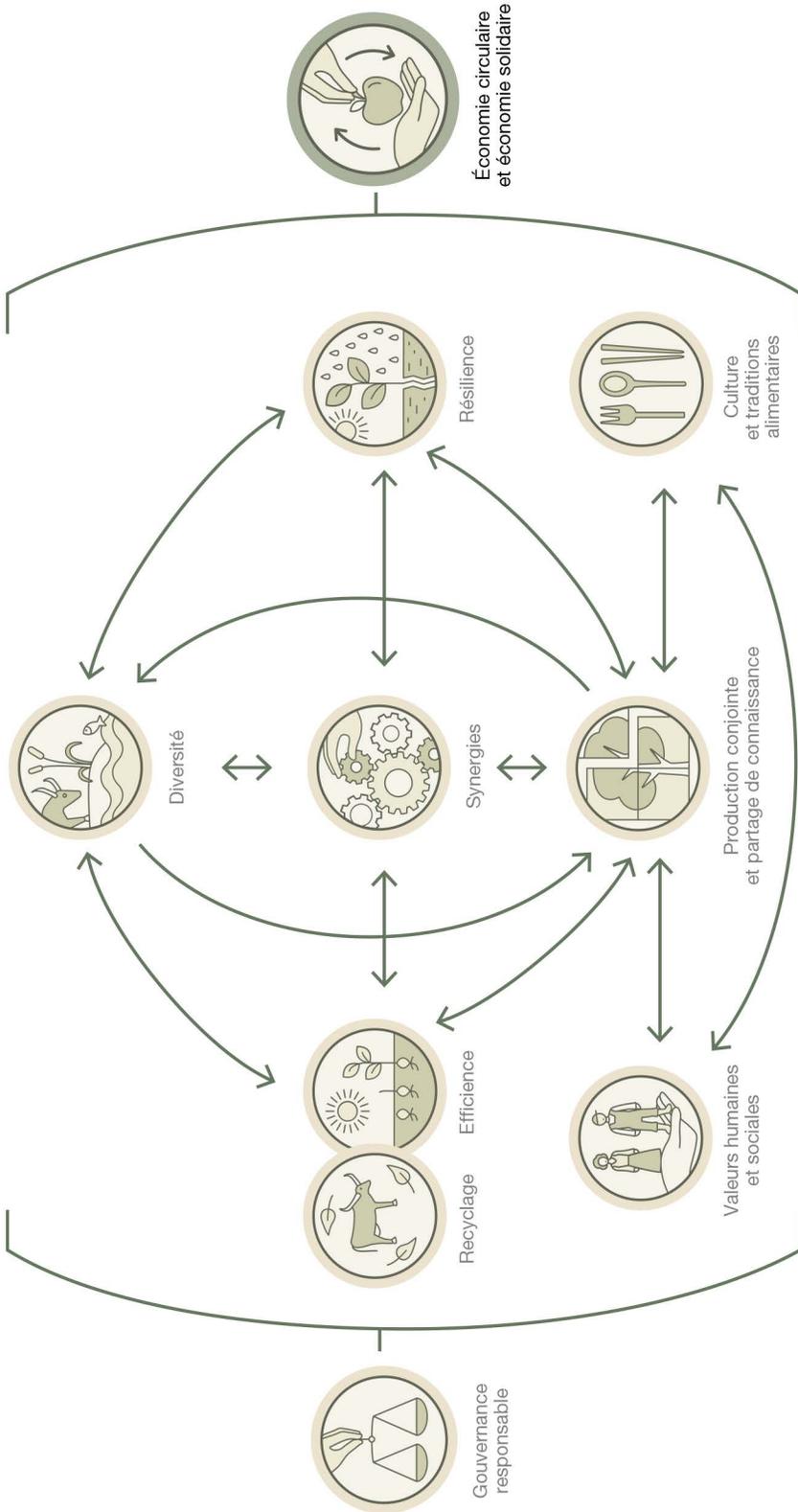


Figure 5.1. Principes guidant la transformation des systèmes agricoles (et alimentaires) vers l'agroécologie. Source : FAO (2018).

Tableau 5.2. Principes de l'agroécologie et caractéristiques des agricultures familiales favorables pour la transition agroécologique face aux enjeux climatiques.

Principes de l'agroécologie	Potentiels avantages des agricultures familiales au regard de la transition agroécologique
Diversité cultivée et des paysages	<p>Diversité cultivée au cœur des stratégies antirisques des agricultures familiales et paysannes (association de cultures annuelle et pérenne, forêt, élevage) → autoconsommation, gestion et savoirs différenciés entre les membres de la famille</p> <p>Taille globalement faible des EAF → nécessité d'optimiser les faibles ressources à leur disposition</p> <p>Double diversité → les mosaïques paysagères des AF sont beaucoup plus diversifiées</p>
L'efficacité (réduction de l'utilisation des ressources externes dans les systèmes agricoles et alimentaires)	<p>Autonomie → socle pour de nombreux auteurs de la définition de l'agriculture paysanne</p> <p>Savoirs divers (genre et génération) et transmis → maîtrise des plantes de services pour le contrôle des ravageurs dans des systèmes à petite échelle, et de la sélection paysanne du matériel végétal</p> <p>Diversité cultivée → complexité des systèmes qui impose une plus grande efficacité</p> <p>Ancrage territorial des AF → Combinaison des connaissances à l'échelle des parcelles et des paysages</p>
Culture et traditions alimentaires	<p>Autoconsommation → attention à la diversité et à la sécurité alimentaire</p> <p>Liens entre les générations → entretien des savoirs culinaires</p>
Résilience	<p>Systèmes de production complexes → capacités de changement stratégique et souplesse dans la gestion</p> <p>Systèmes d'activité complexes → adaptabilité stratégique du rôle de l'agriculture dans la reproduction</p>
Valeurs humaines et sociales	<p>Place des femmes → dynamiques contrastées, les femmes souffrant plus des crises (y compris climatiques), mais des formes familiales de gestion et division du travail ouvrant aussi à des formes d'émancipation positives</p>
Recyclage	<p>Capital financier limité par rapport aux surfaces → propension au recyclage pour l'optimisation des ressources financières et usage des ressources naturelles</p> <p>Savoirs transmis et ancrage territorial → articulation des échelles facilitant le recyclage de la parcelle au territoire</p>
Production conjointe et partage de connaissances	<p>Diversité cultivée → apprentissage permanent dans la gestion de systèmes complexes</p> <p>Logiques intraménages (genre et générations) → transmission des savoirs facilités</p> <p>Ancrage communautaire et territorial → dynamique associative congruente à l'organisation familiale, gestion des communs et des savoirs sur les communs</p>
Synergie	<p>Diversité et complexité des systèmes de production → complémentarité agriculture-élevage et synergie pour la gestion de la fertilité à l'échelle de l'exploitation et des paysages</p> <p>Reproduction familiale, pluriactivité → modèles organisant la synergie de moyens et d'objectifs multiples</p>

Principes de l'agroécologie	Potentiels avantages des agricultures familiales au regard de la transition agroécologique
Économie circulaire et économie solidaire	Savoirs et ancrage territorial → circularité liée au recyclage et à l'articulation des échelles Ancrage familiale et communautaire → solidarité et complémentarité intraménage, solidarité dans les réseaux formels, informels, matériels et immatériels des AF
Gouvernance responsable	Élément dépassant l'approche de l'AF à l'échelle nationale, voire régionale, mais l'ancrage communautaire et la solidarité intrafamiliale et territoriale sont des socles pour une gouvernance responsable

EAF : exploitation d'agriculture familiale ; AF : agriculture familiale.

2.2. Agroécologie et adaptation au changement climatique dans les exploitations agricoles familiales

À partir de ces hypothèses et à titre d'exemple, nous nous concentrons sur quatre éléments de l'agroécologie qui disposent d'une littérature explicite, avec données de terrain, afin de faire également le lien avec l'adaptation au changement climatique.

2.2.1. Diversité cultivée

Dans une revue de la littérature concernant des agricultures paysannes (toutes familiales), Altieri *et al.* (2015) a montré les capacités des agricultures familiales à mobiliser différentes formes de diversifications pour s'adapter aux aléas climatiques. D'autres études vont dans le même sens. Par exemple, Holt-Gimenez (2002) a souligné la résilience de ces exploitations familiales en montrant que la restauration était bien plus rapide dans les systèmes de culture complexes et paysans que dans les systèmes de monoculture à la suite du passage du cyclone Mitch en 1998 en Amérique centrale. Descheemaeker *et al.* (2016) montrent, dans les zones sahéliennes subhumides, que les choix des cultivars, l'intégration de légumineuses dans les systèmes et les associations complexes sont facilités par la gestion «à petite échelle» et familiale. Non seulement ces choix sont positifs en matière d'atténuation, mais ils offrent aussi des cobénéfices. Le croisement des savoirs communautaires et un partage du travail suffisamment souple entre les actifs familiaux permettent la gestion de la complexité sans mécanisation chez les agriculteurs éleveurs. Plus encore, la biodiversité cultivée se décline à des échelles territoriales. Les mosaïques sont d'autant plus complexes que les territoires agricoles sont occupés par des agricultures familiales, qui cultivent la diversité et qui sont elles-mêmes très diverses (Bosc *et al.*, 2014). Les diversités s'ajoutent et se combinent, générant de nouveaux services et de nouvelles options si des actions coordonnées sont mises en œuvre à l'échelle des paysages et des territoires; l'effet cumulatif est d'autant plus important en milieu tropical et dans un cadre d'agriculture familiale paysanne (Harvey *et al.*, 2014).

2.2.2. Efficience

Entendue comme la réduction de l'utilisation des ressources externes dans les systèmes agricoles et alimentaires (FAO, 2018), l'efficience renvoie à la notion d'autonomie, socle pour de nombreux auteurs de la définition de l'agriculture paysanne (Van der Ploeg, 2008). Ainsi, Altieri et Nicholls (2017) recensent de multiples exemples d'autonomisations

vertueuses chez les paysans des pays en développement, qui reposent principalement sur la gestion d'une importante diversité cultivée. L'agrégation des savoirs des anciens et des femmes, mais aussi les apports plus académiques et normatifs permettraient d'appréhender la lutte contre les ravageurs dans des systèmes à petite échelle, bien plus complexes quant au nombre d'interactions que dans les parcelles gérées industriellement. En outre, à l'échelle des territoires, la complexité des interactions entre plantes est encore augmentée par la diversité des systèmes de culture. À condition de disposer des savoirs locaux pour piloter et entretenir ces interactions, les capacités d'adaptation peuvent être décuplées en jouant aussi à l'échelle des paysages. Or, l'ancrage territorial des agricultures familiales entretient aussi des connaissances à cette échelle.

2.2.3. Résilience

La propension des agricultures familiales à mettre en place des systèmes résilients semble relativement étayée dans la littérature. En effet, les grandes revues sur l'agroécologie (notamment Gliessman, 2015 ; HLPE, 2019) rappellent que les agricultures paysannes, dont l'immense majorité est familiale, maîtrisent mieux les pratiques permettant la résilience (comme la biodiversité cultivée — déjà évoquée plus haut —, la gestion de l'eau et de la fertilité du sol, ou l'intégration agriculture-élevage), essentiellement parce que cette maîtrise se prête mieux à une gestion microlocale inscrite dans les micropaysages plutôt qu'à une gestion industrielle à grande échelle jouant sur l'artificialisation uniformisante. Par ailleurs, les pratiques des pasteurs en Afrique, toutes familiales dès qu'il s'agit de la gestion des animaux, soulignent la capacité de résilience des exploitations familiales (Vayssières *et al.*, 2017). La mobilité stratégique permet de minimiser l'exposition à la sécheresse et à d'autres facteurs de stress non climatiques. De surcroît, la résilience, pour les agricultures familiales, relève également de la flexibilité par rapport aux objectifs et aux performances de l'exploitation. La famille peut réduire son train de vie ou l'augmenter selon la situation de l'exploitation (Bosc *et al.*, 2014). En ce sens, l'imbrication des sphères domestique et productive est un potentiel levier d'adaptation aux événements climatiques extrêmes ou plus modérés, d'autant plus si l'on ajoute les possibilités du recours à l'extra-agricole par la pluriactivité et la mobilité.

Toutefois, le lien entre la diversification économique et la résilience peut être remis en question. Par exemple, Alfani *et al.* (2021) montrent qu'en Zambie la diversification économique agricole (y compris l'élevage) n'est pas explicative de l'adaptation aux sécheresses dues à El Niño. Asfaw *et al.* (2019) précisent dans une autre étude au Malawi, au Niger et en Zambie que ces stratégies adaptatives hors agriculture sont surtout essentielles pour les plus pauvres et relèvent, à faible niveau de capital, d'un registre uniquement défensif. Enfin, Call *et al.* (2019) estiment que les marges de manœuvre des familles diminuent dans le long terme, affaiblissant les stratégies d'adaptation par la diversification à la fois agricole et non agricole.

2.2.4. Agriculture familiale et valeurs humaines et sociales

Par souci de simplification, mais aussi parce que nous sommes là au cœur de l'intraménage spécifique des agricultures familiales, nous nous contenterons, pour aborder les valeurs humaines et sociales, d'entrer par les questions de genre dans l'agroécologie et dans l'adaptation au changement climatique. Dans son rapport récent sur le climat injuste, la FAO (2024) reprend les très nombreuses et anciennes démonstrations de

la vulnérabilité plus grande des femmes face au changement climatique. Ume *et al.* (2022) s'inscrivent dans cette ligne, mais montrent aussi que l'intégration des savoirs féminins et la prise en compte des « activités reproductives » dans la gestion des ménages améliorent les conditions de vie, favorisent les pratiques agroécologiques et de fait augmentent la plasticité des systèmes agricoles familiaux. Asfaw et Maggio (2018) insistent sur le fait que la matrilocalité permettrait des réponses adaptatives plus efficaces pour toute la famille. La base des rapports sociaux (et culturels) de genre préexistants et les cadres institutionnels pour les « contrôler » comptent. Mais même en situation de patriarcat rigoureux, des effets positifs pour les femmes sont possibles. Ainsi, Agamile *et al.* (2021) développent une analyse contre-intuitive en Ouganda, révélant des opportunités émancipatrices nouvelles offertes aux femmes et aux jeunes par des événements climatiques extrêmes. Ces derniers peuvent conduire les hommes à se désintéresser de certaines cultures de rente, et permettre ainsi une réallocation partielle des terres féminines (et des jeunes) consacrées au vivrier, vers des cultures rémunératrices. Pour Ume *et al.* (2022), il faut compter les activités reproductives, notamment celles réalisées par les femmes dans la mesure de la résilience et des capacités des familles à s'adapter au changement climatique. Nous sommes là au cœur des spécificités de l'agriculture familiale et du lien organique entre sphère productive et domestique. Séparer les fonctions productives et domestiques (y compris reproductives) nous cache des stratégies d'adaptation essentielles, qui sont autant de leviers pour l'action climatique.

Enfin, Forest et Foreste (2022) proposent d'élargir la réflexion et l'action sur les questions de genre et de climat, en particulier en documentant la part des femmes dans les approches collectives de la gestion des ressources naturelles (communs). Nous y voyons un prolongement potentiel d'une entrée par la famille et un apport complémentaire aux questions d'efficacité, de diversité cultivée et non cultivée et de résilience, par le prisme des valeurs sous-tendant l'action collective et l'écoféminisme.

2.3. Des politiques publiques pour faciliter la transition écologique des agricultures familiales

Si le caractère familial des agricultures présente des caractéristiques favorables à la transition agroécologique pour faire face aux enjeux climatiques, toutes les agricultures familiales n'adoptent pas des systèmes de production agroécologiques. Pour les exploitations familiales pratiquant des systèmes conventionnels, la transition agroécologique, comme toute transition, peut engendrer des coûts supplémentaires. Par ailleurs, les agricultures familiales qui ont fait le choix de l'agroécologie, souvent en réponse à la contrainte d'un manque d'accès à des ressources et/ou des capitaux (financiers), font face à des enjeux, notamment économiques, et à des risques.

Ainsi, qu'il s'agisse de faciliter la transition de l'agriculture familiale conventionnelle vers l'agroécologie dans une perspective d'améliorer la situation face aux enjeux climatiques ou de renforcer les agricultures familiales déjà agroécologiques, des politiques publiques s'avèrent nécessaires. Trois grands champs de politiques publiques sont à considérer, qui prennent aujourd'hui en compte de manière différenciée mais globalement insuffisamment l'agriculture familiale : les politiques agricoles pour l'agriculture familiale, les politiques d'agroécologie et les politiques climatiques pour le secteur agricole.

Le panorama de ces trois champs de politiques montre des dynamiques contrastées en matière d'intégration concrète de la problématique familiale. Bien qu'il existe des convergences possibles entre ces dynamiques, celles-ci mériteraient d'être renforcées. Ainsi, les politiques se focalisant explicitement sur l'agriculture familiale ont pris des formes diverses, justifiées par des recherches d'équité d'accès au foncier, aux marchés, de lutte contre la pauvreté et/ou de sécurité alimentaire. Malgré les espoirs suscités par ces politiques ciblés sur l'appui aux agricultures familiales, une étude régionale réalisée en Amérique latine a montré leurs limites et des résultats mitigés (Sabourin *et al.*, 2014).

Les politiques en faveur de l'agroécologie sont elles aussi très diverses et ont connu un développement au cours de la dernière décennie sous l'impulsion de mouvements sociaux, principalement en Amérique latine et notamment au Brésil (Le Coq *et al.*, 2020), ou sous l'impulsion de la coopération internationale, notamment en Afrique (Milhorange *et al.*, 2022). Ces politiques reposent sur des concepts différents (dans des logiques plus ou moins transformatives), et mobilisent des instruments issus de différents champs de politiques (conseil agricole, accès aux financements, au foncier, etc.). Néanmoins, elles présentent de nombreuses limites : les financements affectés sont faibles au regard de l'appui aux modèles conventionnel ou d'agrobusiness, les mises en œuvre sont parfois partielles ou discontinues. Enfin, le ciblage souvent annoncé des agricultures familiales ne s'accompagne pas d'éléments concrets d'identification et de sélection des bénéficiaires, et néglige la dimension structurelle des transitions. Il faut souvent de la terre, du capital social, humain et financier, voire politique, pour que les agricultures familiales adoptent certaines pratiques agroécologiques exigeantes ; sans renforcement de leurs moyens d'existence, les exploitations les plus vulnérables sont enfermées dans des logiques conventionnelles, sans pour autant pouvoir les déployer totalement.

Les politiques climatiques pour l'agriculture ont également connu un large développement depuis une décennie, notamment après l'intégration croissante de l'agriculture dans l'agenda climatique global. Ces politiques ont intégré divers concepts de réponse, et peuvent soutenir différents modèles — l'agroécologie n'étant qu'un seul de ces modèles. Ainsi, dans le cas du Brésil, Milhorange *et al.* (2021) montrent que différents concepts coexistent dans les politiques climatiques, certains pouvant être favorables à l'agriculture familiale, d'autres davantage aux modèles agro-industriels. Par ailleurs, la nécessité de considérer les combinaisons d'instruments de politique et leurs interactions pour toucher favorablement les agriculteurs familiaux face aux enjeux climatiques est précisément documentée, notamment dans le cas emblématique du Brésil (Milhorange *et al.*, 2020).

En définitive, bien que les politiques publiques (selon leurs objectifs spécifiques liés à leurs champs d'action) prévoient des leviers pour promouvoir la transition de l'agriculture familiale vers des systèmes plus résilients, notamment par l'adoption de l'agroécologie, celles-ci restent encore souvent insuffisantes pour entraîner des modifications à l'échelle de l'enjeu, au regard du nombre d'exploitations familiales concernées et de la nécessité à agir face à l'urgence climatique. Par ailleurs, si l'appui à la transition agroécologique pour les agriculteurs familiaux constitue la piste que nous avons privilégiée dans notre analyse dans ce chapitre, il semble nécessaire de maintenir des politiques inclusives vis-à-vis des agricultures familiales qui ne sont pas

agroécologiques, ou qui ne souhaitent pas (encore) ou ne peuvent pas s'orienter dans cette voie. Ils représentent en effet une part importante des agriculteurs en nombre et en surface, et peuvent représenter les segments les plus vulnérables des populations agricoles. Enfin, il convient également d'envisager la réflexion sur les leviers non seulement au niveau du système de production agricole, mais également au niveau des systèmes alimentaires.

3. Conclusion

L'agroécologie repose sur une combinaison de techniques et de dynamiques économiques et sociales d'origines diverses, mais son socle demeure l'entretien et la mobilisation de savoir locaux, voire microlocaux. Ils sont les seuls capables de gérer durablement la complexité des agroécosystèmes et des interactions entre les différentes composantes de ces systèmes. Les travaux examinés dans ce chapitre convergent pour dire que ces savoirs locaux et microlocaux et leur pilotage aux échelles des exploitations et des territoires sont potentiellement des avantages comparatifs des formes familiales de production par rapport aux autres formes d'agricultures. L'agriculture familiale, ancrée dans les territoires et leurs communautés, traversée d'échanges intra-familiaux et transgénérationnels, fondée sur des modes de régulations plastiques et ajustables rapidement, mobilisant un fort capital social articulé aux autres moyens d'existence, est potentiellement adaptée aux principes constitutifs de l'agroécologie. Par suite, les agricultures familiales ont un potentiel élevé pour s'adapter durablement au changement climatique.

Mais ce potentiel ne garantit pas à lui seul la pérennité de pratiques agroécologiques ou la transition d'un modèle conventionnel vers l'agroécologie de ces exploitations. Comme toutes les dynamiques agricoles dans l'histoire du monde, la concrétisation de ce potentiel nécessite un compromis social et politique, assorti de moyens conséquents et d'instruments de politiques publiques. Nous parlons bien d'instruments (au pluriel) (voir chapitre 26), la complexité des processus sous-tendant la structuration des exploitations agricoles et la mise en œuvre de l'agroécologie appelant des approches systémiques et des combinaisons d'actions collectives et publiques touchant à toutes les dimensions du développement durable. Or, 2% du financement public international pour le climat ont été consacrés aux petits exploitants familiaux et aux communautés rurales en 2021. Étant donné que la grande majorité (95%) du financement climatique pour les petits agriculteurs familiaux provient de sources publiques, cela équivaut à environ 0,3% des 653 milliards de dollars de financement climatique international provenant de sources publiques et privées (Forum rural mondial, 2023). De même, le poids de l'agroécologie et de l'agriculture familiale dans les politiques agricoles demeure très inférieur à celui des encouragements aux modèles à hauts niveaux de carbone de l'intensification conventionnelle. Le chemin semble donc long et incertain dans la réalisation du potentiel d'adaptation au changement climatique.

La recherche a son rôle à jouer dans l'inflexion de cette trajectoire aujourd'hui peu favorable aux agricultures familiales et à une agroécologie familiale. La revue faite ici explore des résultats de recherche, mais aussi des intuitions et des hypothèses qui mériteraient d'être approfondies et validées sur une base documentaire plus large, mais aussi par la production de nouvelles connaissances. Un point crucial est le besoin de lever les incertitudes sur les métriques des émissions de GES et donc de

l'atténuation (voir chapitre 4). Notre analyse plaide pour des métriques plus précises, intégrant la diversité des situations agraires, et susceptibles de mieux expliquer les changements d'échelle. Ces nouvelles données, conjointement à une systématisation des mesures et à une compréhension des mécanismes d'adaptation, devraient améliorer la connaissance des liens entre la diversité des agricultures et des élevages (diversités géographique, technique, économique, politique et sociale) et l'impact sur le changement climatique de ces différents types d'agriculture et d'élevage. Au cœur de cette exploration serait la remise au centre des réflexions des formes sociales et économiques de production, dans le but de formuler des politiques publiques plus ciblées.

4. Références bibliographiques

- Agamile P., Dimova R., Golan J., 2021. Crop Choice, Drought and Gender: New Insights from Smallholders' Response to Weather Shocks in Rural Uganda. *Journal of Agricultural Economics*, 72(3), 829-856.
- Alfani F., Arslan A., McCarthy N., Cavatassi R., Sitko N., 2021. Climate resilience in rural Zambia: evaluating farmers' response to El Niño-induced drought. *Environment and Development Economics*, 26(5-6): 582-604.
- Altieri M., Nicholls C., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35:869-890.
- Altieri M., Nicholls C., 2017. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140:33-45.
- Asfaw S., Maggio G., 2018. Gender, Weather Shocks and Welfare: Evidence from Malawi, *The Journal of Development Studies*, 54:2, 271-291. <https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1283016>
- Asfaw S., Scognamillo A., Di Caprera G., Sitko N., Ignaciuk A., 2019. Heterogeneous impact of livelihood diversification on household welfare: Cross-country evidence from Sub-Saharan Africa. *World Development*, 117, 278-295. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.01.017>
- Bosc P.-M., Sourisseau J.M., Bonnal P., Gasselin P., Valette E., Bélières J.F., 2014. *Diversité des agricultures familiales : Exister, se transformer, devenir*. Éditions Quæ, 384 p.
- Call M., Gray C., Jagger P., 2019. Smallholder responses to climate anomalies in rural Uganda. *World Development*, 115, 132-144.
- Descheemaeker K., Oosting S.J., Homann-Kee Tui S., Masikati P., Falconnier G., Giller K., 2016. Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop-livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments. *Reg Environ Change*, 16:2331-2343.
- FAO, 2018. *Les 10 éléments de l'agroécologie. Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables*. Rome, 15 p.
- FAO, 2024. *The unjust climate – Measuring the impacts of climate change on rural poor, women and youth*. Rome, 120 p.
- Forest M., Foreste C., 2022. Quels cadres interprétatifs autour des enjeux Genre et Climat? Enseignements d'une analyse bibliométrique. Papier de recherche n°22, AFD, Paris, 107 p.
- Forum Rural Mondial, 2023. Un potentiel inexploité. Une analyse des flux de financement public international de la lutte contre le changement climatique destinés à l'agriculture durable et aux agriculteurs familiaux, FRM, 14 p.
- Gliessman S.R., 2015. *3rd Agroecology: the ecology of sustainable food systems*. CRC press. 405 p.
- Harvey C.A., Chacon M., Donatti C.I., Garen E., Hannah L., Andrade A., *et al.*, 2014. Climate-Smart Landscapes: Opportunities and Challenges for Integrating Adaptation and Mitigation in Tropical Agriculture. *Conservation Letters*, 7(2): 77-90.
- HLPE, 2019. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome. 163 p.

Holt-Giménez E., 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. *Agric Ecosyst Environ*, 93:87-105.

IPCC 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3056 p.,

Le Coq J.-F., Sabourin E., Bonin M., Freguin-Gresh S., Marzin J., Niederle P., Vásquez L., 2020. Public policy support for agroecology in Latin America: Lessons and perspectives. *Global Journal of Ecology*, 5(1), 129-138.

Lowder S., Sanchez M., Bertini E., 2021. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? *World Development*, 142, 105455. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455>

Milhorance C., Camara A.D., Sourisseau J.-M., Piraux M., Assembène Mane C., Sirdey N., Sall M.C.A., 2022. L'intégration de l'agroécologie dans les politiques publiques du Sénégal. Dakar, ISRA, 54 p.

Milhorance C., Sabourin E., Chechi L., Mendes P., 2021. The politics of climate change adaptation in Brazil: framings and policy outcomes for the rural sector. *Environmental Politics*, 1-23.

Milhorance C., Sabourin E., Le Coq J.-F., Mendes P., 2020. Unpacking the policy mix of adaptation to climate change in Brazil's semiarid region: enabling instruments and coordination mechanisms. *Climate Policy*, 20(5).

Ploeg (van der) J.D., 2008. *The New Peasantries, struggles for autonomy and sustainability in an era of empire and globalization*. Earthscan, 356 p.

Sabourin É., Marzin J., Le Coq J.-F., Massardier G., Fréguin-Gresh S., Samper M., Sotomayor O., 2014. Agricultures familiales en Amérique latine. Émergence, avancées et limites des politiques ciblées. *Revue Tiers Monde*, 4(4), 23-41.

Sourisseau J.M. (ed.), 2014. *Agricultures familiales et mondes à venir*. Versailles, éditions Quæ, 360 p.

Ume C., Nuppenau E.A., Domptail S.E., 2022. A feminist economics perspective on the agroecology-food and nutrition security nexus. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16, 100212.

Vayssières J., Assouma M.H., Lecomte P., Hiernaux P., Bourgoïn J., Jankowski F., *et al.*, 2017. Livestock at the heart of 'climate-smart' landscapes in West Africa. In: Caron P., Valette E., Wassenaar T., Coppens D.E.G., Vatché P. (Eds.), *Living Territories to Transform the World*, Versailles, éditions Quæ, 111-117.

Chapitre 6

Changement climatique, (im)mobilités et foncier : quels enjeux pour les agricultures familiales aux Suds ?

Sara Mercandalli, Hadrien Di Roberto, Pierre Girard

Des estimations récentes indiquent qu'il y pourrait y avoir respectivement 216 et 200 millions de migrants climatiques¹ internes et internationaux d'ici 2050 (Clement *et al.*, 2021 ; Burzyński *et al.*, 2022). Le changement climatique a par ailleurs des incidences sur la qualité des terres arables et sur leurs usages, eux-mêmes étroitement liés à des enjeux de transformations des rapports fonciers.

Les enjeux fonciers et migratoires liés au changement climatique sont particulièrement aigus dans les pays du Sud ; l'Afrique, et l'Asie du Sud-Est et le Pacifique sont à la fois les régions qui contribuent le moins au changement climatique et celles qui sont les plus affectées par ses effets (Borderon *et al.*, 2019 ; IPCC, 2023). Ces deux régions ont de fait le plus grand nombre de déplacés environnementaux, respectivement 7,5 et 22,6 millions en 2023 (IDMC, 2023). Les enjeux sont importants étant donné la place centrale du secteur primaire dans l'économie de ces régions, et spécialement des agricultures familiales qui y sont majoritaires (Lowder *et al.*, 2021). La diversité des agricultures familiales (voir chapitre 5) implique des niveaux de vulnérabilité et des capacités d'adaptation inégales face au changement climatique, largement dépendants des régimes fonciers et des mobilités (Zickgraf *et al.*, 2016).

Les pays du Sud sont aussi particulièrement concernés par les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Premièrement, la lutte contre la déforestation en zone tropicale est un levier stratégique dans les négociations de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (FAO, 2022). Deuxièmement, les migrations climatiques ont été inscrites comme modalité d'adaptation dans plusieurs cadres internationaux². Cependant, les causes multiples ainsi que l'incertitude des seuils socio-écologiques qui sous-tendent les migrations climatiques (Thalheimer *et al.*, 2021) questionnent l'efficacité et les effets sociaux de l'action politique concernant les migrations, les déplacements et les relocalisations planifiées (McDowell, 2013).

1. La migration climatique est le mouvement d'une personne ou de groupes de personnes qui, principalement pour des raisons de changement soudain ou progressif de l'environnement dû au changement climatique, sont obligés de quitter leur lieu de résidence habituel, ou choisissent de le faire, de manière temporaire ou permanente, au sein d'un État ou à travers une frontière internationale (OIM, 2019). Elle est une sous-catégorie de la migration environnementale. Les estimations du nombre de migrants environnementaux sont difficiles et les projections varient de 25 millions à 1 milliard d'ici 2050 (OIM, 2024).

2. Cadre d'adaptation de Cancún (2010), accord de Paris de 2015, Pacte mondial pour des migrations sûres, ordonnées et régulières (ONU, 2018), cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes (ONU, 2015).

Malgré la centralité du foncier et des mobilités dans les enjeux de justice agraire et de justice climatique (Borras *et al.*, 2023), la dialectique entre le changement climatique, le foncier et les mobilités reste peu abordée (Zickgraf *et al.*, 2016). L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les articulations entre le changement climatique et les dynamiques foncières et migratoires dans les zones rurales des Suds, et leurs enjeux pour les agricultures familiales. Quels sont les effets du changement climatique sur les régimes foncières et les mobilités des agricultures familiales ? En quoi les politiques climatiques ont-elles des effets sur le foncier et sur les mobilités des ruraux ? Dans quelle mesure les politiques foncières et migratoires peuvent être des leviers dans la lutte contre le changement climatique ?

Pour aborder ces questions, nous considérons les implications du changement climatique tant comme phénomène physique que social et politique, c'est-à-dire en examinant les implications des dispositifs de lutte contre celui-ci. Le foncier est défini comme « l'ensemble des rapports sociaux entre les hommes à propos de la possession et de l'usage de la terre, ainsi que du contrôle de cet usage » (Colin et Daoudi, 2022). La mobilité, elle, fait partie d'un système de décision complexe au sein des familles pour faire face aux risques tant socio-économiques que climatiques ; elle peut être volontaire ou involontaire (forcée) et peut recouvrir une diversité d'échelles temporelles et spatiales — mobilité temporaire ou permanente, circulaire, nationale ou internationale (Gemenne et Blocher, 2017).

Le chapitre sonde d'abord les relations entre les dimensions biophysiques du changement climatique, le foncier et les mobilités et leurs enjeux pour les agricultures familiales, puis explore les dimensions foncières et migratoires associées aux politiques publiques de l'action climatique et leurs effets.

1. Les relations entre changement climatique et dynamiques foncières et migratoires au cœur des moyens d'existence des agricultures familiales

Les agricultures familiales du Sud sont confrontées à des catastrophes de plus en plus fréquentes et intenses, ou à des changements progressifs dans les températures et dans les précipitations. Ces deux situations, aux temporalités différentes, engagent des rapports sociaux sur la terre et d'autres ressources, entre les populations rurales et d'autres acteurs. Ces rapports sociaux transforment les agricultures familiales par le biais de formes d'adaptation endogènes, autour des ressources locales (Agrawal, 2010), ou impliquant la mobilité quand les premières sont insuffisantes (Gemenne et Blocher, 2017).

1.1. Changement climatique et agricultures familiales : quelles implications sur les régimes foncières ?

En faisant disparaître ou en dégradant des terres arables, des forêts ou des zones de pâturages, le changement climatique affecte la base même des processus de production des agricultures familiales. Ses effets sur les changements d'usage des sols sont relativement bien renseignés (voir chapitre 4), mais les changements produits sur les régimes foncières le sont beaucoup moins. On peut s'attendre à ce que la raréfaction des terres et leur marchandisation produisent, selon les contextes locaux, des effets différenciés en matière d'équité soit en équilibrant les dotations foncières soit en renforçant

les inégalités (Anseeuw et Baldinelli, 2021). Le changement climatique peut aussi être source de conflits sur les usages et sur le contrôle des terres comme le montrent Vesco *et al.* (2020). En effet, la raréfaction ou la dégradation des terres peuvent induire de nouvelles compétitions et des conflits d'accès au foncier, au sein de l'agriculture familiale pour des usages agricoles ou pastoraux, ou avec d'autres acteurs pour d'autres usages (énergétiques, séquestration de carbone). Le changement climatique ouvre parfois des opportunités d'accès aux terres pour certains acteurs au détriment des agricultures familiales. Les acquisitions foncières par de nouveaux investisseurs (internationaux ou élites nationales) peuvent être liées à des dispositifs politiques exogènes dans le cadre de pratiques d'atténuation (voir paragraphe 2.1) ou à des dynamiques plus endogènes liées aux effets du changement climatique sur la raréfaction ou sur la dégradation du foncier. Le déclin des moyens de subsistance des agricultures familiales lié au changement climatique peut contraindre certaines familles à vendre leurs terres à ces investisseurs locaux ou étrangers. De plus, les investissements à grande échelle produisent de l'incertitude localement en matière de sécurité foncière, ce qui peut dissuader les exploitations familiales de consacrer du travail ou des moyens à la gestion des risques climatiques sur leurs propres terres (Nyantakyi-Frimpong, 2020). Les implications du changement climatique sur les régimes fonciers peuvent donc être multiples, mais les observations sont encore insuffisantes pour réellement isoler celui-ci d'autres facteurs d'évolution de ces régimes et de leurs implications sur l'agriculture familiale (Murken et Gronott, 2022).

1.2. Changement climatique et dynamiques migratoires dans les agricultures familiales

La mobilité a toujours été une réponse des ruraux aux changements climatiques historiques et contemporains (Gemenne et Blocher, 2017; Cattaneo *et al.*, 2019). Les effets du changement climatique sur les mobilités se combinent à ceux d'autres facteurs des mobilités, démographiques, socio-économiques ou politiques (Black *et al.*, 2011). Ainsi, dissocier les mobilités liées au changement climatique des mobilités issues d'autres facteurs reste un défi méthodologique (Meze-Hausken, 2008). Selon les contextes, les réponses des familles prennent diverses formes d'(im)mobilités choisies ou contraintes, à différentes échelles spatiales et temporelles, accompagnées d'arrangements entre le migrant, sa famille et le groupe, sur les ressources des lieux d'origine et de destination (Agrawal, 2010).

La mobilité peut d'abord être une réponse ponctuelle face aux perturbations intra ou interannuelles du système de production agricole (Lalou et Delaunay, 2015). La mobilité économique temporaire, souvent nationale, d'un membre de la famille assure alors la continuité des moyens d'existence sans modifier davantage les règles intrafamiliales sur les ressources.

La mobilité peut aussi être une réponse structurelle des familles face aux dégradations persistantes du système de production agricole par une organisation sociale et résidentielle multilocalisée s'appuyant sur des mobilités circulaires nationales ou internationales entre un espace rural d'origine et une ou plusieurs destinations (Potts, 2010; Brüning et Piguet, 2018; Mercadalli *et al.*, 2019). Dans des contextes encore plus contraints par les ressources, les migrations définitives vers la ville sont fréquentes, contribuant aux transitions urbaines à l'œuvre en Afrique subsaharienne (Barrios *et al.*, 2006). Ces migrations ne sont plus un système d'adaptation de la famille à une crise écologique, c'est un abandon du territoire et une dispersion du groupe (Mounkaïla, 2002).

Qu'il s'agisse de mobilités temporaires, circulaires ou permanentes, le changement climatique est le plus souvent un amplificateur de dynamiques migratoires plus ou moins anciennes, faisant partie du fonctionnement des communautés rurales (Morrissey, 2014). Il peut néanmoins aussi contribuer à initier et à structurer de nouvelles mobilités liées à des dimensions socio-économiques ou écologiques favorables dans les espaces d'arrivée. Enfin, en Afrique comme en Asie, la grande majorité des mobilités dans un contexte de changement climatique suivent les dynamiques des mobilités rurales qui se font d'abord au sein même du pays (Mercandalli *et al.*, 2019). Les migrations internationales, elles, ont lieu davantage au sein de sous-régions (Leal Filho *et al.*, 2022).

Malgré l'attention donnée aux mobilités, ceux qui partent sont généralement la minorité comparée à ceux qui restent. Comme la mobilité, l'immobilité dans une situation de changement climatique est plus ou moins contrainte. Les décisions ou les conséquences individuelles en matière d'immobilité prennent par ailleurs divers degrés de vulnérabilité et/ou de résilience (Zickgraf, 2021 ; p. 127-28). Boas *et al.* (2022) notent que la mobilité et l'immobilité sont des « actes de résistance » potentiels dans un climat changeant. Le récent rapport du Giec (2023) souligne que, dans les décennies à venir, certaines personnes ne pourront pas ou ne voudront pas quitter des endroits où elles pourraient pourtant être vulnérables aux impacts du changement climatique. Selon Benveniste *et al.* (2022), le changement climatique entraînerait une diminution de l'émigration des personnes aux revenus les plus faibles de plus de 10 % en 2100 pour les scénarios de développement et de climat moyens, et jusqu'à 35 % pour les scénarios plus pessimistes. Pourtant, la manière dont l'immobilité climatique devrait être gérée et les normes qui devraient sous-tendre cette gestion sont très peu abordées (Thornton *et al.*, 2023).

1.3. Interactions entre dynamiques foncières et migratoires dans un contexte de changement climatique

Mobilités et accès à la terre sont deux dynamiques interdépendantes, renforcées par les effets du changement climatique. D'une part les inégalités foncières, exacerbées par les facteurs climatiques (voir paragraphe 1.1), déterminent largement les mobilités des ruraux (Obeng-Odoom, 2017). D'autre part, dans des contextes marqués par une raréfaction des terres arables liée au changement climatique, la mobilité, par le biais des ressources qu'elle fournit, peut assurer une forme complémentaire d'accès au foncier (Rakotomalala *et al.*, 2022). L'ensemble de ces dynamiques implique une compétition accrue sur les terres avec une propension à créer des modifications des régimes fonciers (Quan et Dyer, 2008).

Selon que les effets du changement climatique permettent ou non la continuité de l'activité agricole, différentes configurations sociopolitiques produisent une pluralité de mobilités et d'effets fonciers en matière d'accès et de sécurité foncière. En cas de dégradations lentes de la qualité et de la quantité des terres cultivées, un premier cas est celui où la quête de terre supplémentaire se fait dans de nouveaux espaces, par le biais de migrations circulaires ou définitives. Le choix initial des espaces de destination prend parfois la forme d'ouverture ou d'expansion de front pionnier. Mais souvent, ces mobilités se font au sein de communautés présentant des opportunités d'activités et où la nature des régimes fonciers locaux a un rôle déterminant pour l'accès et la sécurisation des droits des migrants. Un second cas est celui où ce sont les politiques d'appui

à l'agriculture commerciale qui créent ou renforcent des flux de travailleurs migrants affectés par le changement climatique, et en quête de terre et de revenus. Les populations des espaces d'arrivée peuvent ici se trouver en concurrence avec les migrants pour l'accès au travail et à la terre, créant des conflits fonciers. Enfin, lorsqu'il n'y a plus de marge sur les terres cultivables et que les possibilités de fronts pionniers sont épuisées, on peut identifier une troisième configuration dans laquelle les mobilités s'orientent vers des espaces protégés. Dans ce cas, l'accès illégal à la terre suivi d'une déforestation par les migrants contrecarre les politiques environnementales tout en créant des conflits fonciers dans ces espaces (Moizo, 2000).

Dans le cas d'effets du changement climatique rendant les terres impropres à l'agriculture ou les faisant disparaître, d'autres problèmes tendent à apparaître dans les zones concernées et les zones d'installation, tels que la concurrence pour les terres entre nouveaux arrivants, l'occupation de propriétés de locaux ou la surcharge des systèmes publics d'administration des terres (Jacobs et Almeida, 2020).

2. Le foncier et les mobilités dans les politiques d'atténuation et d'adaptation

Le changement climatique en tant que domaine de l'action politique se traduit par des politiques d'atténuation et d'adaptation qui peuvent avoir des impacts sur le foncier et sur les mobilités des agricultures familiales.

2.1. Les effets contestés des politiques d'atténuation sur le foncier et sur les migrations

Les principales voies d'atténuation concernent le secteur des terres (IPCC, 2019). Elles se déclinent sous des formes variées telles que le soutien aux transitions énergétiques (promotion des agrocarburants, énergies éolienne ou photovoltaïque), la protection des zones humides et des forêts, les initiatives de reforestation, d'afforestation, ou des formes d'agriculture plus durables. Ces politiques d'atténuation affectent les régimes fonciers (Hunsberger *et al.*, 2017; Borrás *et al.*, 2020; Le Meur et Rodary, 2022) et les mobilités (Malkamäki *et al.*, 2018).

Premièrement, la promotion des agrocarburants a alimenté une « course aux terres » après l'augmentation du cours du pétrole et des matières premières agricoles dès la seconde moitié des années 2000 (German et Schoneveld, 2012). Aujourd'hui, 17 % des acquisitions foncières à grande échelle sont liées à la production d'agrocarburants selon la Land Matrix³. Ces grandes acquisitions foncières peuvent s'accompagner de l'exclusion des populations locales de l'accès aux terres lorsque leurs droits fonciers ne sont pas formellement reconnus (Cotula, 2012). Elles fragilisent parfois les réformes foncières en faveur des droits locaux en incitant l'État à réaffirmer sa propriété au vu de l'intérêt économique de ces projets (Burnod, 2022). L'anticipation du déclin des énergies fossiles alimente aussi la pression foncière avec l'expansion d'espaces réservés à la production d'énergies éolienne ou photovoltaïque (Scheidel et Sorman, 2012). Enfin, la transition énergétique contribue à la demande croissante en minerais rares. Ces mines affectent notamment les terres de populations vulnérables selon Owen *et al.* (2023), qui estiment que la moitié d'entre elles sont situées sur ou à proximité des terres des peuples autochtones ou de petits agriculteurs familiaux.

3. <https://landmatrix.org/>.

Deuxièmement, les volets conservationnistes des politiques d'atténuation ont des effets fonciers et migratoires à travers la régulation des accès et des usages autorisés qu'ils opèrent sur des territoires donnés (Le Meur et Rodary, 2022). Parcs nationaux, aires protégées, forêts classées sont autant d'outils institutionnels qui sont remobilisés et étendus dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, notamment en lien avec les perspectives de financement qu'offrent les mécanismes de compensation carbone (Cavanagh et Benjaminsen, 2014). Ces dispositifs ont ainsi des effets fonciers directs, puisqu'ils visent à réguler ou à retirer, tout ou partie, des droits fonciers aux populations. Par ailleurs, des initiatives d'afforestation — à l'instar des grands projets de murailles vertes au Sahel ou dans le nord de la Chine — ont aussi pu conduire à des formes d'enclosure avec l'exclusion physique et la migration d'anciens utilisateurs des ressources (Turner *et al.*, 2023).

Enfin, des instruments de marchés et des incitations économiques visent à orienter les usages des terres et les pratiques agricoles. Ils ne modifient pas directement les droits fonciers, mais peuvent avoir des effets indirects. La définition des droits fonciers et l'identification des ayants droit sont des questions centrales dans la mise en œuvre de ces instruments; c'est le cas des paiements pour services environnementaux (PSE) et des projets REDD+ (réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts). Les PSE rémunèrent des acteurs pour un certain usage des terres afin de créer des incitations à la fourniture d'un service écosystémique. Selon Karsenty (2019; p. 89), « la question des droits de propriété est importante car la possibilité de réalisation du contrat implique que le fournisseur du service environnemental dispose de droits de gestion et d'exclusion sur les terres ou les ressources naturelles concernées⁴ ». Les projets REDD+ s'appuient sur la finance carbone pour subventionner des initiatives de réduction des émissions liées à la déforestation. Ils permettent la création de droits de propriété spécifiques de crédits carbone, souvent déconnectés de la reconnaissance de la propriété foncière. Ces projets ont soulevé des inquiétudes de la part des coalitions de l'agriculture familiale et des populations autochtones concernant qui décidera des usages autorisés des forêts et comment seront partagés les bénéfices de la vente des crédits carbone (Larson *et al.*, 2013). En ce sens, un *green grabbing* (Fairhead *et al.*, 2012) peut s'opérer sans exclure les populations de la terre, mais à travers leur marginalisation dans les processus de décisions concernant les ressources et l'inégale répartition des bénéfices tirés des crédits carbone (He et Wang, 2023). La certification des droits carbone assure certains bénéfices aux populations, mais suppose en retour la production de règles de conformité complexes et issues de processus technocratiques produisant des formes d'exclusion. Les conflits fonciers associés aux projets REDD+ se concentrent notamment dans les aires protégées, lorsque la finance carbone offre les moyens à leurs gestionnaires (services de l'État ou le secteur privé) de reprendre le contrôle sur ces espaces en excluant les populations qui avaient pu s'y installer pour l'agriculture. La clarification du régime foncier, la sécurisation des droits des populations et leur implication aux différentes étapes des projets contribuent à une meilleure équité et viabilité des projets REDD+ (Larson *et al.*, 2013).

4. Par exemple, en cas de métayage, un PSE visant la restriction de droits d'usage pour le métayer pourrait avoir un impact sur les revenus du propriétaire. Dans ce cas, la propriété foncière va compter pour établir un partage des paiements entre le métayer et le propriétaire (Karsenty, 2019).

Lorsque des droits fonciers sont retirés aux populations locales, les politiques d'atténuation ont par conséquent des effets sur les mobilités. Les anciens usagers peuvent se voir contraints de migrer (ou de modifier des parcours de pâturage) et ces migrations peuvent à leur tour susciter de nouvelles tensions sur le foncier rural. De plus, la production d'agrocarburants ou les grands projets de reboisement favorisent la migration de main-d'œuvre pour réaliser des travaux agricoles pénibles moyennant de faibles salaires (Richardson, 2010).

2.2. Foncier et migration : leviers et limites pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique

La sécurisation foncière apparaît comme un levier important de l'adaptation aux changements climatiques pour les agricultures familiales (Castro et Kuntz, 2022 ; Murken et Gornott, 2022). D'abord, la sécurité foncière peut favoriser des investissements pour l'adaptation des systèmes de cultures à de nouvelles conditions climatiques, même si les effets positifs de la sécurisation foncière sur les investissements agricoles ne sont pas toujours vérifiés (Colin et Daoudi, 2022). En effet, l'anticipation d'une baisse de rendements liée au changement climatique peut entraîner une réduction des investissements indépendamment de la sécurité des droits fonciers. Ainsi, selon l'importance de la réponse à apporter par les producteurs, une politique de sécurisation des droits fonciers pourrait avoir des effets différenciés sur les investissements et sur les stratégies d'adaptation. Ensuite, la sécurisation des transactions foncières ouvre l'opportunité de stratégies d'adaptation par les marchés fonciers. En effet, les cessions et les acquisitions (définitives ou temporaires) peuvent permettre de diversifier les parcelles cultivées et les risques climatiques associés. Les cessions peuvent aussi financer des activités extra-agricoles et des migrations (Castro et Kuntz, 2022). Par ailleurs, une meilleure sécurité foncière peut faciliter la mise en œuvre de politiques de réduction des émissions de CO₂ (Djenontin *et al.*, 2018). Cependant, lorsque la formalisation de droits fonciers est une condition préalable à la mise en œuvre de politiques d'atténuation et d'adaptation, on peut craindre au contraire qu'elle marginalise davantage les plus vulnérables (Almeida et Jacobs, 2022). La formalisation de la propriété privée ne signifie pas nécessairement une amélioration de la sécurité foncière des populations (Colin *et al.*, 2009). Quant aux effets de la reconnaissance des droits fonciers communautaires sur la déforestation, la littérature empirique n'est pas univoque. Les régimes fonciers locaux sont pluriels et encadrés dans des contextes institutionnels plus larges et ont par conséquent des effets différenciés sur la déforestation, à analyser au cas par cas (Robinson *et al.*, 2014).

La migration est également un élément central des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, dont les effets pour les agricultures familiales sont remis en question. Un premier volet d'initiatives concerne les politiques de réduction des risques de catastrophes (RRC). Il s'agit d'abord de prévenir des catastrophes au moyen d'infrastructures (digues, canaux de drainage, etc.) et d'améliorer les systèmes d'alerte (Giry, 2023). Ensuite, il s'agit d'atténuer les effets de la catastrophe par le déplacement et la réinstallation planifiée des populations vivant dans des zones à haut risque (Almeida et Jacobs, 2022). La construction d'infrastructures ou la réinstallation de personnes dépendent alors souvent de l'acquisition de terres, affectant les droits de ceux qui sont expropriés et de ceux qui accueillent de nouveaux arrivants. Enfin,

quand les catastrophes adviennent, le déplacement⁵ est le dispositif majeur d'adaptation. Ces déplacements sont temporaires ou permanents avec une réinstallation (ou une relocalisation planifiée) et se produisent avant tout à l'intérieur des frontières d'un pays (Naser, 2012). Ils peuvent être à l'origine d'insécurité foncière et favoriser les conflits s'ils ne sont pas mis en œuvre avec soin (Brzoska, 2019). En effet, ces déplacements sont intrinsèquement porteurs de changements concernant l'accès aux terres, à la fois dans les zones de départ et d'accueil, faisant des droits fonciers un double problème dans la réponse au changement climatique (Quan et Dyer, 2008 ; Jacobs et Almeida, 2020). Le choix des sites de relocalisation est crucial. Privilégier le statut public des terres peut écarter des options où les personnes concernées préfèrent des mobilités fondées sur la famille ou sur le groupe (voir paragraphe 1.2), moins propices aux conflits fonciers que des mouvements hors du groupe. C'est le cas de la réinstallation réussie à l'intérieur de l'île de familles samoanes à la suite du tsunami de 2009 (Charan *et al.*, 2017). De fait, les systèmes fonciers coutumiers méritent davantage de reconnaissance dans la réponse au déplacement et pour faciliter la réinstallation (Fitzpatrick, 2022), y compris en considérant que certains espaces du domaine de l'État ne sont pas exempts de droits coutumiers et d'usagers n'ayant pas de droits formels. L'expérience montre que les programmes volontaires peuvent être plus efficaces et qu'une réinstallation planifiée sur de courtes distances est mieux adaptée (Correa *et al.*, 2011). Enfin, les déplacements ont des effets différenciés dans l'accès aux ressources d'assistance : alors que certaines familles sont plus à même de capter les aides grâce à leurs capitaux sociaux, le déplacement peut aussi être favorable à des populations plus vulnérables qui s'autonomisent grâce à de nouveaux droits fonciers (Giry, 2023).

Le second volet d'action publique relève de politiques de développement à moyen terme dans lesquelles les autorités ont commencé à inclure les mobilités comme levier d'adaptation, notamment dans les contributions déterminées au niveau national⁶ (CDN) et les plans nationaux d'adaptation (PNA)⁷ (Oakes *et al.*, 2022). Les CDN et les PNA peuvent être des vecteurs importants pour intégrer la mobilité humaine dans les cadres politiques nationaux (Mombauer *et al.*, 2023). En effet, les CDN et des PNA peuvent apporter des réponses aux questions d'(im)mobilité humaine liées au changement climatique, d'une part en atténuant les pressions liées à la migration en évitant les déplacements et en réduisant la nécessité d'une relocalisation planifiée, et d'autre part en soutenant la migration en tant qu'adaptation (Warner *et al.*, 2014). Si les mobilités sont de plus en plus présentes dans les CDN, peu de pays proposent des interventions pour remédier à ses effets néfastes ou pour promouvoir les aspects adaptatifs. Mombauer (2023) montre que la vision dominante dans les PNA est celle

5. Dans un contexte de catastrophes naturelles, le déplacement est alors un mouvement forcé de personnes du fait d'un dispositif public (CAF, 2010). En 2020, sur plus de 30 millions de déplacements liés aux catastrophes naturelles, 98 % étaient dus à des événements à évolution rapide tels que les inondations, les tempêtes ou les incendies (OIM, 2022).

6. Les CDN sont des véhicules articulant les engagements de chaque pays pour réduire les émissions nationales et s'adapter aux impacts du changement climatique conformément aux objectifs de l'accord de Paris (UNFCCC, 2015).

7. Les PNA eux visent à identifier les besoins d'adaptation à moyen et long terme et à élaborer et mettre en œuvre des stratégies, des programmes et des plans pour y répondre. Le processus des PNA a été établi lors de la 16^e Conférence des parties (COP) en 2010 au sein du cadre d'adaptation de Cancún, afin d'identifier les besoins d'adaptation à moyen et long terme et d'élaborer et de mettre en œuvre des stratégies, des programmes et des plans pour y répondre (UNFCCC, 2011).

de la mobilité en tant que risque ou problème. Pourtant, les CDN et les PNA peuvent améliorer l'intégration de la mobilité humaine en tant qu'opportunité, dans une série de secteurs politiques prioritaires pour l'adaptation et pour les pertes et dommages. Cela souligne le besoin d'un financement adéquat et de capacités institutionnelles pour renforcer l'intégration de la mobilité humaine dans ces instruments.

3. Références bibliographiques

- Agrawal A., 2010. Local institutions and adaptation to climate change. *In: Mears and Norton (Eds), Social dimensions of climate change: Equity and vulnerability in a warming world*, 173-198.
- Almeida B., Jacobs C., 2022. Land Expropriation – The Hidden Danger of Climate Change Response in Mozambique. *Land Use Policy*, 123:106408. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106408>
- Anseuw W., Baldinelli G.M., 2021. Uneven ground – Des inégalités foncières au cœur des inégalités sociétales, ILC, OXFAM.
- Barrios S., Bertinelli L., Strobl E.E., 2006. Climatic Change and Rural–Urban Migration: The Case of Sub-Saharan Africa. *Journal of Urban Economics*, 60(3):357-71. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2006.04.005>
- Benveniste H., Oppenheimer M., Fleurbaey M., 2022. Climate Change Increases Resource-Constrained International Immobility. *Nature Climate Change*, 12(7):634-41. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01401-w>
- Black R., Adger W.N., Arnell N.W., Dercon S., Geddes A., Thomas D., 2011. Migration and Global Environmental Change. *Global Environmental Change*, 21:S1-2. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.005>
- Boas I., Wiegel H., Farbotko C., Warner J., Sheller M., 2022. Climate Mobilities: Migration, Im/Mobilities and Mobility Regimes in a Changing Climate. *Journal of Ethnic and Migration Studies*, 48(14): 3365-79. <https://doi.org/10.1080/1369183X.2022.2066264>
- Borderon M., Sakdapolrak P., Muttarak R., Kebede E., Raffaella Pagnogna R., Sporer E., 2019. Migration Influenced by Environmental Change in Africa: A Systematic Review of Empirical Evidence. *Demographic Research*, 41:491-544. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2019.41.18>
- Borras S.M., Franco J.C., Nam Z., 2020. Climate change and land: Insights from Myanmar. *World Development*, 129:104864. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104864>
- Borras S., Scoones I., Baviska A., Edelman M., Peluso Lee N., Wolorf W., 2023. Climate Change and Critical Agrarian Studies. *In: Climate Change and Critical Agrarian Studies*. London New York (N.Y.): Routledge. <https://pure.eur.nl/en/publications/climate-change-and-agrarian-struggles>
- Brüning L., Piguët E., 2018. Changements environnementaux et migration en Afrique de l'Ouest. Une revue des études de cas. *Belgeo*, 1. <https://doi.org/10.4000/belgeo.28836>
- Brzoska M., 2019. Understanding the Disaster–Migration–Violent Conflict Nexus in a Warming World: The Importance of International Policy Interventions. *Social Sciences*, 8(6):167. <https://doi.org/10.3390/socsci8060167>
- Burnod P., 2022. Les grandes acquisitions foncières : Réalités, enjeux et trajectoires. *In: Colin J.-P., Lavigne Delville P., Léonard É. (Eds), Le foncier rural dans les pays du Sud : Enjeux et clés d'analyse*, 633-716, Objectifs Suds, Marseille: IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.45410>
- Burzyński M., Deuster C., Docquier F., De Melo J., 2022. Climate Change, Inequality, and Human Migration. *Journal of the European Economic Association*, 20(3):1145-97. <https://doi.org/10.1093/jeea/jvab054>
- Castro B., Kuntz C., 2022. Land Tenure Insecurity and Climate Adaptation: Socio-Environmental Realities in Colombia and Implications for Integrated Environmental Rights and Participatory Policy. *In: Holland M.B., Masuda Y.J., Robinson B.E. (Eds), Land Tenure Security and Sustainable Development*, 177-99, Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81881-4_9
- Cattaneo C., Beine M., Fröhlich C.J., Kniveton D., Martinez-Zarzoso I., Mastroiello M., et al., 2019. Human Migration in the Era of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2):189-206. <https://doi.org/10.1093/reep/rez008>

- Cavanagh C., Benjaminsen T.A., 2014. Virtual nature, violent accumulation: The 'spectacular failure' of carbon offsetting at a Ugandan National Park. *Geoforum*, 56:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.06.013>
- Charan D., Kaur M., Singh P., 2017. Customary Land and Climate Change Induced Relocation—A Case Study of Vunidogoloa Village, Vanua Levu, Fiji. In: Filho W.L. (Ed.), *Climate Change Adaptation in Pacific Countries*, 19-33, Climate Change Management, Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50094-2_2
- Cissé P., Zorom M., Barbier B., Maiga A., 2010. Les migrations, une stratégie d'adaptation à la variabilité climatique en zones sahéliennes. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, (8):184-96.
- Clement V., Rigaud K.K., de Sherbinin A., Jones B., Adamo S., Schewe J., et al., 2021. Groundswell Part 2: Acting on Internal Climate Migration. <http://hdl.handle.net/10986/36248>
- Colin J.-P., Daoudi A., 2022. Dynamiques foncières, dynamiques agraires. In: Lavigne Delville P., Léonard É (Eds), *Le foncier rural dans les pays du Sud : Enjeux et clés d'analyse*, 399-471. Objectifs Suds. Marseille, IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.45233>
- Colin J.-P., Le Meur P.-Y., Léonard E., 2009. *Les politiques d'enregistrement des droits fonciers: du cadre légal aux pratiques locales*. Paris: Karthala, 538 p.
- Correa E., Ramírez H., Sanahuja H., 2011. Populations at Risk of Disaster: A resettlement guide. Washington D.C.: World Bank, 157 p.
- Cotula L., 2012. The International Political Economy of the Global Land Rush: A Critical Appraisal of Trends, Scale, Geography and Drivers. *The Journal of Peasant Studies*, 39(3-4), 649-680. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03066150.2012.674940>
- Djenontin Ida Nadia S., Foli S., Zulu Leo C., 2018. Revisiting the Factors Shaping Outcomes for Forest and Landscape Restoration in Sub-Saharan Africa: A Way Forward for Policy, Practice and Research. *Sustainability*, 10, 4:906. <https://doi.org/10.3390/su10040906>
- Fairhead J., Leach M., Scoones I., 2012. Green Grabbing: a new appropriation of nature? *The Journal of Peasant Studies*, 39(2): 237-61. <https://doi.org/10.1080/03066150.2012.671770>
- FAO, 2022. *La situation des forêts du monde 2022*. Food and Agriculture Organisation. <https://doi.org/10.4060/cb9360fr>
- Fitzpatrick D., 2022. Research Brief on Land Tenure and Climate Mobility in the Pacific Region. Pacific Islands Forum Secretariat, PRP.
- Gemenne F., Blocher J., 2017. How Can Migration Serve Adaptation to Climate Change? Challenges to Fleshing out a Policy Ideal. *The Geographical Journal*, 183(4):336-47. <https://doi.org/10.1111/geoj.12205>
- German L., Schoneveld G., 2012. A review of social sustainability considerations among EU-approved voluntary schemes for biofuels, with implications for rural livelihoods. *Energy Policy*, Renewable Energy in China, 51:765-78. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.022>
- Giry B., 2023. *Sociologie des catastrophes*. Repères 813. Paris, La Découverte, 128 p.
- He J., Wang J., 2023. Certificated Exclusion: Forest Carbon Sequestration Project in Southwest China. *The Journal of Peasant Studies*, 50(6):2165-86. <https://doi.org/10.1080/03066150.2022.2163163>
- Hunsberger C., Corbera E., Borrás S.M., Franco J.C., Woods K., Work C., et al., 2017. Climate Change Mitigation, Land Grabbing and Conflict: Towards a Landscape-Based and Collaborative Action Research Agenda. *Canadian Journal of Development Studies / Revue Canadienne d'études Du Développement*, 38(3):305-24. <https://doi.org/10.1080/02255189.2016.1250617>
- IDMC, Internal Displacement Monitoring Centre, 2023. 2023 Global Report on Internal Displacement (GRID). <https://www.internal-displacement.org/publications/2023-global-report-on-internal-displacement-grid/>
- IPCC, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- IPCC, 2023. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

- Jacobs C., Almeida B., 2020. Land and climate change: Rights and environmental displacement in Mozambique. Research report. Van Vollenhoven Institute for Law, Governance and Society (VVI).
- Karsenty A., 2019. Les PSE dans les pays en développement : compenser ou récompenser ? In: Laglais A. (Coord.), *L'agriculture et les Paiements pour Services Environnementaux. Quels questionnements juridiques ?*, PUR, 447 p. 978-2-7535-7601-8. <https://hal.science/hal-02080034>
- Lalou R., Delaunay V., 2015. Chapitre 14. Migrations saisonnières et changement climatique en milieu rural sénégalais». In: Sultan B., Lalou R., Sanni M.A., Oumarou A., Soumaré M.A. (Coords), *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, 287-313. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9830>
- Larson A.M., Brockhaus M., Sunderlin W.D., Duchelle A., Babon A., Dokken T., et al., 2013. Land Tenure and REDD+: The Good, the Bad and the Ugly. *Global Environmental Change* 23(3):678-89. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.02.014>
- Leal Filho W., Olaniyan O.F., Nagle Alverio G., 2022. Where to Go? Migration and Climate Change Response in West Africa. *Geoforum*, 137:83-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.10.011>
- Le Meur P.-Y., Rodary E., 2022. Foncier et dispositifs environnementalistes. In: Lavigne Delville P., Léonard É (Eds), *Le foncier rural dans les pays du Sud : Enjeux et clés d'analyse*, 863-940, Objectifs Suds, Marseille: IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.45513>
- Losch B., 2022. Decent Employment and the Future of Agriculture. How Dominant Narratives Prevent Addressing Structural Issues. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6:862249. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.862249>
- Lowder S.K., Sánchez M.V., Bertini R., 2021. Which Farms Feed the World and Has Farmland Become More Concentrated? *World Development*, 142:105455. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455>
- Malkamäki A., D'Amato D., Hogarth N.J., Kanninen M., Pirard R., Toppinen A., Zhou W., 2018. A Systematic Review of the Socio-Economic Impacts of Large-Scale Tree Plantations, Worldwide. *Global Environmental Change*, 53:90-103. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.001>
- McDowell C., 2013. Climate-Change Adaptation and Mitigation: Implications for Land Acquisition and Population Relocation. *Development Policy Review*, 31(6):677-95. <https://doi.org/10.1111/dpr.12030>
- Mercandalli S., Losch B., Belebema M.N., Bélières J.-F., Bourgeois R., Dinbabo M.F., et al., 2019. Rural migration in sub-Saharan Africa: Patterns, drivers and relation to structural transformation. Rome: FAO, Cirad. <https://doi.org/10.4060/ca7404en>
- Meze-Hausken E., 2008. On the (Im-)Possibilities of Defining Human Climate Thresholds. *Climatic Change*, 89(3-4):299-324. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9392-7>
- Moizo B., 2000. Déforestation et dynamiques migratoires (Madagascar). In: Gillon Y., Chaboud C., Boutrais J., Mullon C., Weber J. (Coords), *Du bon usage des ressources renouvelables*, 169-85, IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.25394>
- Mombauer D., Link A.-C., Van Der Geest K., 2023. Addressing climate-related human mobility through NDCs and NAPs: State of play, good practices, and the ways forward. *Frontiers in Climate*, 5:1125936. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1125936>
- Morrissey J., 2014. Environmental Change and Human Migration in Sub-Saharan Africa. In: Piguet E., Laczko F. (Coords), *People on the Move in a Changing Climate*, 2:81-109, Global Migration Issues, Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6985-4_4
- Mounkaïla H., 2002. De la migration circulaire à l'abandon du territoire local dans le Zarmaganda (Niger). *Revue européenne des migrations internationales*, 18(2):161-87. <https://doi.org/10.4000/remi.1662>
- Murken L., Gornott C., 2022. The importance of different land tenure systems for farmers' response to climate change: A systematic review. *Climate Risk Management*, 35:100419. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100419>
- Naser M.M., 2012. Climate Change, Environmental Degradation, and Migration: A Complex Nexus. *William & Mary Environmental Law and Policy Review*, 36(3).

Nyantakyi-Frimpong H., 2020. What Lies beneath: Climate Change, Land Expropriation, and Zai Agroecological Innovations by Smallholder Farmers in Northern Ghana. *Land Use Policy*, 92:104469. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104469>

Oakes R., Van Der Geest K., Coredea C., 2022. Any Port in a Storm? Climate, Mobility, and Choice in Pacific Small Island Developing States. In: Behrman S., Kent A. (Eds), *Climate Refugees*, 249-60, Cambridge University Press.

Obeng-Odoom F., 2017. Unequal Access to Land and the Current Migration Crisis. *Land Use Policy*, 62:159-71. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.12.024>

Owen J.R., Kemp D., Lechner A.M., Harris J., Zhang R., Lèbre É., 2023. Energy Transition Minerals and Their Intersection with Land-Connected Peoples. *Nature Sustainability*, 6(2):203-11. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00994-6>

Potts D., 2010. *Circular migration in Zimbabwe & contemporary sub-Saharan Africa*. Woodbridge, Suffolk; Rochester, NY: James Currey, 312 p.

Quan J., Dyer N., 2008. Climate change and land tenure. The implication of climate change for land tenure and policy. FAO.

Rakotomalala H., Bouquet E., Burnod P., 2022. Marchés fonciers et accès à la terre des migrants dans l'Ouest de Madagascar : opportunités et contraintes. *Économie rurale*, 381,79-93. <https://doi.org/10.4000/economierurale.10375>

Richardson B., 2010. Big Sugar in Southern Africa: Rural Development and the Perverted Potential of Sugar/Ethanol Exports. *The Journal of Peasant Studies*, 37(4):917-38. <https://doi.org/10.1080/03066150.2010.512464>

Robinson B.E., Holland M.B., Naughton-Treves L., 2014. Does secure land tenure save forests? A meta-analysis of the relationship between land tenure and tropical deforestation. *Global Environmental Change*, 29:281-93. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.012>

Romero M., Saavedra S., 2021. Communal Property Rights and Deforestation. *Journal of Development Studies*, 57(6):1038-52.

Scheidel A., Sorman A.H., 2012. Energy transitions and the global land rush: Ultimate drivers and persistent consequences. *Global Environmental Change*, Global transformations, social metabolism and the dynamics of socio-environmental conflicts, 22(3):588-95. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.12.005>

Thalheimer L., Williams D.S., Van Der Geest K., Otto F.E.L., 2021. Advancing the Evidence Base of Future Warming Impacts on Human Mobility in African Drylands. *Earth's Future*, 9(10):e2020EF001958. <https://doi.org/10.1029/2020EF001958>

Thornton F., Andreolla Serraglio D., Thornton A., 2023. Trapped or staying put: Governing immobility in the context of climate change. *Frontiers in Climate*, 5:1092264. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1092264>

Turner M.D., Davis D.K., Yeh E.T., Hiernaux P., Loizeaux E.R., Fornof E.M., et al., 2023. Great Green Walls: Hype, Myth, and Science. *Annual Review of Environment and Resources*, 48(1):263-87. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-111102>

Vesco P., Dasgupta S., De Cian E., Carraro C., 2020. Natural Resources and Conflict: A Meta-Analysis of the Empirical Literature. *Ecological Economics*, 172:106633. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106633>

Warner K., Kälin W., Martin S.F., et al., 2014. Integrating human mobility issues within National Adaptation Plans. Policy brief n°9. Bonn: UNU-EHS. <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:1838/pdf11800.pdf>

Zickgraf C., 2021. Theorizing (Im)Mobility in the Face of Environmental Change. *Regional Environmental Change*, 21(4):126. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01839-2>

Zickgraf C., Vigil S., Longueville F., Ozer P., Gemenne F., 2016. The Impact of Vulnerability and Resilience to Environmental Changes on Mobility Patterns in West Africa. World Bank.

Nous adressons nos vifs remerciements à Alain Karsenty (Cirad), Quentin Grislain (Cirad) et Jeremy Bourgoïn (Cirad-ILC) pour leurs précieux retours et contributions à ce chapitre.

Chapitre 7

Eau, agriculture et changement climatique : perspectives globales

Magalie Bourblanc, Caroline Lejars, Pierre-Louis Mayaux

Selon les prédictions actuelles, un tiers de la population mondiale devrait être confrontée, dans les années qui viennent, à de sévères pénuries d'eau une partie de l'année, notamment sous l'effet du changement climatique. Le dérèglement climatique va-t-il conduire à un dérèglement hydrologique tout aussi dramatique ? En réalité, le changement climatique risque surtout de conforter et d'aggraver — plutôt que d'enclencher par lui-même — une trajectoire insoutenable d'utilisation de la ressource en eau, déjà à l'œuvre en de nombreux endroits du monde depuis plusieurs décennies. Le dernier rapport de la FAO, qui dresse un bilan de l'état des ressources en eau et des sols dans le monde, est sans appel. Intitulé « Des systèmes au bord de la rupture » (FAO, 2021), il ne laisse guère de place au doute : « une pression sans précédent » s'exerce sur les ressources naturelles « poussées à la limite de leurs capacités de production ».

Dans un premier temps, nous partagerons un certain nombre de constats sur les usages en eau croissants, en déclinant les principales pressions qui s'exercent sur la ressource en eau. Nous évoquerons ensuite la manière dont la ressource a été définie, depuis de nombreuses années déjà, comme un problème public global, en insistant — entre autres — sur la dimension sécuritaire sur laquelle ce cadrage global met souvent l'accent et sur le rôle qu'un manque de partage équitable de celle-ci pourrait jouer dans le déclenchement de conflits. Nous montrerons ensuite comment ce cadrage au niveau international a permis d'appuyer le retour en grâce d'une politique de l'offre centrée sur la construction de grands ouvrages hydrauliques en eau, particulièrement visible dans les différentes politiques d'aide au développement, mais aussi comment l'enjeu de la lutte contre le changement climatique offre une nouvelle justification de choix au technosolutionnisme de manière générale. En effet, la question de l'eau revêt une importance primordiale dans la problématique de l'adaptation au changement climatique. Ainsi, pour la Banque mondiale, « l'eau est à l'adaptation ce que l'énergie est à l'atténuation, et les défis que devra affronter la planète pour s'adapter aux problématiques liées à cette ressource sont énormes¹ ». Il convient de ne pas se laisser aveugler par « l'urgence climatique » en nous précipitant vers la mise en œuvre de solutions qui relèvent de la maladaptation (Boutroue *et al.*, 2022).

1. Pôle mondial d'expertise en eau, 2016. Bientôt à sec ? Changement climatique, eau et économie, résumé analytique, Banque mondiale.

1. Des pressions croissantes sur les ressources en eau : des systèmes au bord de la rupture

1.1. Des constats alarmants

Les constats autour de la disponibilité des ressources en eau dans le monde sont alarmants. À titre d'exemple, 47% de la population mondiale vit actuellement dans des zones qui souffrent de pénurie d'eau au moins un mois par an. Ce chiffre devrait atteindre 57 % d'ici 2050, selon le rapport mondial des Nations unies.

Le stress hydrique² varie évidemment en fonction des zones géographiques. L'Afrique du Nord, l'Afrique australe et l'Afrique de l'Ouest disposent de moins de 1700 m³/hab., ce qui est considéré comme un niveau pouvant compromettre la capacité d'une nation à répondre en permanence à la demande alimentaire et à la demande en eau d'autres secteurs.

La trajectoire des ressources en eau douce disponibles est tout aussi préoccupante (figure 7.1). Le niveau des nappes souterraines, principalement utilisées par l'agriculture, s'effondre (Jasechko *et al.*, 2024). Entre 2000 et 2018, en dépit d'une diminution des prélèvements par habitant, le recul des ressources en eau renouvelables par habitant au niveau mondial a été de 20 % environ.

Le constat est sans appel. Depuis cinquante ans, c'est-à-dire avant même les premières manifestations du changement climatique, la demande mondiale en eau augmente deux fois plus vite que la population : 600 % d'augmentation au cours des cent dernières années, soit plus du double du taux de croissance démographique (Wada *et al.*, 2016). Les consommations comme les prélèvements explosent : d'ici 2050, la demande en eau devrait augmenter de 55 %. C'est le cas notamment de la demande en eau de l'industrie qui devrait augmenter partout dans le monde, à l'exception possible de l'Amérique du Nord et de l'Europe occidentale. Une telle demande devrait augmenter de 800 % en Afrique, où l'utilisation industrielle actuelle est encore négligeable, et de 250 % en Asie. La demande mondiale en eau pour le secteur manufacturier devrait augmenter de 400 % (Boretti et Rosa, 2019).

Quant à l'agriculture, qui reste la principale utilisatrice de l'eau dans le monde, avec une consommation³ moyenne de 60 % de l'eau « bleue » (celle qui transite dans les masses d'eau), la superficie équipée pour l'irrigation a plus que doublé au cours des dernières décennies (de 139 Mha en 1961 à 320 Mha en 2012) (FAO, 2014). La population mondiale a doublé entre 1970 et 2015 environ, mais la production de céréales a presque triplé, la production de légumes a quadruplé, la production de tomates a quintuplé et la production de soja a été multipliée par huit (FAO, 2020). Bien que les estimations mondiales et les projections soient encore incertaines, on prévoit que la demande alimentaire augmentera encore de 60 % d'ici 2050 (WWAP, 2018).

2. Le stress hydrique est le rapport entre le besoin en eau et les ressources disponibles. Il peut se mesurer en pourcentage (et atteindre ou excéder les 100 %) ou à partir de la quantité d'eau disponible par habitant et par an (m³/hab./an) (indicateur de Falkenmark). Les zones dont la disponibilité en eau par an et par habitant est inférieure à 1700 m³/hab./an sont considérées en situation de « stress hydrique ».

3. La consommation (ou prélèvement net) correspond à la partie de l'eau prélevée et non restituée aux milieux aquatiques.

Les changements climatiques régionaux, que ce soit en moyenne ou en extrême, deviennent de plus en plus étendus et plus prononcés pour chaque élévation de température (de 1,5 °C à 4 °C à l'échelle globale)

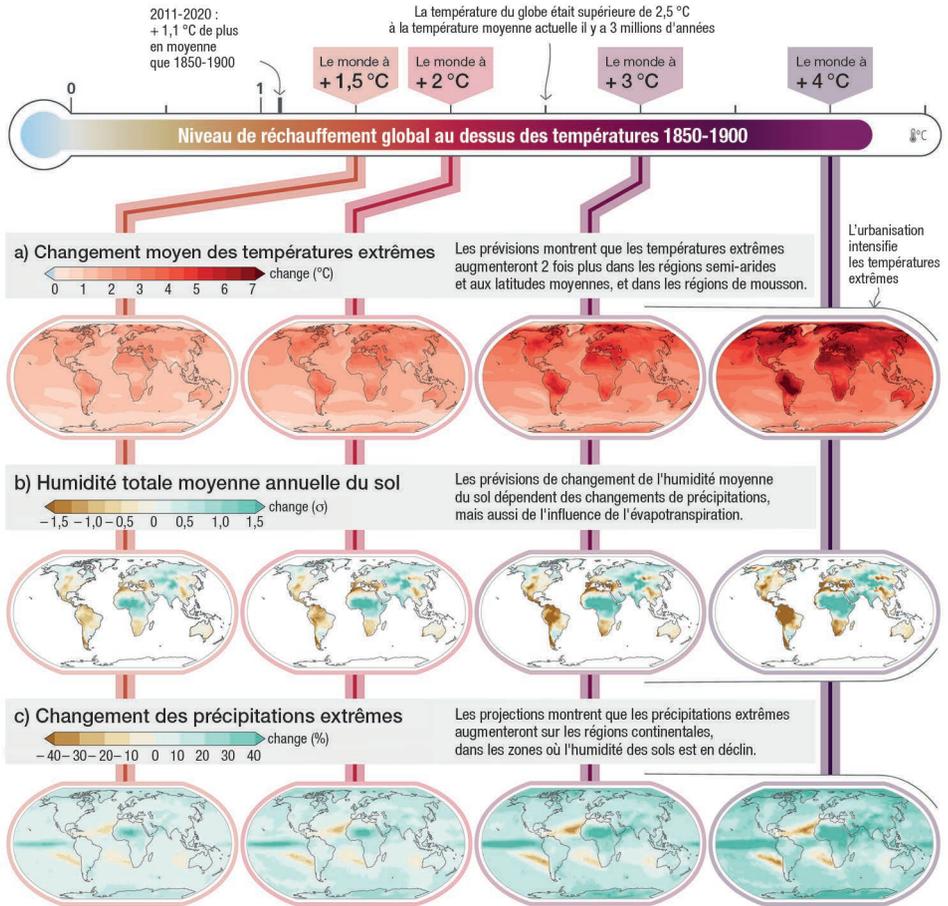


Figure 7.1. Évaluation de l'impact du changement climatique sur l'humidité des sols et les précipitations annuelles à l'échelle mondiale pour différents niveaux d'élévation de température. Source : Giec (2023).

Le réchauffement climatique entraîne une augmentation de la température moyenne mais aussi des événements extrêmes plus prononcés, avec de grandes variabilités en fonction des régions. a. Le nombre de jours avec des températures extrêmes s'accroît principalement dans les régions semi-arides. b. L'humidité du sol, ainsi que l'évapotranspiration sont affectées. c. Les précipitations annuelles augmentent dans les régions continentales, même dans les régions où l'humidité du sol décroît.

1.2. Les pressions sur la ressource : l'impact spécifique du changement climatique difficile à déterminer

Les principales pressions sur les ressources sont la croissance de la population et l'adoption de régimes alimentaires de plus en plus carnés. L'augmentation de la population serait responsable de 54 % de l'augmentation de la demande, les changements de régime alimentaire autour de 25 % de la demande (FAO, 2020).

La croissance de la population fait progresser de manière globale la demande en eau, même si la demande par habitant tend quant à elle à décroître (FAO, 2020). Selon les prévisions de la FAO, la population mondiale devrait ainsi passer de 7,7 milliards de personnes en 2019 à 9,7 milliards en 2050, soit un accroissement de 26 %.

Le changement de régime alimentaire est le second facteur affectant l'augmentation de la demande en eau. Les revenus plus élevés et les modes de vie urbains font évoluer la demande alimentaire vers une consommation de protéines animales, de fruits et de légumes, autant d'aliments qui nécessitent davantage de ressources pour être produits. En ce sens, la hausse de consommation globale en viande (58 % ces vingt dernières années) aurait un impact fort sur la demande en eau. Ces hypothèses se basent, cependant, sur des calculs où en moyenne 1 000 litres d'eau sont nécessaires pour produire 1 kg de céréales et 15 000 litres pour 1 kg de viande bovine. Néanmoins, cette dernière estimation globalisée est issue d'une métrique qui ne tient pas compte de la distinction entre l'eau « verte » et l'eau « bleue ». Le secteur de l'élevage est en effet fortement utilisateur d'eau, mais il s'agit en très grande majorité d'eau verte (93 % d'eau de pluie) liée à la production végétale et qui n'est donc pas prélevée sur les ressources. Seuls les systèmes de production animale intensifs hors-sol sont de gros consommateurs d'eau « bleue » (qui alimente donc les stocks d'eau dans les cours d'eau, les lacs, les nappes phréatiques).

D'autres facteurs de pression sur les ressources sont l'urbanisation croissante du monde et la diminution des terres à vocation agricole. L'augmentation de la production agricole au cours des soixante-dix dernières années s'inscrit dans un contexte, d'une part de baisse des surfaces des terres agricoles, et d'autre part d'intensification de la production. Cette dynamique s'est traduite par une augmentation de 20 % en vingt ans des superficies équipées pour l'irrigation.

La demande en eau est également fortement corrélée à la demande en énergie. D'une part, le développement des cultures énergétiques dans des systèmes pluviaux ou irrigués peut contribuer à améliorer l'offre d'énergie, mais peut aussi entraîner une compétition accrue pour les ressources en terres et en eau (Giovannetti et Ticci, 2016). D'autre part, le développement de l'hydroélectricité accroît les prélèvements en rivière (ce qui produit des ruptures de débits et peut affecter localement les populations et l'environnement).

La pénurie mondiale d'eau n'est pas seulement causée par la pénurie physique de la ressource, mais aussi par la détérioration progressive de la qualité de l'eau dans de nombreux pays (FAO, 2017). Cette dégradation est imputable au manque d'assainissement qui contribue à la pollution de l'eau (90 % des eaux usées sont rejetées dans l'eau sans traitement; WHO et Unicef, 2015), aux rejets industriels (chaque année 300 à 400 Mt de déchets dans l'eau; WWAP, 2018), et à l'agriculture. L'agriculture est la source prédominante d'azote présente dans l'eau et une source importante de phosphore (PNUE, 2016). Dans les pays de l'OCDE, bien que les niveaux actuels de pollution par l'azote et par le phosphore en provenance de l'agriculture dépassent déjà les capacités d'absorption de la planète, les rejets d'azote et d'effluents phosphorés devraient augmenter de 180 % et 150 % respectivement, d'ici 2050 (OECD, 2012).

Dans ce contexte, l'impact du changement climatique sur les ressources en eau est difficile à évaluer, compte tenu de la grande variabilité entre pays et des variations internes à chaque pays. Les simulations effectuées par le rapport du Giec montrent

des impacts très contrastés, en fonction des pays, certains ayant des ressources qui s'accroissent (nord de l'Europe, Russie, Asie centrale), tandis que d'autres verront (et ont déjà vu) leurs ressources diminuer fortement (Afrique subsaharienne et saharienne). Par ailleurs, les scénarios montrent une augmentation des événements extrêmes (sécheresses, inondations).

Enfin, la part de responsabilité des prélèvements par rapport à celle du changement climatique est difficile à établir avec précision, car ces deux phénomènes (baisse de la ressource et augmentation de la demande) agissent en synergie, le réchauffement climatique et la baisse des précipitations conduisant les agriculteurs à irriguer davantage. En conséquence, en l'absence de mesures d'adaptation à cette nouvelle donne, plus de 4 milliards d'individus pourraient faire l'expérience d'une pénurie d'eau en 2050, pénurie qui affectera également la sécurité alimentaire mondiale (FAO, 2020). Ces données brutes alimentent un récit autour d'une « crise de l'eau » pouvant exacerber les conflits, voire nourrir de véritables guerres de l'eau, comme nous allons le voir dans le paragraphe ci-dessous.

2. De la crise aux conflits, puis aux guerres de l'eau ?

Le discours autour d'une pénurie pouvant déboucher sur de véritables crises de l'eau est largement véhiculé par les institutions internationales, et repris dans les médias. Il existe, par ailleurs, une grande proximité, dans une abondante littérature internationale au croisement de la sécurité, de la défense et du développement international, entre la thématique des conflits climatiques et celle des conflits pour l'eau (Homer-Dixon, 1999; Koubi, 2019). Cette littérature considère la pénurie comme un facteur de déstabilisation des États et des sociétés. On sait déjà que le manque d'accès à l'eau génère de grands mouvements migratoires, du fait des crises alimentaires qu'il provoque. Quand les campagnes souffrent, les villes en subissent également les conséquences. Le Proche-Orient a largement servi de laboratoire à des analyses sur les troubles politiques générés par ces pénuries, analyses qui ont ensuite été généralisées à l'ensemble des pays en développement (Gleick, 2014). La thèse d'un lien entre les sécheresses et les conflits violents a ainsi été avancée, plus récemment, pour de nombreux pays, de l'Égypte à l'Indonésie en passant par l'Afrique subsaharienne (Werrel *et al.*, 2015; Caruso *et al.*, 2016; Buhaug *et al.*, 2015).

La focale dominante de cette littérature vise les « pays pauvres », qui englobent selon Baechler (1998; p. 25) : l'Afrique, l'Amérique latine, l'Asie centrale et du Sud. Ce faisant, elle participe à reproduire une division imaginaire entre un « Sud » anarchique et conflictuel, et un « Nord » civilisé et pacifié. Les conflits violents pour l'eau ne paraissent débiter que sur l'autre rive de la Méditerranée ou du Rio Grande, ce qui surprendra le lecteur français ayant à l'esprit la violence des affrontements autour des « mégabassines⁴ » dans les Deux-Sèvres, ou le lecteur américain songeant aux menaces très sérieuses, proférées par les milices d'extrême droite de l'Oregon, de s'emparer des barrages de la région pour y effectuer des lâchers d'eau prioritaires vers leur État⁵.

4. Barroux R., 2023. Mégabassines : à Sainte-Soline, une mobilisation massive et marquée par de violents affrontements, *Le Monde*.

5. Wilson J., 2021. Amid mega-drought, rightwing militia stokes water rebellion in US West, *The Guardian*.

De fait, le « Nord » n'est pas épargné par les conflits pour l'eau, comme on le voit avec le regain de tensions autour du Tage, un fleuve transfrontalier entre l'Espagne et le Portugal. Les associations environnementales portugaises dénoncent aujourd'hui la convention d'Albufeira signée en 2000, qui autorisait le détournement d'une partie des eaux vers la vaste zone d'agriculture intensive du sud de l'Andalousie⁶. Elles reprochent aux Espagnols de trop puiser dans le fleuve au détriment du Portugal plus en aval. L'eau pourrait donc dès lors constituer un nouvel enjeu géopolitique majeur pour les pays du Sud comme du Nord.

Pendant longtemps, la littérature académique a cherché à tempérer cet emballement, et la logique supposément implacable de cette mécanique des conflits. Les travaux académiques soulignaient alors plutôt les coopérations autour de l'eau et son rôle pour cimenter la paix entre États rivaux (Lasserre et Brun, 2018), y compris entre des États partageant un même bassin-versant « déficitaire » et entre des États par ailleurs hostiles⁷. L'exemple le plus couramment cité est l'accord existant entre l'Inde et le Pakistan pour le partage de l'Indus, en vigueur depuis 1960, qui a survécu aux trois guerres ayant opposé les deux pays depuis sa signature. Au sein des pays, de nombreuses études concluent à la difficulté de distinguer un effet spécifique de la pénurie d'eau sur la conflictualité sociale⁸.

Un autre problème de cette littérature sur les « guerres de l'eau » est qu'elle naturalise la pénurie. La raréfaction, à n'en pas douter, est en partie le produit de causalités « naturelles », indépendantes des différents acteurs à court et moyen terme : accroissement démographique, baisse des précipitations et hausse de l'évapotranspiration liées au réchauffement climatique. Mais elle est tout autant le résultat de choix sociaux opérant sur des temporalités diverses : choix des productions agricoles, stratégies d'insertion dans le commerce international, état des infrastructures de stockage de l'eau, matrice énergétique, politiques d'aménagement du territoire, modes de consommation, etc. Or, l'enchevêtrement complexe de ces processus sociaux et leur propension à évoluer au cours du temps sont largement ignorés par des auteurs positivistes marqués par l'empreinte des sciences naturelles (Jabri, 1996 ; Magrin, 2023).

La sociologue Lyla Mehta (2001) compte parmi les auteurs ayant le plus développé cette critique⁹. Il ne s'agit pas, pour elle, de nier la validité des données brutes produites par cette perspective globalisante, mais d'en critiquer les effets de cadrage. En développant « une conception absolue de la rareté environnementale », cette perspective totalisante finirait en effet par occulter la manière dont la rareté affecte très différemment les territoires et les groupes sociaux. Elle dissimulerait le fait que « la véritable rareté n'est pas due, dans la plupart des cas, à une absence physique d'eau, mais à un manque de

6. N. Hervé-Fournereau citée dans l'article de : Cailloce L., 2023. La guerre de l'eau aura-t-elle lieu?, *Le Journal du CNRS*.

7. La base de données sur les traités internationaux ayant les ressources en eau douce pour objet, tenue par l'université de l'Oregon, estime ainsi que sur 1831 « interactions significatives » recensées depuis 1945, 1228 étaient « coopératives ». Elle recense également plus de 400 traités internationaux en vigueur, la plupart étant « très durables ».

8. Pour une revue de cette littérature empirique, voir : Fröhlich C.J., 2012. Water: Reason for Conflict or Catalyst for Peace? The Case of the Middle East, *L'Europe en Formation*, 365(3), 139-161.

9. Mehta, 2001. Voir aussi : Huff A., Mehta L., 2019. Untangling Scarcity, in Brewer J., Fromer N., Jonsson F.A., Trentmann F., *Scarcity in the Modern World History, Politics, Society and Sustainability, 1800-2075*, Bloomsbury Publishing, chap. 3, p. 27-46.

ressources monétaires, de pouvoir économique et politique». C'est ce que d'autres auteurs ont appelé la capacité à mobiliser la ressource, qu'ils considèrent également comme plus déterminante que ce que les chiffres peuvent prédire (Blanchon, 2024). Dans une perspective convergente, Fernandez (2014) a souligné les effets dépolitisants, car « moyennisants », de l'indicateur de stress hydrique le plus répandu dans les médias et les documents de politique publique, celui dit de « Falkenmark ». Un tel indicateur contribue à invisibiliser les inégalités sociales d'accès, non seulement en s'en tenant à de telles moyennes nationales, mais également en véhiculant le postulat, malthusien, selon lequel la croissance démographique serait le principal moteur du stress hydrique (l'accroissement de la population dégradant mécaniquement l'indicateur) au détriment de causalités d'ordre social et politique¹⁰.

Malgré ces nuances et ces appels à la vigilance critique, l'idée de tensions exacerbées autour de « l'or bleu » (comme auparavant autour de « l'or noir » et du pétrole) refait régulièrement surface. Le consensus à l'heure actuelle est de dire que la ressource en eau n'est souvent pas à l'origine de ces conflits, ou en tout cas pas leur cause première, mais que la nouvelle donne du changement climatique pourrait bien cependant les aggraver en attisant des conflits déjà latents. Cela contribue à ériger la question de l'eau en sujet hautement politique et d'importance mondiale, comme nous allons le voir dans la suite du chapitre. En effet, en agitant le chiffon rouge de conflits potentiels à venir autour de l'eau, la communauté internationale peut d'autant plus facilement justifier des recettes d'action publique standardisées au niveau international.

3. Des politiques standardisées et généralisées à l'échelle internationale

3.1. Le retour en force des projets d'augmentation de la ressource

Les grands projets d'infrastructures hydrauliques pour stocker l'eau ralentissaient depuis les années 1990. En effet, les ONG avaient souhaité instaurer un moratoire, étant donné leur impact sur la biodiversité, les déplacements massifs de la population qu'ils occasionnaient et leur bilan mitigé en matière de réduction de la pauvreté dans les pays en développement. Elles furent à l'initiative de la constitution de la Commission mondiale des barrages sous l'égide de la Banque mondiale.

Pourtant, après un déclin des investissements au tournant du XXI^e siècle, les grands ouvrages hydrauliques ont signé leur grand retour dès 2003 avec des financements de la Banque mondiale (Lynch, 2013), et une part croissante désormais de financements provenant des États eux-mêmes avec des projets en Chine, en Inde, en Iran, en Turquie, en Éthiopie, etc. Le développement des projets de désalinisation constitue un autre exemple d'investissement dans le technosolutionnisme. En 2013, il existait de par le monde plus de 17 000 usines de dessalement d'eau de mer, desservant plus de 300 millions de personnes dans 150 pays.

Ce technosolutionnisme est souvent conforté par la problématique du changement climatique, à la fois dans sa dimension d'atténuation et dans sa dimension d'adaptation : la question de l'eau se situe en effet à la croisée de ces deux versants de la lutte contre le changement climatique. C'est aujourd'hui, d'ailleurs, cette motivation climatique

10. Cet indicateur évacue aussi la question du partage, également très politique, entre ce qui doit être produit sur le territoire national avec les ressources en eau disponibles, et ce qui doit au contraire être importé.

affichée qui prend le dessus dans la justification de la poursuite de ces grands projets d'infrastructures (Barone et Mayaux, 2019). La limitation des émissions de GES sur laquelle l'accord de Paris s'engage requiert des technologies propres de production énergétique. De là, la résurgence des grands projets de barrages hydroélectriques dans la mesure où ils produisent, en moyenne, un dixième seulement des émissions de GES issus du gaz ou du charbon.

Mais c'est surtout dans sa contribution à la problématique de l'adaptation au changement climatique que le secteur de l'eau revêt une importance primordiale aujourd'hui comme nous allons le voir ci-dessous.

3.2. L'eau, un secteur d'action publique central dans la stratégie d'adaptation au changement climatique

D'une manière générale, le nombre de mesures d'adaptation a considérablement augmenté depuis 2014. La plupart de ces mesures se concentrent dans le domaine de l'eau, puisqu'elles constituent à l'heure actuelle 60% de toutes les actions recensées. De plus, pour une majorité d'entre elles, elles se focalisent sur le secteur agricole (rapport du Giec, 2023), où l'extension de l'irrigation et son corollaire, le stockage de l'eau, sont souvent présentés comme la panacée. En effet, la production alimentaire mondiale dépend fortement de l'irrigation. Les défenseurs de l'irrigation soulignent ainsi : « Si les terres irriguées ne représentent que 20% du total mondial, elles assurent cependant à elles seules 40% de la production agricole mondiale. Sans les 300 millions d'hectares irrigués, il faudrait mobiliser 600 millions d'hectares de plus sur les forêts et sur les pâturages¹¹ », ce qui accroîtrait encore un peu plus les émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, une différence de traitement très nette s'observe depuis longtemps dans les politiques d'aide au développement avec des financements accordés en priorité pour les projets d'infrastructures de grande envergure, plus visibles et plus valorisants pour la communication des bailleurs nationaux comme internationaux. Cela s'explique aussi en partie par la plus grande facilité de décaissement pour les grands projets. Au contraire, la multiplication de petits projets autour de nouvelles pratiques à la parcelle, de couverts végétaux, de récupération des eaux de pluie, de sélection de cultures plus résilientes, ou même pour l'agriculture de précision est peu onéreuse, mais toujours plus chronophage à gérer. Les investissements des bailleurs se font donc au détriment de l'adaptation des systèmes de production reposant sur une agriculture pluviale qui pourtant concerne 80% des terres cultivées et représente 60% de la production alimentaire mondiale.

Le récit qui se construit autour du dérèglement climatique accentue encore cette tendance et s'étend désormais au niveau des pays dits développés. En France par exemple, la perspective du changement climatique est une occasion dont se sont opportunément saisis les groupes d'intérêts constitués autour de l'irrigation pour défendre cette solution unique : l'irrigation, en plein essor depuis les années 1980 où cette pratique a émergé concomitamment à l'expansion de la culture du maïs, est plus que jamais au goût du jour avec la mise en avant des retenues de stockage. Ce travail de lobbying a certainement encouragé la réaction vive des autorités publiques qui

11. Voir p. 7 de la publication suivante : Benoit G., 2020. L'agriculture, la terre, l'eau et le climat, *Futuribles*, 438(5), 5-27.

évoquent une « urgence déclarée¹² », d'autant plus depuis qu'une nouvelle donne se dessine sur fond de conflit russo-ukrainien : le sujet « eau et agriculture » revêt désormais une dimension géostratégique particulièrement importante dans une perspective de défense de la souveraineté alimentaire.

3.3. La révolution silencieuse des eaux souterraines

En marge des politiques d'investissement dans les grandes infrastructures pour l'irrigation, des dynamiques très problématiques sont observées dans les régions semi-arides, où l'essor de l'irrigation par pompage dans les nappes souterraines se développe. Un boom agricole basé sur les eaux souterraines, qui a débuté dans les années 1960, a été déclenché dans de nombreuses régions semi-arides par la combinaison de technologies de pompage et d'irrigation désormais facilement accessibles et d'initiatives individuelles privées. Molle *et al.* (2003) ont qualifié de « révolution silencieuse » ce boom agricole autour des eaux souterraines, porté par de petits investissements privés, souvent en marge des politiques publiques et associés à un niveau élevé d'arrangements informels (Shah, 2009; López-Gunn *et al.*, 2012; Kuper *et al.*, 2016; Lejars *et al.*, 2017).

Le laisser-faire des autorités publiques autour des petits investissements privés associés à l'exploitation des eaux souterraines aboutit aujourd'hui à une raréfaction de la ressource, à la dégradation de sa qualité, à l'affaissement des terres, à la dégradation de la biodiversité et au creusement des inégalités sociales. Ces tendances mondiales ont été documentées dans de nombreux pays arides et semi-arides tels que l'Algérie, l'Australie, la Chine, l'Inde, le Mexique, le Maroc, l'Espagne, la Tunisie et les États-Unis d'Amérique, où la nature irrégulière de la disponibilité des eaux de surface fait des eaux souterraines une ressource stratégique pour l'irrigation (Changming *et al.*, 2001; Scott et Shah, 2004; Konikow et Kendy, 2005; Llamas et Martínez-Santos, 2005; Shah, 2009; Ross et Martínez-Santos, 2010; Kuper *et al.*, 2016; IWMI, 2020).

Dans de nombreux pays, l'essor de l'exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation est soutenu par les politiques publiques, à travers des subventions directes aux équipements d'irrigation, mais aussi par des politiques énergétiques et foncières qui permettent le développement de nouvelles superficies irriguées. L'accès à la terre et à l'eau est facilité par des lois qui permettent aux agriculteurs ne disposant pas de droits de propriété formels sur la terre ou sur l'eau d'obtenir des droits d'accès — en légalisant les forages existants par exemple — et qui permettent aux nouveaux agriculteurs utilisant des modes de production à forte intensité de capital de s'établir dans les zones de production locales. En accordant des subventions pour l'agriculture et pour les équipements d'irrigation, les États encouragent et financent souvent le développement de nouvelles technologies telles que l'irrigation goutte-à-goutte et *in fine* l'extension des terres irriguées. Enfin, dernière évolution en date, la politique de subvention accordée aux panneaux photovoltaïques que l'on peut observer dans certains pays comme l'Inde par exemple réduit considérablement les coûts énergétiques associés habituellement au pompage des eaux souterraines, ce qui incite les irrigants à exploiter sans limites la ressource et menace d'assécher en un temps record les nappes d'eau souterraines¹³.

12. Tandonnet H., Lozach J.-J., 2016. Eau : urgence déclarée, rapport d'information du Sénat, n° 616.

13. <https://e360.yale.edu/features/solar-water-pumps-groundwater-crops>.

4. Un nécessaire changement des politiques vers des modèles moins intensifs et moins gourmands en eau

Au cours de la dernière décennie, les pays ont massivement repris leurs efforts pour moderniser leurs secteurs de l'eau et de l'agriculture. La justification première du soutien public à ces grands ouvrages, comme à la promotion de l'irrigation, reposait dans leur lien supposé avec l'agenda développementaliste et la réduction de la pauvreté qu'elle était censée induire dans les pays du Sud. Ces tendances sont actuellement renforcées et justifiées par le changement climatique. Le soutien financier aux grandes infrastructures hydrauliques, aux équipements d'irrigation et à l'irrigation goutte-à-goutte a augmenté dans tous les domaines, une part croissante étant directement financée par les gouvernements nationaux. Parallèlement, les subventions publiques aux équipements d'irrigation et à l'énergie ont généré et entretenu un boom des eaux souterraines dans de nombreuses régions du monde.

Ces investissements massifs ont contribué à nourrir les 800 millions de personnes qui ont rejoint la population mondiale entre 2010 et 2020. Ils ont également contribué à satisfaire l'évolution des régimes alimentaires et la consommation mondiale de viande.

Toutefois, les travaux montrent que si les investissements autour du développement de l'irrigation ont ainsi permis ces dernières années d'accroître la richesse globale, cela s'est fait au prix d'un accroissement des inégalités, d'un accroissement des migrations et d'une augmentation de la pression sur la ressource (Mayaux et Lejars, 2022). En Inde par exemple, les déplacements massifs de population que provoque la construction de grands barrages et réservoirs pour l'irrigation affectent plus sévèrement les populations pauvres que les autres composantes de la société (Duflo et Pande, 2005). Les bénéfices économiques globaux sont eux-mêmes loin d'être évidents. Les études concluant à un apport positif sur les économies se concentrent en général sur l'échelle nationale, voire régionale, les données n'étant pas disponibles à un niveau infra (Narayanamoorthy, 2018). Même à cette échelle, d'autres auteurs soulignent l'augmentation de la consommation énergétique (Bazilian *et al.*, 2012). Au Maroc, Doukkali et Lejars (2015) ont démontré le poids économique de cette nouvelle dépendance énergétique, concluant sur le fait que l'économie marocaine aurait tiré un meilleur profit des investissements dans l'agriculture pluviale. Tous les agriculteurs qui se sont engagés dans cette économie des eaux souterraines n'ont pas été en mesure de profiter, équitablement, de cette rente captée en priorité par les entrepreneurs et les exploitants agricoles les mieux lotis. Car le capital a remplacé le foncier comme le facteur principal de production dans cette nouvelle économie, marginalisant les paysans en agriculture familiale ou leur faisant courir des risques inconsidérés compte tenu des investissements nécessaires, les conduisant même à la banqueroute (Ameur *et al.*, 2017; Mayaux, 2021). D'autres travaux montrent que cette dépendance rend particulièrement vulnérables les sociétés, certains allant même jusqu'à interroger leur effondrement social et économique après une première période de déclin environnemental (Petit *et al.*, 2017).

Bien que ces pressions varient considérablement d'un pays à l'autre et à l'intérieur des pays, elles ont tendance à s'accroître, notamment sous l'effet de la variabilité climatique accrue. Dans les années à venir, les gouvernements devront revoir leur niveau actuel d'engagement politique et financier envers leurs secteurs de l'eau et de l'agriculture, tout en procédant à des changements politiques importants vers des modèles agricoles moins gourmands en ressources.

5. Conclusion

Les conséquences du changement climatique sur la ressource en eau restent encore incertaines dans la mesure où les projections des modèles se sont essentiellement concentrées au niveau global, sans affiner les pronostics avec des scénarios plus régionalisés. Il est fort probable cependant qu'elles viennent accentuer des dynamiques très problématiques déjà à l'œuvre dans la gestion de l'eau, qui affectent déjà le cycle de l'eau et ont abouti à une quasi-disparition des eaux souterraines dans certains endroits. En réaction, nombre de rapports et d'analyses — pas uniquement en lien avec la question du changement climatique — annoncent depuis plusieurs années la montée des périls liés à la question de l'eau. Cela suscite une certaine fébrilité, notamment au niveau des organisations internationales, qui multiplient les alertes et les discours alarmistes : un rapport de la Banque mondiale de 2016 prédit ainsi de nouvelles guerres civiles liées à l'eau.

Ces tensions qui pourraient être amenées à redoubler à l'international comme au niveau local, dans les pays du Sud comme dans ceux du Nord, devraient nécessairement nous pousser à nous réinterroger sur la manière dont nous utilisons, gérons et partageons la ressource en eau. Cela, d'autant plus que la gestion de l'eau est aujourd'hui au carrefour de plusieurs grands défis : celui du droit humain pour l'accès à l'eau ; celui de la biodiversité et de la préservation des écosystèmes aquatiques et celui des nouveaux besoins pour l'agriculture. Autrement dit, le secteur de l'eau n'est pas stratégique dans la lutte contre le changement climatique uniquement, il se retrouve également au centre des débats sur différents enjeux dont certains forment le cœur de nos projets de société. De ce fait, la question de l'eau est de plus en plus investie politiquement.

Face à ces nouveaux défis, la réponse principale qui se dessine semble de vouloir persévérer dans le même modèle. L'inéluctabilité du changement climatique est opportunément présentée comme la principale responsable des pénuries en eau présentes et à venir, alors même qu'elle n'est actuellement pas le facteur de pression prépondérant, comme nous l'avons vu. Cela semble produire une atmosphère propice à la réactivation des anciennes recettes d'action publique qui étaient pourtant en train de mener les politiques de l'eau dans une impasse. Après le grand virage autour de la gestion de la demande, une politique de l'offre se retrouve relégitimée au travers de la problématique du changement climatique : on cherche encore et toujours à exploiter d'hypothétiques nouvelles ressources en eau, même si cela relève souvent plus du mirage que d'une promesse fiable.

D'une certaine manière, ce constat n'est pas surprenant. Les solutions avancées dans le cadre de la lutte contre l'impact du changement climatique sur la ressource en eau sont dominées par le secteur agricole particulièrement mobilisé sur ces enjeux, et pour qui la perspective du changement climatique constitue une aubaine pour mieux défendre une solution unique, le recours à l'irrigation. Face à cela, les acteurs du secteur de l'eau sont jusqu'à présent apparus plus en retrait sur ces enjeux, en partie pour les raisons que l'on a déjà évoquées dans ce chapitre : la trajectoire de la ressource, même sans impact du changement climatique, était déjà extrêmement préoccupante. On peut également souligner le fait que si l'écologisation des politiques de l'eau est manifeste au moins depuis les années 2000 et l'adoption de la directive-cadre sur l'eau au niveau européen, en revanche leur climatisation n'est pas encore effective. Il paraît pourtant essentiel aujourd'hui de mieux investir ce débat pour proposer d'autres réponses et défendre plus de sobriété ainsi que des dispositifs destinés à mieux maîtriser la demande en eau.

6. Références bibliographiques

- Ameur F., Amichi H., Kuper M., Hammani A., 2017. Specifying the differentiated contribution of farmers to groundwater depletion in two irrigated areas in North Africa, *Hydrogeology Journal*, 25:1579-1591.
- Baechler G., 1998. Why Environmental Transformation Causes Violence: A Synthesis, *Environmental Change and Security Project Report*, 24(4), 24-44.
- Barone S., Mayaux P.-L., 2019. *Les politiques de l'eau*, LGDJ, 160 p.
- Bazilian M., Rogner H., Howells M., Hermann S., Arent D., Gielen D., Yumkella K.K., 2012. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling Approach, *Energy Policy*, 39(12): 7896-7906.
- Blanchon D., 2024. *Géopolitique de l'eau. Entre conflits et coopérations*. Le cavalier bleu, 144 p.
- Boretti A., Rosa L., 2019. Reassessing the projections of the World Water Development Report, *npj | Clean Water*, 2, 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Boutroue B., Bourblanc M., Mayaux P-L, Ghiotti S., Hrabanski M., 2022. The politics of defining maladaptation: enduring contestations over three (mal)adaptive water projects in France, Spain and South Africa, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(5), 892-910.
- Buhaug H., Benjaminsen T.A., Sjaastad E., Theisen M.O., 2015. Climate variability, food production shocks, and violent conflict in Sub-Saharan Africa, *Environmental Resources Letter*, vol.10, 125015.
- Caruso R., Petrarca I., Ricciuti R., 2016. Climate change, rice crops, and violence: Evidence from Indonesia, *Journal of Peace Research*, vol. 53, 66-83.
- Doukkali M.R., Lejars C., 2015. Energy cost of irrigation policy in Morocco: A social accounting matrix assessment, *International Journal of Water Resources Development*, 31(3): 422-435.
- Duflo E., Pande R., 2005. *Dams*. Social Science Research Network. 56 p. <https://ssrn.com/abstract=796170>
- FAO, 2014. AQUASTAT: Area equipped for irrigation. In: FAO [online]. Rome. Cited 09 June 2016. <https://www.fao.org/aquastat/en/geospatial-information/global-maps-irrigated-areas>
- FAO, 2017. Water pollution from agriculture: a global review. Colombo, FAO & IWMI.
- FAO, 2020. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat>
- FAO, 2021. L'Etat des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde : Des systèmes au bord de la rupture. Rome.
- Fernandez S., 2014. Gouverner les eaux depuis 1945. Internationalisation et intensification des flux de capitaux, de techniques et de modèles. In : Pestre D., *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*. Paris, La Découverte, Recherches, 6, 203-230.
- Giec, 2023. 6^e rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Genève.
- Giovanetti G., Ticci E., 2016. Determinants of biofuel-oriented land acquisitions in sub-Saharan Africa, *Renewable Sustainable Energy Review*, 54(C): 678-687.
- Gleick P.H., 2014. Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria. *Weather, Climate, Society*, 6, 331-340.
- Homer-Dixon T., 1999. *Environment, Scarcity, and Violence*, Princeton University Press, 272 p.
- IWMI, 2020. Groundwater governance in the Arab World. Cited 6 August 2021 <http://gw-mena.iwmi.org/outputs/>
- Jabri V., 1996. *Discourses on Violence. Conflict Analysis reconsidered*, Manchester University Press, 204 p.
- Jasechko S., Seybold H., Perrone D., 2024. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625, 715-721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Konikow L.F., Kendy E., 2005. Groundwater depletion: A global problem, *Hydrogeology Journal*, 13(1): 317-320.
- Koubi V., 2019. Climate Change and Conflict, *Annual Review of Political Science*, 22(1), 343-360.

- Kuper M., Faysse N., Hammani A., Hartani T., Marlet S., Hamamouche M.F., Ameur F., 2016. Liberation or anarchy? The Janus nature of groundwater use on North Africa's new irrigation frontiers. In: Jakeman T., Barreteau O., Hunt R., Rinaudo J.D., Ross A. (eds). *Integrated groundwater management*, the Netherlands, Springer, 583-615.
- Lasserre F., Brun A., 2018. *Le partage de l'eau. Une réflexion géopolitique*. Paris, Odile Jacob, 208 p.
- Lejars C., Daoudi A., Amichi H., 2017. The key role of supply chains actors in the development of groundwater irrigation in North Africa, *Hydrogeology Journal*, 25: 1595-1603. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1571-7>
- Llamas M.R., Martínez-Santos P., 2005. Intensive groundwater use: Silent revolution and potential source of social conflicts, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5): 337-341.
- López-Gunn E., Rica M., Van Cauwenbergh N., 2012. Taming the groundwater chaos. In: de Stefano L., Llamas M.R. (eds), *Water, agriculture and the environment in Spain: Can we square the circle?* USA, CRC Press, 227-240.
- Lynch B., 2013. Rivers of contention: Scarcity discourse and water competition in highland Peru, *Georgia Journal of International & Comparative Law*, 42: 69-92.
- Magrin G., 2023. Agriculture, crise climatique et violences : du nouveau sous le soleil du Sahel? *Bulletin de l'association de géographes français*, 100(1), 6-19.
- Mayaux P.-L., 2021. Layering and Perpetuating: the Logics of Conservative Reforms in Morocco's Irrigation Policies, *The Journal of North African Studies*, <https://doi.org/10.1080/13629387.2021.195034>
- Mayaux P.-L., Lejars C., 2022. Enabling institutional environments conducive to livelihood improvement and adapted investments in sustainable land and water uses. Rome, FAO, 58 p. <https://doi.org/10.4060/cc0950en>
- Mehta L., 2001. The manufacture of popular perceptions of water scarcity: Dams and water-related narratives in Gujarat, India, *World Development*, 29(12): 2025-2041.
- Molle F., Shah T., Barker R., 2003. The groundswell of pumps: multilevel impacts of a silent revolution. Conference paper for the International Commission on Irrigation and Drainage/Asia Regional Workshop: Management and Operation of Participatory Irrigation Organizations. 10-12 November, 2003. Taipei (CHN).
- Narayanamoorthy A., 2018. Financial performance of India's irrigation sector: An historical Analysis, *International Journal of Water Resources Development*, 34(1): 116-131.
- OECD, 2012. *OECD Environmental Outlook to 2050*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Petit O., Lopez Gun A., Kuper M., Rinaudeau J.D., Lejars C., Douadi A., 2017. Resilience or collapse? Looking at agricultural groundwater economies under stress, *Hydrogeology Journal*, 25: 1549-1564. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1567-3>
- Ross A., Martinez-Santos P., 2010. The challenge of groundwater governance: Case studies from Spain and Australia, *Regional Environment Change*, 10(4): 299-310. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0086-8>
- Scott C., Shah T., 2004. Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: Insights from India and Mexico, *Water Resource Development*, 20(2): 149-164.
- Shah T., 2009. *Taming the anarchy: Groundwater governance in South Asia*. Routledge, 324 p.
- UNEP, 2016. A snapshot of the world's water quality: towards a global assessment.
- Wada Y., Flörke M., Hanasaki N., Eisner S., Fischer G., Tramberend S., Satoh Y., et al., 2016. Modelling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFAS) initiative and its approaches, *Geoscientific Model Development*, 9: 175-222.
- Werrell C.E., Femia F., Sternberg T., 2015. Did We See It Coming? State Fragility, Climate Vulnerability, and the Uprisings in Syria and Egypt. *SAIS Review of International Affairs*, 35, 29-46.
- WHO, UNICEF, 2015. Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment. New York, USA.
- WWAP, 2018. The United Nations World Water Development Report 2018. Paris, UNESCO. www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/

Chapitre 8

Les systèmes alimentaires : à la fois responsables et victimes du changement climatique

*Hélène David-Benz, Arlène Alpha, Victoria Bancal, Carine Barbier,
Damien Beillouin, Yannick Biard, Daniel Fonceka, Franck Galtier,
Sandra Payen, Ninon Sirdey, Mathieu Weil*

Les interactions entre le changement climatique et les systèmes alimentaires sont aujourd'hui largement mises en avant dans les agendas nationaux et internationaux. Le Sommet des Nations unies sur les systèmes alimentaires de 2021 a fait de la résilience au changement climatique une de ses priorités. De même, lors de la COP28, en 2023, 159 pays ont signé une déclaration relative à l'inclusion de l'agriculture et de l'alimentation dans leurs engagements climatiques nationaux (voir chapitre 2). En effet, les systèmes alimentaires constituent un levier pour l'atténuation, notamment dans les pays industrialisés, et ils sont aussi un enjeu pour l'adaptation, parce qu'ils sont directement touchés par les effets du changement climatique.

Les systèmes alimentaires désignent l'ensemble des activités nécessaires pour nourrir une population : ils englobent les étapes de préproduction (la production d'intrants), la production elle-même et les étapes de postproduction (transport, transformation, distribution, consommation) et la gestion des déchets aux différentes étapes. Le terme de systèmes agri-alimentaires (ou *agri-food systems* pour les Anglo-Saxons) est également utilisé, notamment dans plusieurs chapitres de cet ouvrage, et recouvre de même l'ensemble des activités, de l'amont à l'aval. L'approche systémique, inhérente au terme *système alimentaire*, met l'accent sur les interactions entre les différentes activités et leurs impacts en termes socio-économiques, environnementaux (dont les émissions de gaz à effet de serre, GES) et nutritionnels (David-Benz *et al.*, 2022; FAO, 2018; HLPE, 2017).

En considérant l'ensemble des étapes, les systèmes alimentaires génèrent environ un tiers de toutes les émissions anthropiques à l'échelle mondiale (Crippa *et al.*, 2021; Rosenzweig *et al.*, 2020; Tubiello *et al.*, 2022). Dans le même temps, les systèmes alimentaires sont aussi affectés par le changement climatique et par ses effets.

Ce chapitre examine ces deux dimensions, tout en distinguant les différentes catégories de pays. En effet, les pays industrialisés, compte tenu des caractéristiques de leurs systèmes de production, de leurs chaînes d'approvisionnement et de leurs habitudes alimentaires, sont particulièrement émetteurs de GES. Les pays en développement sont eux à la fois les moins émetteurs et les plus touchés. Dans une première section, nous présenterons les différents postes d'émissions de GES des systèmes alimentaires. Puis la seconde section traitera de l'impact du changement climatique sur les systèmes alimentaires. L'accent sera mis sur l'aval, beaucoup moins documenté que l'impact du changement climatique sur la production, en soulignant les risques pour la sécurité alimentaire, notamment dans les pays à faible revenu.

1. Des systèmes alimentaires hétérogènes, responsables de près d'un tiers des émissions de GES

1.1. Les étapes de pré et de postrécolte à l'origine de l'augmentation des émissions de GES des systèmes alimentaires

Les travaux portant sur les émissions de GES des systèmes alimentaires distinguent aujourd'hui trois grands postes d'émission : (1) les changements d'usage des sols, (2) la production, (3) la pré et la postproduction (la production des intrants et l'ensemble des activités en aval) (Tubiello *et al.*, 2022). Cette approche, en prenant en compte les changements d'usage des sols, permet de mettre en lumière l'impact climatique majeur de la déforestation, dont la visée est l'utilisation agricole des terres.

Les émissions proviennent de multiples sources et varient en fonction des pratiques agricoles, des types d'aliments produits et consommés ainsi que de la gestion des déchets. Sur la base des données FAOSTAT, Tubiello *et al.* (2022) montrent qu'en trois décennies (1990-2019) les émissions totales du système alimentaire ont augmenté de 17%, principalement en raison d'un doublement des émissions provenant des processus de pré et de postproduction. Les émissions liées au changement d'usage des sols ont diminué de 25% (du fait d'un ralentissement de la déforestation), tandis que les émissions au niveau de l'exploitation agricole ont augmenté de 9% (figure 8.1).

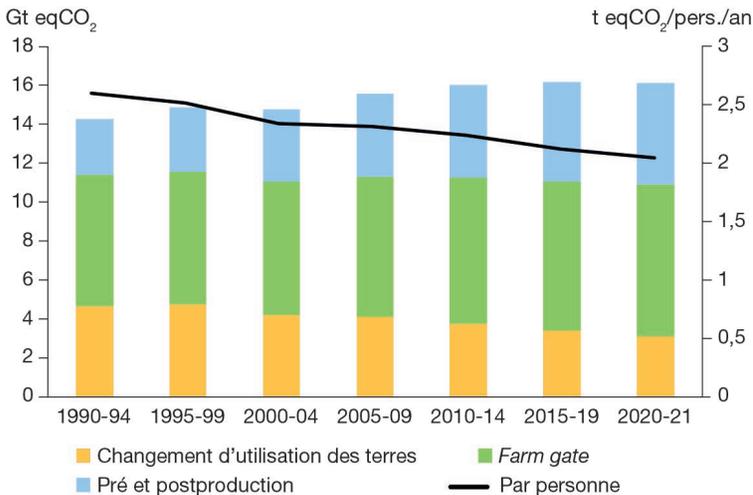


Figure 8.1. Évolution des émissions de GES par les systèmes alimentaires par grands postes d'émission de 1990 à 2021. Source : données FAOSTAT¹.

Les émissions liées à la préproduction, qui se réfèrent à toutes les émissions générées par la fabrication et par le transport des intrants, varient fortement d'un système alimentaire à l'autre, et il est encore difficile d'identifier la part précise de ces émissions (Tubiello *et al.*, 2022). Les cinq étapes de postproduction (transport, transformation, distribution, consommation, gestion des déchets) représentent environ 20-30% des

1. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/GT> et <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/OA>.

émissions du système alimentaire mondial. Le transport des produits alimentaires, souvent sur de longues distances, génère une part importante, sans toutefois qu'une métrique soit encore stabilisée. Les estimations vont de 4,8% des émissions totales des systèmes alimentaires (Crippa *et al.*, 2021) à 20,0% (Li *et al.*, 2022). Ces émissions sont plus importantes dans les pays industrialisés que dans les pays en développement en raison d'un important recours au transport routier dans les premiers. L'étape de la transformation et de l'emballage représente environ 5-10% des émissions totales. Ces processus sont énergivores et souvent dépendants des énergies fossiles. La distribution et la vente au détail sont également émettrices de GES, du fait de la réfrigération des aliments dans les supermarchés; elles représentent environ 2-4% des émissions totales. Enfin, les déchets alimentaires, lorsqu'ils sont envoyés en décharge, produisent du méthane en se décomposant. La gestion des déchets alimentaires contribue à environ 3-4% des émissions totales de GES.

Si la préparation des repas à domicile ou dans les restaurants pèse seulement pour 3-5% des émissions totales, les régimes alimentaires, eux-mêmes, jouent un rôle majeur dans les émissions de GES. En effet, les écarts d'émissions pour produire les différents aliments sont considérables : 14 kg eqCO₂/kg pour les bovins, 3 kg pour le porc, 2 kg pour les volailles², et moins de 1 kg pour les végétaux (souvent autour de 0,1 kg). Dès lors, la part carnée de l'alimentation ainsi que les produits végétaux pour l'élevage (qui transitent en grande partie par les marchés internationaux) augmentent significativement le bilan carbone des systèmes alimentaires. La production animale représente près de 75% des émissions de la production agricole (WHO, 2023). Les émissions de méthane, provenant de la fermentation entérique des ruminants et des effluents d'élevage, sont les plus importantes, suivies par celles de protoxyde d'azote dues à l'usage d'engrais azotés pour les cultures, principalement destinées à l'alimentation animale des pays à haut revenu. Entre des régimes végétariens ou végétaliens et des régimes très carnés (100-170 g de viande/jour), l'empreinte carbone peut être multipliée par 3 à 6 (Barbier *et al.*, 2019; Scarborough *et al.*, 2023). Or, la consommation de produits animaux varie énormément entre les pays et au sein des pays. En 2021, elle s'élevait à 92 kg/hab./an dans les pays à haut revenu contre 43 kg en moyenne mondiale et 12 kg dans les pays à faible revenu (Ritchie *et al.*, 2024). La consommation de produits laitiers, émettrice de GES car principalement issue de ruminants, est également hétérogène. La consommation moyenne mondiale de lait est de 88 g/j/hab., ayant doublé entre 1990 et 2018 (Miller *et al.*, 2022). Les plus hauts niveaux de consommation sont observés au Mexique, en Grande-Bretagne, aux États-Unis et en France (188-206 g/j), et les plus bas, en Chine, au Bangladesh et en République démocratique du Congo (31-37 g/j).

Au-delà des régimes alimentaires, le niveau d'émission de GES varie fortement pour un même produit, en fonction des modes de production et des étapes de la postproduction, ce dont l'analyse du cycle de vie permet de rendre compte (encadré 8.1).

1.2. De fortes disparités entre les systèmes alimentaires industrialisés et les autres

Nombre d'études montrent que les émissions de GES des systèmes alimentaires varient fortement d'un pays à l'autre (figure 8.2).

2. Ces émissions sont estimées par kilogramme de poids vif des animaux.

Encadré 8.1. Pourquoi une approche globale du système alimentaire ? L'approche par les analyses du cycle de vie

Dans la littérature française et internationale, l'approche par des analyses du cycle de vie (ACV) fait référence pour ce qui est des impacts environnementaux. Multi-critère, elle permet d'avoir une vision exhaustive de toutes les sources d'impacts sur les écosystèmes, sur la santé humaine et sur les ressources non renouvelables, avec une entrée par produit, voire à l'échelle de territoires (Cornelus, 2021). L'ACV quantifie en particulier les émissions de GES tout au long des chaînes de valeurs, permettant une compréhension plus fine que les approches sectorielles.

L'ACV dans l'analyse des chaînes de valeurs

Le projet Value Chain Analysis for Development (VCA4D), financé par la Commission européenne et mis en œuvre par Agrinatura, utilise un cadre méthodologique systématique pour analyser les chaînes de valeur liées du secteur agricole, fournissant des informations pour orienter les décisions visant à améliorer leur durabilité (Fabre *et al.*, 2021). L'ACV identifie et quantifie les ressources consommées et les émissions produites tout au long des chaînes de valeur, évaluant de manière holistique les impacts environnementaux. Depuis 2016, plus de 45 chaînes de valeur de pays à faible revenu ont été étudiées, révélant par exemple le rôle fondamental des infrastructures dans l'impact carbone des différents systèmes alimentaires. Elles mettent également en évidence que les faibles performances des infrastructures (électricité, routes, hydrocarbures, eau potable, transport, logistique) augmentent indirectement les impacts environnementaux en accroissant les pertes de produits, surtout pour les produits frais (Parrot *et al.*, 2018).

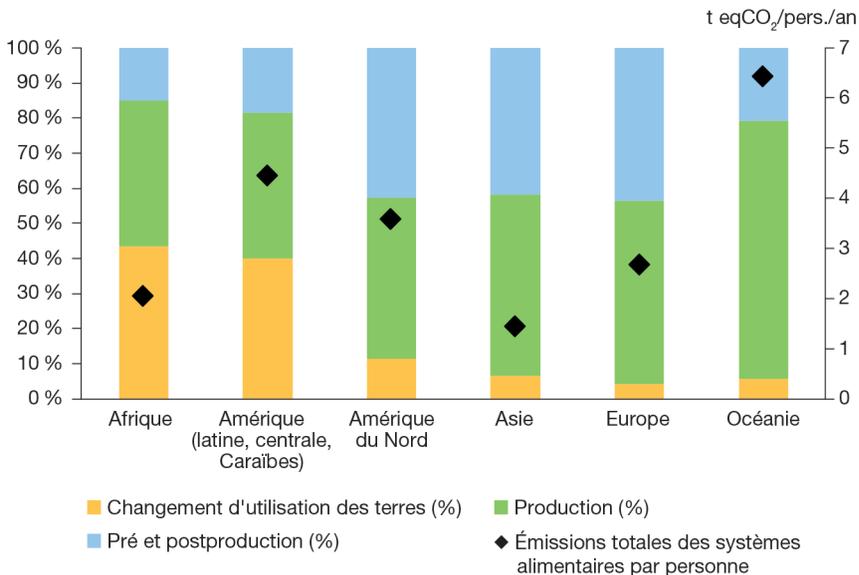


Figure 8.2. Émissions de GES par les systèmes alimentaires représentées par grandes régions (2021). Source : données FAOSTAT.

En Afrique et en Asie, les émissions de GES par habitant sont ainsi beaucoup plus faibles qu'ailleurs (figure 8.2). Toutefois, à cause de la croissance démographique et des changements d'habitudes alimentaires (vers davantage de produits carnés et de produits transformés), les émissions totales des systèmes alimentaires y sont en forte progression, avec en particulier une hausse marquée des stades de pré et de postproduction en Asie. En Europe et en Amérique du Nord, les émissions par habitant sont beaucoup plus élevées, compte tenu des régimes alimentaires plus carnés et du poids croissant du stade de postproduction. Elles sont également très élevées en Amérique latine du fait d'une déforestation qui reste très élevée.

2. Les systèmes alimentaires affectés par le changement climatique

Le changement climatique se traduit d'une part par une évolution des tendances des températures et des précipitations, d'autre part par une occurrence et une magnitude accrue des chocs climatiques. Ces différentes manifestations affectent le système alimentaire, de la production à la consommation. Les effets du changement climatique sur la production agricole ont déjà été bien documentés dans la littérature scientifique. Celle-ci montre que la production agricole mondiale va connaître, de façon globale, des réductions de rendement, une altération de la qualité des produits et une diminution de la productivité des élevages. Les études rétrospectives montrent des baisses de rendements déjà effectives de 4 % à 5 % pour les grandes cultures : maïs, blé, riz et soja (Iizumi *et al.*, 2018; Moore *et al.*, 2015). Les projections indiquent également une diminution moyenne des rendements de 11 % d'ici 2050 sans mesures d'adaptation (Hasegawa *et al.*, 2022). Les impacts négatifs du changement climatique sont plus marqués dans les régions vulnérables comme l'Afrique subsaharienne et l'Asie du Sud-Est.

La littérature est toutefois beaucoup moins abondante sur les effets du changement climatique sur les systèmes alimentaires dans leur ensemble, et particulièrement sur la partie de post récolte, surtout dans les pays à faible revenu. Pourtant, les risques sont élevés, affectant la sécurité alimentaire, notamment du fait que les produits nutritionnellement denses, comme les fruits, les légumes, la viande et le poisson, sont les plus périssables. Les pertes risquent également d'augmenter pour les produits moins périssables comme les céréales et les tubercules, car les températures plus élevées favorisent le développement de ravageurs et de micro-organismes toxiques. Dans cette deuxième section, nous présentons d'abord les impacts du changement climatique sur les pertes, sur la commercialisation et sur la qualité des produits, puis, de façon plus large, les impacts sur la sécurité alimentaire, notamment dans les pays les plus vulnérables.

2.1. Des impacts sur les pertes, la qualité des produits et le commerce

Le changement climatique affecte tous les acteurs des systèmes alimentaires. La hausse des températures et l'augmentation des chocs climatiques accroissent les risques de pertes et augmentent les coûts de stockage et de transport, affectant les revenus des acteurs et les prix pour les consommateurs. Dans les pays à haut revenu, cela entraîne une hausse des coûts de traitement, de conditionnement, de stockage et de transport. Dans les pays à faible revenu, les pertes augmentent en raison du manque d'infrastructures adéquates et de méthodes de conservation, en particulier pour les produits les plus périssables (encadré 8.2). Trois impacts majeurs dans la post récolte sont

identifiés dans la littérature. Le premier est une dégradation de la qualité nutritionnelle et visuelle des produits, le deuxième concerne les risques accrus sur la qualité sanitaire des aliments, enfin le dernier a trait à l'instabilité accrue des marchés.

2.1.1. Une dégradation de la qualité nutritionnelle et visuelle des produits

Selon Christopoulos et Ouzounidou (2020), le changement climatique a des effets variables sur la qualité des fruits et des légumes. Il peut améliorer la synthèse et l'accumulation de glucides et d'antioxydants, les mécanismes de défense des plantes, mais réduire leur teneur en protéines, en minéraux, en acides aminés, et dégrader leur apparence. Les températures élevées causent des décolorations, des « coups de soleil » et des pertes de texture. Des cycles de production raccourcis peuvent réduire la taille des fruits et entraîner l'accumulation de composés indésirables. Par exemple, les tomates cultivées à des températures élevées ont montré une teneur plus faible en micronutriments (K, Mg, Ca) et en lycopène, carotène et antioxydants (Rosales *et al.*, 2011).

2.1.2. Des risques accrus sur la qualité sanitaire des aliments

Des températures et une humidité plus élevées favorisent l'émergence de contaminations alimentaires qui compromettent la qualité sanitaire (et éventuellement nutritionnelle et sensorielle) des produits. Cela peut être lié à des bactéries pathogènes comme *Salmonella* et *Campylobacter*, qui prospèrent sous des températures plus élevées (Akil *et al.*, 2014). De même, les champignons mycotoxinogènes, producteurs de toxines telles que les aflatoxines, dont la croissance et l'expansion géographique sont influencées par le changement climatique, constituent des risques pour la santé humaine et animale, en particulier les risques de cancer (Battilani *et al.*, 2016; Watson *et al.*, 2016; Wild *et al.*, 2015; WHO et Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2017). Par exemple, plusieurs souches d'*Aspergillus flavus*, un champignon qui infecte de nombreuses cultures, produisent de l'aflatoxine,

Encadré 8.2. Perception des risques et stratégies d'adaptation des commerçants de fruits et légumes

Une enquête du projet Safoods auprès de 796 détaillants et grossistes de tomates, mangues et légumes-feuilles en Côte d'Ivoire et au Sénégal montre que 78 % des commerçants considèrent les températures élevées et 48 % les fortes pluies comme étant les manifestations climatiques aux répercussions les plus graves. Ces événements affectent la quantité et la qualité de la production (et donc la capacité des commerçants à s'approvisionner), et dégradent les voies d'accès. Leurs effets incluent l'assèchement des feuilles, l'accélération du mûrissement, la sénescence des fruits, l'apparition de pourritures et de dégâts liés aux insectes, un ralentissement de l'activité commerciale, entraînant des pertes économiques et/ou nutritionnelles. Les stratégies de prévention adoptées consistent à augmenter la fréquence et à réduire le volume d'achat pour vendre le jour même, à s'approvisionner directement auprès des producteurs, à trier pour vendre à des prix différenciés, et à rechercher des débouchés avant l'achat. Malgré ces stratégies, les détaillants jettent en moyenne 2,4 % des tomates, 6,5 % des mangues et 3,8 % des légumes-feuilles, et en bradent ou donnent respectivement 8,3 %, 10,5 %, et 11,6 %, entraînant des pertes économiques. Ces pertes risquent de s'aggraver avec l'augmentation des événements climatiques extrêmes.

une mycotoxine très problématique. Les études montrent que l'augmentation du CO₂ et le stress dû à la sécheresse favorisent considérablement cette production (Medina *et al.*, 2015). En Europe, une élévation de la température de 2°C pourrait conduire 40% de la production de maïs à dépasser les limites légales d'aflatoxine (Battilani *et al.*, 2016). La présence de champignons producteurs de toxines devrait se propager vers de nouvelles régions, exacerbant les risques dans les zones dépourvues de capacités adéquates de surveillance et de gestion des risques (Miller, 2016).

2.1.3. Une instabilité accrue des marchés, à laquelle les outils de régulation internationale ne sont pas adaptés

Les changements climatiques vont perturber les zones de production, les volumes et la stabilité de l'offre ainsi que les transports, affectant les marchés domestiques et internationaux (IPCC, 2023). Les effets estimés varient selon les scénarios climatiques, les pays, les produits et les méthodes utilisées. D'ici 2050, les prix pourraient augmenter de 5% à 20% par rapport à un scénario sans changement climatique et la variabilité des prix pourrait croître de 10% (Chen et Villoria, 2019; Nelson *et al.*, 2014; Wiebe *et al.*, 2015).

Le changement climatique est toutefois accompagné d'autres facteurs qui tendent à rendre les prix alimentaires plus élevés et instables : la croissance démographique, l'augmentation de la consommation de viande dans les pays émergents, l'augmentation des usages non alimentaires des produits agricoles pour décarboner l'économie et la promotion de pratiques agricoles durables mais moins productives (Brunelle et Dumas, 2019; Galtier, 2019). Daviron (2020) et Galtier (2021) soulignent dans ce sens que les agrocarburants consomment 15% de la production mondiale de maïs et d'huiles végétales (voir chapitre 19), et que la Chine a réformé sa politique agricole pour moins polluer ses sols, en compensant sa moindre production par une sécurisation de ses approvisionnements (*via* les « nouvelles routes de la soie »).

Ces tensions ont conduit à une multiplication de crises de prix sur les marchés internationaux (2008, 2010-2011, 2021-2023), avec des conséquences désastreuses sur la sécurité alimentaire mondiale, et la situation devrait aller en se dégradant (Galtier, 2019). Dans ce contexte, le commerce international et les stocks auront un rôle essentiel à jouer (Chen et Villoria, 2019; Wiebe *et al.*, 2015). Mais les règles de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), conçues en période d'abondance, ne sont pas adaptées aux pénuries. Elles limitent le droit de subventionner les exportations, mais pas celui de les restreindre ou de les bloquer, et restreignent fortement la capacité des pays à constituer des stocks publics, les considérant comme un moyen de soutenir les producteurs (Galtier, 2023). Les différentes initiatives pour réformer ces règles ont échoué, en raison de l'opposition de certains pays exportateurs.

2.2. Une menace additionnelle pour la sécurité alimentaire

Les phénomènes climatiques extrêmes figurent ainsi parmi les principaux facteurs d'insécurité alimentaire et de malnutrition, aux côtés des conflits, du ralentissement économique et de la croissance des inégalités (Bezner Kerr *et al.*, 2022; FAO *et al.*, 2023). Les pays à faible revenu sont particulièrement touchés, car leur offre alimentaire provient principalement de l'agriculture familiale, basée majoritairement sur des cultures pluviales et de l'élevage pastoral, avec des dispositifs d'alerte insuffisamment développés, les rendant très vulnérables aux chocs climatiques. La diminution

des revenus de ces petits agriculteurs (ainsi que celle des revenus des petits pêcheurs côtiers, affectés par la baisse des ressources halieutiques) réduira leur capacité à subvenir à leurs besoins alimentaires (FAO, 2018; Mbow *et al.*, 2019). Les populations indigènes sont également parmi les plus vulnérables face au changement climatique. Pauvres et marginalisées, elles risquent d'être particulièrement affectées, car leur alimentation traditionnelle et leurs valeurs sont liées à des écosystèmes menacés (Jantarasami *et al.*, 2018; Smith et Rhiney, 2016).

L'instabilité et la tendance à la hausse des prix des denrées alimentaires pousseront les ménages à faible revenu à réduire la diversité de leur alimentation. Ces tendances toucheront particulièrement les pays enclavés, à faible revenu, fortement dépendants des importations, et les ménages pauvres dans les zones sujettes aux inondations. De plus, la dégradation de la qualité de l'eau et la hausse des températures renforceront l'insécurité alimentaire. Les enfants des pays à faible revenu, en milieu rural, seront particulièrement à risque en raison de la réduction de la disponibilité et de la diversité alimentaire, de l'exposition à de fortes chaleurs et de l'augmentation des maladies diarrhéiques et à transmission vectorielle (Oppenheimer et Anttila-Hughes, 2016).

3. Conclusion

Les systèmes alimentaires contribuent fortement aux émissions de GES, en particulier ceux des pays à haut revenu et ceux où la déforestation reste élevée. Par conséquent, transformer les systèmes alimentaires constitue un levier majeur pour l'atténuation des GES.

Dans le même temps, les systèmes alimentaires sont aussi durement affectés par le changement climatique, à l'étape de la production et de la postproduction. La hausse des températures et l'augmentation de la fréquence des chocs climatiques ont des effets cumulatifs sur la production (en quantité, stabilité et qualité), sur la conservation et sur la transformation des produits alimentaires. Elles contribuent à accentuer l'instabilité des marchés et à tirer les prix à la hausse. Elles affectent de ce fait les revenus des producteurs et des acteurs de l'aval des filières, mais également les consommateurs, en raison de la réduction de la disponibilité des produits et/ou des hausses des prix (en particulier pour les produits les plus fragiles, les fruits et légumes, qui occupent une place essentielle en termes nutritionnels). Ces impacts sont toutefois très hétérogènes : ils affectent plus particulièrement les zones et les populations les plus vulnérables des pays à faible revenu (déjà les plus affectées par une insécurité alimentaire multifactorielle), du fait d'une plus forte exposition aux manifestations du changement climatique, de modes de production, d'équipements et d'infrastructures plus précaires et du faible pouvoir d'achat des populations.

Dans un contexte de multiplication des crises et des chocs de différentes natures, le changement climatique constitue ainsi une contrainte additionnelle pour parvenir à nourrir les neuf milliards de personnes attendues d'ici 2050.

4. Références bibliographiques

Akil L., Ahmad H.A., Reddy R.S., 2014. Effects of Climate Change on Salmonella Infections, *Foodborne Pathogens and Disease*, 11(12): 974-980.

Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J.-M., Silvestre M., Pharabod I., 2019. L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France – de la production à la consommation, CIRED. https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2021/05/empreinte_carbone_alimentation_en_france_fr_052019.pdf

Battilani P., Toscano P., Van Der Fels-Klerx H.J., Moretti A., Camardo Leggieri M., Brera C., *et al.*, 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change, *Scientific Reports*, 6(1): 24328.

Bezner Kerr R., Hasegawa R., Lasco I., Bhatt D., Deryng A., Farrell A., *et al.*, 2022. 2022: Food, Fibre, and Other Ecosystem Products, *In: Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc) (éd.)*, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 713-906. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>.

Brunelle T., Dumas P., 2019. Risks of higher food prices on international markets. *In: Dury S., Bendjebbar P., Hainzelin E., Giordano T., Bricas N. (éd.)*, Food Systems at risk: new trends and challenges, FAO, Cirad and European Commission, 103-105. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca5724en>

Chen B., Villoria N.B., 2019. Climate shocks, food price stability and international trade: evidence from 76 maize markets in 27 net-importing countries, *Environmental Research Letters*, 14(1): 014007.

Christopoulos M., Ouzounidou G., 2020. Climate Change Effects on the Perceived and Nutritional Quality of Fruit and Vegetables, *Journal of Innovation Economics & Management*, 34(1): 79-99.

Cornelus M., Pradinaud C., Villevieille A., Roux P., 2021. Panorama des méthodes d'évaluation environnementale. Guide méthodologique Version 1.1, ELSA-PACT. <https://www.elsa-pact.fr/content/download/3775/37021?version=1>

Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions, *Nature Food*, 2(3): 198-209.

David-Benz H., Sirdey N., Deshons A., Orbell C., Herlant P., 2022. Cadre conceptuel et méthode pour des diagnostics nationaux et territoriaux – Activer la transition durable et inclusive de nos systèmes alimentaires. FAO, Cirad, European Union, 70 p. <https://doi.org/10.4060/cb8603fr>

Daviron B., 2020. *Biomasse. Une histoire de richesse et de puissance*, Versailles, éditions Quæ, 392 p.

Fabre P., Dabat M.-H., Orlandoni O., 2021. Note méthodologique pour l'analyse des chaînes de valeur agricoles. Cadres et outils - Éléments clés. Version 2, Document technique et de recherche, Paris, France, Agrinatura EEIG, 43 p.

FAO, 2018. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Summary version, Rome, Italy, FAO, 60 p.

FAO, FIDA, OMS, PAM, UNICEF, 2023. L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2023. Urbanisation, transformation des systèmes agroalimentaires et accès à une alimentation saine le long du continuum rural-urbain, FAO, UNICEF, IFAD, WFP, WHO, 343 p.

Galtier F., 2019. Why food prices are likely to become more unstable, *In: Dury S., Bendjebbar P., Hainzelin E., Giordano T., Bricas N. (éd.)*, Food Systems at risk: new trends and challenges, FAO, Cirad, European Commission, 107-110. <https://www.doi.org/10.19182/agritrop/00105>

Galtier F., 2021. Note de lecture sur « Biomasse. Une histoire de richesse et de puissance », *Natures Sciences Sociétés*, 29(2): 242-244.

Galtier F., 2023. Take an inch for a mile. About an error of metrics in WTO rules and its impact on the ability of countries to build public stocks for food security, *Food Policy*, 116, 102400.

Hasegawa T., Wakatsuki H., Ju H., Vyas S., Nelson G.C., Farrell A., *et al.*, 2022. A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops, *Scientific Data*, 9(1): 58.

HLPE, 2017. HLPE Report # 12 - Nutrition and food systems. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4ac1286e-ef3-4f1d-b5bd-d92f5d1ce738/content>

- Iizumi T., Shioyama H., Imada Y., Hanasaki N., Takikawa H., Nishimori M., 2018. Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels, *International Journal of Climatology*, 38(14): 5405-5417.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jantarasami L., Novak R., Delgado R., Narducci C., Marino E., McNeely S., *et al.*, 2018. Chapter 15: Tribal and Indigenous Communities. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Vol. II, U.S. Global Change Research Program.
- Li M., Jia N., Lenzen M., Malik A., Wei L., Jin Y., Raubenheimer D., 2022. Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions, *Nature Food*, 3(6): 445-453.
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., 2019. Food Security. *In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.*
- Medina Á., Rodríguez A., Sultan Y., Magan N., 2015. Climate change factors and *Aspergillus flavus*: effects on gene expression, growth and aflatoxin production, *World Mycotoxin Journal*, 8(2): 171-180.
- Miller J.D., 2016. Mycotoxins in Food and Feed: A Challenge for the Twenty-First Century. *In: Li D.-W. (éd.), Biology of Microfungi*, Springer International Publishing, p. 469-493.
- Miller V., Reedy J., Cudhea F., Zhang J., Shi P., Erndt-Marino J., *et al.*, 2022. Global, regional, and national consumption of animal-source foods between 1990 and 2018: findings from the Global Dietary Database, *The Lancet Planetary Health*, 6(3): e243-e256.
- Moore M.-L., Riddell D., Vocisano D., 2015. Scaling Out, Scaling Up, Scaling Deep: Strategies of Non-profits in Advancing Systemic Social Innovation, *The Journal of Corporate Citizenship*, 58: 67-84.
- Nelson G.C., Valin H., Sands R.D., Havlík P., Ahammad H., Deryng D., *et al.*, 2014. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9): 3274-3279.
- Oppenheimer M., Anttila-Hughes J., 2016. The Science of Climate Change, *Future of Children*, 26(1): 11-30.
- Parrot L., Biard Y., Kabré E., Klaver D., Vannière H., 2018. Analyse de la chaîne de valeur Mangué au Burkina Faso - Rapport final, Rapport d'expertise, Montpellier, France, Cirad, 230 p.
- Ritchie H., Rosado P., Roser M., 2024. Meat and Dairy Production, Our World in Data. <https://ourworldindata.org/meat-production>
- Rosales M., Cervilla L., Sánchez-Rodríguez E., Rubio-wilhelmi M. del M., Blasco Leon M.B., Rios J., *et al.*, 2011. The effect of environmental conditions on nutritional quality of cherry tomato fruits: Evaluation of two experimental Mediterranean greenhouses, *Journal of the science of food and agriculture*, 91(1): 152-162.
- Rosenzweig C., Mbow C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., *et al.*, 2020. Climate change responses benefit from a global food system approach, *Nature Food*, 1(2): 94-97.
- Scarborough P., Clark M., Cobiac L., Papier K., Knuppel A., Lynch J., *et al.*, 2023. Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts, *Nature Food*, 4, 565-574. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00795-w>
- Smith R.-A.J., Rhiney K., 2016. Climate (in)justice, vulnerability and livelihoods in the Caribbean: The case of the indigenous Caribs in northeastern St. Vincent, *Geoforum*, 73, 22-31.
- Tubiello F.N., Karl K., Flammini A., Gütschow J., Obli-Laryea G., Conchedda G., *et al.*, 2022. Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems, *Earth System Science Data*, 14(4): 1795-1809.
- Watson S., Chen G., Sylla A., Routledge M.N., Gong Y.Y., 2016. Dietary exposure to aflatoxin and micronutrient status among young children from Guinea, *Molecular Nutrition & Food Research*, 60(3): 511-518.
- WHO, Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 2017. Evaluation of certain contaminants in food: eighty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, Geneva, World Health Organization, 182 p. <https://iris.who.int/handle/10665/254893>

Partie 2. Les systèmes agricoles et alimentaires, et le secteur des terres

WHO, 2023. Red and processed meat in the context of health and the environment: many shades of red and green: information brief, <https://www.who.int/publications/i/item/9789240074828>

Wiebe K., Lotze-Campen H., Sands R., Tabeau A., Van Der Mensbrugghe D., Biewald A., *et al.*, 2015. Climate change impacts on agriculture in 2050 under a range of plausible socioeconomic and emissions scenarios, *Environmental Research Letters*, 10(8): 085010.

Wild C.P., Miller J.D., Groopman J.D., 2015. Mycotoxin control in low- and middle-income countries, IARC Working Group Report Volume 9, 66 p.

Chapitre 9

Forêts et changement climatique

*Jacques Tassin, Alexandre Caron, Vincent Freycon, Bruno Hérault,
Bruno Locatelli, Marie Ange Ngo Bieng, Régis Peltier, Camille Piponiot*

La forêt est, selon la définition de la FAO, une surface caractérisée par un taux de couverture des arbres supérieur à 10 % et par une hauteur des arbres supérieure à 5 m (Keenan *et al.*, 2015). Elle revêt une grande diversité de physionomies, de compositions et d'étendues, mais aussi d'imbrications avec le monde agricole. Les interactions climatiques entre forêt et agriculture, par-delà les défrichements forestiers induits à 80 % par les fronts agricoles, soit environ 50 000 km² par an depuis 1990 (MacDicken *et al.*, 2015), restent cependant peu traitées dans la littérature scientifique. Les projets voués à une approche territoriale multisectorielle, tel TerrAmaz en Amazonie brésilienne (Poccard-Chapuis, 2022), demeurent rares. Aussi ce chapitre s'en tient-il aux forêts proprement dites, et explicite-t-il sommairement la manière dont les forêts gouvernent et subissent le climat. Sont également proposés quelques leviers d'action possibles pour permettre aux forêts, en tant qu'espaces transformés par les humains, de s'adapter au changement climatique.

1. La forêt comme maillon fondamental du climat mondial

Les forêts couvrent la planète sur 3 900 Mha répartis en trois grands domaines géographiques : tropical pour 50 % environ (2 000 Mha), boréal (1 100 Mha) et tempéré (750 Mha). Leur suivi annuel permet de préciser leur rôle dans le cycle global du carbone, comme cela est pratiqué en Guyane française. Les forêts secondaires régénérées naturellement représentent 57 % de la surface forestière totale, et seulement 7 % des forêts mondiales relèvent de plantations (FAO, 2020).

Les stocks des forêts de la planète sont de l'ordre de 860 GtC, dont 380 Gt (44 %) dans le sol (jusqu'à environ un mètre de profondeur), 360 GtC (42 %) dans la biomasse vivante (aérienne et souterraine), 75 GtC (9 %) dans le bois mort, et 45 GtC (5 %) dans la litière. La forêt tropicale représente plus de la moitié des stocks (470 GtC, 55 %) et le reste est réparti dans la forêt boréale (270 GtC, 31 %) et tempérée (120 GtC, 14 %) (Pan *et al.*, 2011). Ces forêts, principal puits de carbone en milieu continental et second puits après les océans, jouent un rôle crucial dans l'évolution du climat. Elles capteraient, selon les estimations, entre 70 % et 100 % de la 1,8 GtC/an absorbée au niveau des surfaces continentales (Wigneron et Ciais, 2022). Les forêts pourraient stocker 226 GtC de plus qu'actuellement si on les laissait se reconstituer dans des zones souvent en marge des grands massifs forestiers tropicaux, qui ne sont plus utilisées pour l'agriculture et qui restent libres de toute urbanisation (Mo *et al.*, 2023).

Les forêts interviennent dans l'atténuation du changement climatique au niveau global et dans l'adaptation à ses effets, aux échelles régionales et locales. Leur rôle dans

l'atténuation, par la photosynthèse qui absorbe le CO₂ atmosphérique et induit le stockage de carbone, est reconnu dans les négociations internationales et dans les grands instruments politiques forestiers, telle la REDD+ (réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts). C'est le premier secteur qui a fait l'objet de ces instruments. En revanche, leur rôle dans l'adaptation reste moins connu. Ce rôle passe par des services écosystémiques qui réduisent les impacts du changement climatique ou qui aident les sociétés humaines à s'adapter (Locatelli *et al.*, 2015a). Par exemple, par l'évapotranspiration, les forêts régulent les précipitations continentales ou régionales et la température locale (De Frenne *et al.*, 2013), et aident à maintenir un climat favorable à l'agriculture et à d'autres activités humaines. Dans les bassins-versants, elles absorbent l'excès d'eau puis le libèrent dans l'atmosphère lors des sécheresses, et favorisent l'infiltration dans les sols le long des systèmes racinaires (Bradshaw *et al.*, 2007). Dans les régions exposées aux phénomènes météorologiques extrêmes, elles protègent les sols de l'érosion (Elliott *et al.*, 2018). Elles contribuent également à la préservation de la biodiversité en abritant de nombreuses espèces animales et végétales (Putz *et al.*, 2001). Les forêts et leurs 60 000 espèces d'arbres abritent en effet 80 % des espèces d'amphibiens, 75 % des oiseaux et 65 % des mammifères. Cette biodiversité, facteur de résilience écosystémique, est un atout précieux pour l'adaptation aux perturbations climatiques. Il s'agit de ne plus voir les forêts seulement comme des puits de carbone (Locatelli *et al.*, 2015b).

2. Liens actifs et rétroactifs entre changement climatique et forêts

Avec l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère, la biomasse aérienne des arbres matures augmente théoriquement (Körner, 2017), mais le taux de mortalité croît lors d'épisodes extrêmes de sécheresse soit par déficit de photosynthèse soit par embolies dans la sève brute des troncs (McDowel *et al.*, 2018). Le déficit hydrique assèche la partie supérieure des houppiers, dès lors fragilisés. La phénologie foliaire est également modifiée, l'élévation de la température allongeant la saison de végétation et augmentant des besoins en eau insatisfaits. En résultent parfois des mégafeux générant des pics d'émission de GES (Bowman *et al.*, 2021).

Les saisons sèches extrêmes induites par le changement climatique ont des effets variables sur les forêts tropicales humides (FTH), exposées à une pluviométrie annuelle moyenne de 2 200 mm et une saison sèche de 3,7 mois. Ces moyennes restent toutefois contrastées à l'échelle mondiale (Amazonie, bassin du Congo, bassin du Bornéo-Mékong), régionale ou locale. Par exemple, la longueur de la saison sèche varie de 0,6 à 4,5 mois, respectivement au nord-ouest et au sud-est de la FTH de l'Amazonie. En Asie du Sud-Est notamment, El Niño correspond à une sécheresse extrême, en lien avec l'inversion du courant équatorial sud (Glantz et Ramirez, 2020). Son impact varie selon les sites, avec un impact faible sur la mortalité des arbres dans les sites à saison sèche marquée, mais fort dans les sites sans saison sèche marquée, comme en Malaisie où ce taux est passé de 0,9 % à 6,4 % durant El Niño 1997-1998 (Clark, 2004). Dans les sites à saison sèche marquée, les espèces sont en effet adaptées à la sécheresse. Durant les trente dernières années, plusieurs événements El Niño ont conduit en Amazonie à un changement floristique des nouveaux arbres recrutés, avec une augmentation des genres adaptés à la sécheresse, une diminution des genres associés à un climat plus humide.

Les échanges hydriques entre atmosphère et sols, mais aussi les circulations des masses nuageuses et le déclenchement des précipitations sous l'intercession des forêts, sont modifiés en retour par le changement climatique selon des mécanismes rétroactifs restant à clarifier et à quantifier. En assurant 80% des échanges de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère et en dissipant une partie de l'énergie solaire par évapotranspiration, les forêts représentent des thermostabilisateurs hautement performants. Mais sous l'effet de l'élévation de la température et des assèchements récurrents, elles alimentent des boucles de rétroaction qui amplifient le changement climatique.

Les conditions climatiques à venir, dont certaines n'ont jamais été expérimentées au cours de l'histoire humaine, et qui relèvent d'un emballement auquel concourent désormais les forêts, modifieront le rôle de ces dernières dans la séquestration du carbone atmosphérique. L'échauffement accroît en effet la respiration végétale, et l'assèchement des sols élève la mortalité des jeunes arbres, augmentant d'autant le rejet de carbone. Certes, en tant que telle, l'augmentation du CO₂ par les activités humaines augmente l'efficacité photosynthétique des plantes, et donc l'absorption du carbone dans les forêts. Mais cette même augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère entraîne une hausse des températures globales. L'effet de cette hausse sur la séquestration du carbone dans les forêts dépend donc de la latitude. Dans les zones boréales, peu fragmentées par les activités humaines, l'allongement de la saison de croissance permet à la forêt d'avancer vers les pôles. À des latitudes plus basses, les températures extrêmes peuvent entraîner une surmortalité des arbres, conduisant à une libération massive de carbone. La matière organique des sols forestiers pourrait être elle-même affectée par le réchauffement qui accroît l'activité biologique et donc la respiration du sol, libérant d'autant le carbone qu'il contient. Le changement climatique augmentera donc probablement la mortalité des arbres et les rejets de carbone à l'état gazeux par dégradation de la matière organique du sol, réduisant sérieusement, voire inversant, leur fonction de puits de carbone.

Le changement climatique induit en outre des effets en cascade sur les autécologies des espèces forestières, au risque de leur extinction ou de leur pullulation. Il interagit avec la transformation des terres et la connectivité globale des êtres vivants où se créent de nouvelles interfaces entre humains, animaux et agents pathogènes. L'épidémie à virus Ebola en Afrique de l'Ouest, en 2014, s'est déclenchée en Guinée forestière, où le paysage forestier tropical s'était transmué en agrosystème semé d'îlots forestiers. Dans ces territoires reconfigurés, les communautés animales, telles les chauves-souris, ainsi que leurs agents pathogènes, adaptent leurs autécologies et modifient les risques de transmission entre espèces. Le risque épidémique, voire pandémique, associé à une « sortie de la forêt » d'un agent pathogène, résulte des transformations humaines opérées en forêt.

3. Facteurs de variabilité de la vulnérabilité des forêts au changement climatique

À l'échelle de la parcelle forestière, l'hétérogénéité et la diversité des espèces et des classes d'âge conditionnent la vulnérabilité des peuplements d'arbres. Par leurs spécificités propres à la phénologie, l'enracinement et l'autécologie, ces espèces présentent une diversité de vulnérabilité au changement climatique. Les forêts mélangées semblent moins vulnérables à la sécheresse et aux ravageurs que les forêts monospécifiques (Bauhus *et al.*, 2017), mais tous les mélanges ne sont pas équivalents. Les arbres plus âgés sont plus résistants à la sécheresse, mais sont aussi moins résilients (Au *et al.*, 2022).

À l'échelle du paysage vu comme complexe d'écosystèmes, l'hétérogénéité spatiale et structurelle des forêts détermine leur perméabilité au feu et leur résistance au vent. Les forêts naturelles se révèlent dès lors moins vulnérables que les forêts plantées (Liu *et al.*, 2022). Les forêts naturelles faisant l'objet d'un façonnage ancestral par le feu bénéficient d'une hétérogénéité spatiale en mosaïque, qui diminue leur conductivité globale au feu, comme cela est révélé au Venezuela et au Brésil (Mistry *et al.*, 2016).

À l'échelle de la région forestière enfin, l'élévation de la température et la raréfaction des précipitations ont affecté, au cours des deux dernières décennies, la résistance des forêts aux attaques de ravageurs, aux feux ou aux tempêtes, cela dans les zones tempérées de latitude élevée, mais aussi dans la zone intertropicale. La modélisation permet de prédire le devenir de physionomies forestières parmi d'autres. Il apparaît par exemple que dans les marges forestières du nord et du sud du bassin forestier du Congo, les forêts atlantiques et la plupart de celles de la République démocratique du Congo figurent parmi les plus vulnérables (Réjou-Méchain *et al.*, 2021).

4. Pratiques forestières et autres mesures adaptatives

Le changement climatique, qui modifie les conditions thermiques, l'efficacité photosynthétique, l'accès aux ressources hydriques et nutritives, suscite une gestion adaptative dont la prise de conscience par la profession forestière demeure paradoxalement récente. La difficulté essentielle tient d'une triple incertitude représentée par la faible prévisibilité du changement climatique, par l'indétermination des réponses des forêts à ce changement, et par les délais inconnus de ces réponses (Jandl *et al.*, 2019). Aussi les analyses historiques, investissant des évolutions passées étalées sur au moins plusieurs siècles, restent-elles peu utiles pour concevoir des mesures adaptatives idoines. Les modèles dits de niche écologique ou de succession de végétation restent quant à eux informatifs, mais insuffisants pour prédire un devenir forestier.

En outre, l'accroissement de telles connaissances ne sera jamais à la mesure de l'extrême variabilité des forêts et de leurs dynamiques. Les recommandations à l'égard de la gestion forestière restent, de ce fait, d'ordre générique, voire empirique, et favorisent globalement (1) la diversité et l'hétérogénéité des essences et des structures en tant que facteurs de résilience, (2) le rallongement de l'âge d'exploitation qui permet de capter plus de carbone et de protéger les jeunes arbres, et (3) l'accompagnement et l'observation en temps réel par les techniciens et les praticiens, à l'égard des formes d'adaptation naturelles qui se manifestent, au-delà même des pratiques interventionnistes sylvicoles (encadrés 9.1 et 9.2). Ces mesures restent, dans une large mesure, de nature prospective, les pratiques propices à l'expression d'une résilience forestière demeurant encore d'ordre exploratoire (Chuine *et al.*, 2023).

Encadré 9.1. Accroître la résilience forestière en Côte d'Ivoire

Dans les plantations forestières de Côte d'Ivoire, la diversification des espèces et des âges des arbres est une stratégie fondamentale pour renforcer l'adaptation des forêts restaurées au changement climatique (figure 9.1). Premièrement, la diversité des espèces accroît l'adaptation de l'écosystème aux conditions climatiques changeantes de l'Afrique de l'Ouest. Les plantations y seront confrontées à des modifications des régimes de précipitations, des événements météorologiques extrêmes et des

variations de température. En introduisant diverses espèces, on augmente la probabilité d'inclure des arbres adaptés à des conditions spécifiques. Certaines espèces peuvent mieux résister à la sécheresse, et d'autres peuvent prospérer en conditions plus humides. Cette diversité offre une base solide pour la future régénération naturelle et pour la résilience face à des scénarios climatiques divers (Messier *et al.*, 2022). De plus, la diversification des âges des arbres joue un rôle clé dans la résilience forestière. Les jeunes arbres sont souvent plus enclins à une croissance adaptative, tandis que les arbres plus matures ont développé des mécanismes de résistance à long terme. En intégrant une gamme d'âges, les plantations peuvent ainsi mieux s'adapter aux perturbations telles que les incendies ou les sécheresses saisonnières, et augmenter la stabilité des écosystèmes et la pérennité de la couverture forestière. Enfin, la diversification crée un bouclier naturel qui accroît la résistance aux maladies et aux ravageurs. Les plantations monospécifiques sont en revanche plus vulnérables aux épidémies, qui se propagent rapidement parmi les arbres de la même espèce.



Figure 9.1. Plantations d'essences forestières locales, en mélange avec du plantain dans un système de type taungya en forêt classée de Téné, Côte d'Ivoire. Crédit : photo B. Hérault.

Encadré 9.2. Une pratique forestière adaptative accessible à tous

Une autre pratique adaptative, dans les pays encore nombreux où l'on pratique l'agriculture itinérante sur brûlis de forêt, est la régénération naturelle assistée (RNA). Notamment utilisée en République centrafricaine (Kpolita *et al.*, 2022) et en République démocratique du Congo (Peltier *et al.*, 2014), elle consiste à conserver, durant la période de culture, des semis, drageons ou rejets d'espèces forestières préexistantes et de favoriser leur croissance par le sarclage sélectif, l'éclaircie et l'élagage (figure 9.2). Ces espèces, perçues comme peu gênantes pour les cultures vivrières, s'avèrent productives (en charbon, fruits, chenilles, fibres et miel, par exemple) pendant la jachère ou selon une association agroforestière pérenne. La RNA évite de défricher de nouvelles terres forestières et d'émettre de grandes quantités de CO₂. Elle permet en outre d'augmenter le volume de bois disponible dans les jachères forestières, et de fixer autant de carbone. En valorisant un volume de bois-énergie plus élevé sur une période de jachère équivalente, elle réduit l'utilisation possible d'énergie fossile. Elle permet également de conserver une diversité d'espèces plus élevée en évitant dès lors l'envahissement par des espèces introduites pyrophiles et par la savanisation des paysages. La majorité des espèces choisies en RNA sont dites « de lumière », résistantes à la chaleur et à la sécheresse de l'atmosphère, et sont donc mieux adaptées au changement climatique. Certains agriculteurs prolongent la RNA par la réalisation d'un jardin agroforestier pérenne regroupant palmiers, arbres fruitiers et forestiers, et cultures vivrières en mélange, renouvelées au fur et à mesure de leurs récoltes.



Figure 9.2. Lors de la récolte du maïs et du bouturage du manioc, un agriculteur du plateau Batèkè en République démocratique du Congo désigne par un piquet le semis naturel d'un arbre (*Millettia laurentii*, ou wengé) qu'il souhaite conserver. Crédit : photo R. Peltier.

5. Instances internationales, incitations économiques et animations sciences-sociétés

Si la compréhension des relations entre les forêts et les microclimats est en réel essor, la transposition à l'échelle internationale reste plus complexe. Le partage des préoccupations entre les parties prenantes exige un temps long qui s'ajuste mal à l'urgence d'une réaction globale. Une indispensable équité s'impose de surcroît, car ce sont les pays dits du Global South ou les Suds qui pâtissent le plus des modifications du climat, avec l'élévation du niveau des océans, la multiplication des excès climatiques, les inondations et les feux de forêt.

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et son protocole de Kyoto de 1997 ont débouché sur un mécanisme pour un développement propre (MDP) qui ne contraint pas directement les émissions, même s'il finance des projets de réduction d'émissions de GES. Les discussions menées à l'échelle internationale, soulignant l'importance de la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+, le « + » correspondant à la prise en compte de l'augmentation des stocks de carbone, par exemple grâce à des pratiques sylvicoles adaptées ou des plantations). L'objectif du programme REDD+, lancé en 2008, est d'inciter les pays à prendre des mesures pour protéger leurs forêts. La difficulté est de mesurer la déforestation évitée par ce mécanisme, dès lors qu'elle se base sur des hypothèses prédictives invérifiables. Aucun modèle n'est capable de prédire l'évolution des variables économiques et climatiques contrôlant les taux de déforestation (prix des produits agricoles, sécheresses et précipitations, feux), ce qui laisse la porte ouverte à des scénarios « optimisés », avec des variables choisies en fonction des intérêts stratégiques des États ou des acteurs privés qui les proposent (Karsenty, 2023). Ces mécanismes financiers peinent à entrecroiser les aspects sociétaux, environnementaux et de développement.

Le changement climatique et les forêts souffrent d'être envisagés de manière isolée, comme s'ils existaient indépendamment des déterminants socio-économiques qui en façonnent le devenir. Leurs évolutions et leurs dégradations sont pourtant d'abord le fruit d'injustices et d'iniquités humaines au sein des sociétés, les logiques néolibérales intervenant au premier chef (Stephens, 2022). Les sciences de l'écologie forestière et de la sylviculture restent dès lors dépourvues pour affronter des changements dont les causes politiques sont placées hors de leur champ d'investigation. Les discours sociétaux prônent des démarches adaptatives pour accroître la résilience forestière face au changement climatique et pour rechercher des solutions puisées dans la technique, mais renoncent à investir les indispensables changements sociaux transformatifs. De fait, ils participent au désengagement des populations, pourtant seules aptes à porter les inflexions sociales nécessaires. Dans la mesure où les dimensions sociales du changement climatique et leurs entrecroisements avec les réalités forestières restent trop peu appréhendés, les politiques mises en œuvre excluent les populations en précarité économique, les femmes et les communautés non blanches (Reames, 2016).

De nouvelles formes d'animation sociale restent à instruire, dont font partie les jeux dits sérieux (Garcia *et al.*, 2016). ClimateRush est un projet de jeu dont l'objectif est d'alerter nos sociétés sur la vulnérabilité des forêts tropicales. Il met en jeu la variabilité de la vulnérabilité climatique chez différentes espèces d'arbres de FTH (Veintimilla *et al.*, 2019),

face à des augmentations de température calibrées sur les huit scénarios de réchauffement climatique produits par le Giec. Cette variabilité de vulnérabilité est matérialisée par des optimums spécifiques définissant une niche thermique propre à chaque espèce et représentée par la valeur moyenne des températures où l'espèce est présente (Hernández Gordillo, 2021). La version finalisée sera un jeu de plateau orienté vers l'éducation et la concertation environnementale. Elle aura vocation à renforcer le pouvoir d'action sociétale par des stratégies de réduction, d'adaptation et de compensation proposées par le Giec, afin de limiter la vulnérabilité climatique des écosystèmes forestiers.

6. Conclusion

Ce panorama révèle la complexité des mécanismes couplant forêts et changement climatique, et les incertitudes qu'ils recouvrent, dans des perspectives d'emballement au sujet desquelles la recherche scientifique reste démunie. Celle-ci est confrontée à une panoplie de tendances qui s'opposent parfois les unes aux autres, de sorte qu'il est particulièrement difficile, sinon hasardeux, de préciser dans quelle direction s'oriente leur résultante.

L'avenir de la forêt s'avère davantage déterminé par les dynamiques agricoles et par les aspirations sociales que par le réchauffement climatique lui-même ou la manière dont la forêt est régie. Une fois encore, le réchauffement climatique apparaît non maîtrisable, si l'on persiste à le considérer comme un problème dont il ne s'agirait pas d'affronter les causes. La forêt ne peut s'envisager comme une entité autonome, hors de continuités socio-écologiques, dont les évolutions restent déterminées par des processus de justice environnementale et sociale, hélas, tragiquement déconsidérés.

7. Références bibliographiques

- Au T.F., Maxwell J.T., Robeson S.M., Li J., Siani S.M., Novick K.A., *et al.*, 2022. Younger trees in the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought. *Nature climate change*, 12(12), 1168-1174.
- Bauhus J., Forrester D.I., Gardiner B., Jactel H., Vallejo R., Pretzsch H., 2017. Ecological stability of mixed-species forests. In: *Mixed-species forests: Ecology and management*, Springer, 337-382.
- Bowman D.M., Williamson G.J., Price O.F., Ndalila M.N., Bradstock R.A., 2021. Australian forests, megafires and the risk of dwindling carbon stocks. *Plant, Cell & Environment*, 44(2), 347-355.
- Bradshaw C.J.A., Sodhi N.S., Peh K.S.H., Brook B.W., 2007. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 13: 2379-2395.
- Chuine I., Ciais P., Cramer W., Laskar J., 2023. Rapport : Les forêts françaises face au changement climatique, Paris, Académie des Sciences.
- Clark D.A., 2004. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 477-491.
- De Frenne P., Rodríguez-Sánchez F., Coomes D.A., Baeten L., Verstraeten G., Vellend M., *et al.*, 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46), 18561-18565.
- Elliot W.J., Page-Dumroese D., Robichaud P.R., 2018. The effects of forest management on erosion and soil productivity. In: *Soil quality and soil erosion*, CRC Press, 195-208.
- FAO, 2020. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 : principaux résultats, Rome, FAO.
- Garcia C., Dray A., Waerber P., 2016. Learning begins when the game is over: using games to embrace complexity in natural resources management. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 25(4), 289-291.

- Glantz M.H., Ramirez I.J., 2020. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to enhance societal readiness for El Niño's impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11, 394-403.
- Hernández Gordillo A.L., Vilchez Mendoza S., Ngo Bieng M.A., Delgado D., Finegan B., 2021. Altitude and community traits explain rain forest stand dynamics over a 2370-m altitudinal gradient in Costa Rica. *Ecosphere*, 12(12): e03867. <https://www.doi.org/10.1002/ecs2.3867>
- Jandl R., Spathelf P., Bolte A., Prescott C.E., 2019. Forest adaptation to climate change—is non-management an option?. *Annals of forest science*, 76(2), 1-13.
- Karsenty A., 2023. Inadéquation des mécanismes internationaux pour l'environnement : peut-on en finir avec la déforestation grâce à la compensation carbone?, *La revue internationale et stratégique*, 3, 95-105.
- Keenan R.J., Reams G.A., Achard F., de Freitas J.V., Grainger A., Lindquist E., 2015. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest ecology and management*, 352, 9-20.
- Körner C., 2017. A matter of tree longevity. *Science*, 355(6321), 130-131.
- Kpolita A., Dubiez E., Yongo O.D., Peltier R., 2022. First evaluation of the use of Assisted Natural Regeneration by Central African farmers to restore their landscapes. *Trees, Forests and People*, 7:100165.
- Liu D., Wang T., Peñuelas J., Piao S., 2022. Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests. *Nature Geoscience*, 15(10), 800-804.
- Locatelli B., Catterall C.P., Imbach P., Kumar C., Lasco R., Marín-Spiotta E., et al., 2015a. Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. *Restoration Ecology*, 23(4), 337-343. <https://www.doi.org/10.1111/rec.12209>
- Locatelli B., Pavageau C., Pramova E., Di Gregorio M., 2015b. Integrating climate change mitigation and adaptation in agriculture and forestry: opportunities and trade-offs. *WIREs Climate Change*, 6(6), 585-598. <https://www.doi.org/10.1002/wcc.357>
- MacDicken K., Jonsson Ö., Piña L., Maulo S., Contessa V., Adikari Y., et al., 2016. Évaluation des ressources forestières mondiales 2015 : comment les forêts de la planète changent-elles?, Rome, FAO, 54 p.
- McDowell N., Allen C.D., Anderson-Teixeira K., Brando P., Brienen R., Chambers J., et al., 2018. Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist*, 219(3), 851-869.
- Messier C., Bauhus J., Sousa-Silva R., Auge H., Baeten L., Barsoum N., et al., 2022. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests!. *Conservation Letters*, 15(1), e12829.
- Mistry J., Bilbao B.A., Berardi A., 2016. Community owned solutions for fire management in tropical ecosystems: case studies from Indigenous communities of South America. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0174>
- Mo L., Zohner C.M., Reich P.B., Liang J., de Miguel S., Nabuurs G.-J., et al., 2023. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature* 624, 92-101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>
- Pan Y.D., Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., et al., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Peltier R., Dubiez E., Diowo S., Gigaud M., Marien J-N., Marquant B., et al., 2014. Assisted Natural Regeneration in slash-and-burn agriculture: Results in the Democratic Republic of the Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 321(3) : 67-79.
- Poccard-Chapuis R., 2022. Oportunidades para restauração florestal em Paragominas. Projeto TerrAmaz, Paragominas, Brésil, 120 p.
- Putz F.E., Blate G.M., Redford K.H., Fimbel R., Robinson J., 2001. Tropical forest management and conservation of biodiversity: an overview. *Conservation Biology*, 15(1), 7-20.
- Reames T.G., 2016. Targeting energy justice: Exploring spatial, racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban residential heating energy efficiency. *Energy Policy*, 97, 549-558.

Réjou-Méchain M., Mortier F., Bastin J.F., Cornu G., Barbier N., Bayol N., *et al.*, 2021. Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature*, 593(7857), 90-94.

Stephens J.C., 2022. Beyond climate isolationism: a necessary shift for climate justice. *Current Climate Change Reports*, 8(4), 83-90.

Veintimilla D., Ngo Bieng M.A., Delgado D., Vilchez Mendoza S.J., Zamora N., Finegan B., 2019. Drivers of tropical rain forest composition and alpha-diversity patterns over a 2520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9(10): 5720-5730.

Wigner J., Ciais P., 2021. Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète. Site Planet-Vie, ENS, EDUSCOL. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/cycles-biogeochimiques/role-des-forets-dans-le-bilan-de-carbone-de-la-planete>

Chapitre 10

Les débats « agriculture et changement climatique » : le cas des productions animales

*Christian Corniaux, Vincent Blanfort, Mathieu Vigne,
Jonathan Vayssières, Guillaume Duteurtre*

1. L'élevage, une activité controversée

Les productions animales font partie des secteurs les plus controversés dans les grands enjeux environnementaux, et notamment dans les débats sur le changement climatique. Une étude récente (FAO, 2023) évalue à 12 % la part du secteur de l'élevage dans les émissions anthropiques totales de gaz à effet de serre (GES), ce qui représente environ 40 % des émissions totales des systèmes agro-alimentaires. C'est le méthane (CH₄) qui en est la principale cause, avec plus de la moitié des émissions liées aux productions animales, tandis que le dioxyde de carbone CO₂ compte pour un peu moins d'un tiers, et le protoxyde d'azote (N₂O), pour 15 %. Ce rôle du secteur de l'élevage dans les émissions de gaz à effet de serre, et donc dans le changement climatique, est très souvent mis en avant au sein de la communauté scientifique, et donne lieu à d'importants travaux sur les potentiels leviers d'atténuation.

À ces reproches s'ajoutent des controverses sur le rôle de l'élevage dans la déforestation, sur la compétition pour l'usage des terres entre l'alimentation animale et l'alimentation humaine dans la dégradation des terres, ou sur la pollution des nappes phréatiques. La communauté scientifique est aussi régulièrement interrogée sur l'impact de la consommation de viande sur la santé humaine, et sur le bien-être animal en élevage intensif. En écho à ces débats, de nombreuses organisations de la société civile prônent dans les pays du Nord le végétarisme ou le flexitarisme, ou développent des discours antilaits ou des campagnes pour la réduction, voire pour l'arrêt, de la consommation de viande (rouge en particulier) et de charcuterie (voir chapitre 23). L'élevage est ainsi au cœur de nombreux débats de société portant sur l'agriculture, sur l'alimentation et sur le changement climatique. Pour étayer des plaidoyers radicaux, certaines organisations de la société civile en viennent à accuser injustement l'élevage d'être responsable de plus de 50 % des émissions de GES anthropiques¹, ce qui souligne la cristallisation des débats de société sur la question des liens entre l'élevage et le changement climatique.

Ces controverses doivent cependant être examinées au regard de la diversité des contextes. À l'échelle mondiale, il existe une très grande diversité de systèmes de

1. Association végétarienne de France : « L'élevage est responsable de 14,5 % à 51 % des émissions globales de gaz à effet de serre selon les estimations », <https://www.vegetarisme.fr/comprendre/planete/gaz-a-effet-de-serre-et-elevage-industriel/#:~:text=L%C3%A9levage%20est%20responsable%20de,particulier%20sur%20le%20changement%20climatique.>

production, d'espèces élevées, de modes de transformation et de commercialisation, et de modes de consommation. Les systèmes d'alimentation des animaux, notamment, sont extrêmement variés, depuis l'exploitation des terres de parcours par les élevages pastoraux jusqu'aux feed-lots². Ces systèmes d'alimentation jouent un rôle essentiel dans les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre, mais aussi dans la capacité des prairies et des parcours à stocker du carbone dans les sols et dans la végétation, dans la pollution des nappes, dans la qualité des produits, etc. Dénoncer les impacts de l'élevage pris comme un ensemble homogène n'a donc guère de sens, si l'on ne prend pas en compte cette diversité de situations et de contextes locaux (voir chapitre 16).

Dans les pays du Sud, en particulier, les modes d'élevage sont parfois très différents de ceux que l'on rencontre dans les pays du Nord, et les activités d'élevage jouent dans de nombreux pays un rôle social et économique structurant. Le secteur de l'élevage représente au niveau mondial environ 40% de la richesse agricole produite, et 1,3 milliard d'emplois. On estime ainsi que l'élevage assure ou contribue aux moyens d'existence et à la sécurité alimentaire de près d'un milliard de personnes dans le monde, dont 430 millions d'éleveurs pauvres (FAO, 2016).

Les activités d'élevage assurent aussi de multiples fonctions dans les systèmes paysans, où ils sont fortement intégrés aux systèmes agricoles (voir chapitres 12 et 16). Ces systèmes mixtes sont majoritaires dans les pays du Sud (Herrero *et al.*, 2016). Dans de nombreuses communautés vulnérables, le troupeau constitue souvent une assurance sur le long terme, et une épargne. Les animaux assurent aussi un rôle dans la production de fumure organique essentielle au maintien de la fertilité des sols dans des pays où les agriculteurs ont peu accès à des engrais de synthèse. Les animaux constituent par ailleurs dans les systèmes mixtes une force de traction animale pour les cultures (Alary *et al.*, 2011). Les systèmes pastoraux couvrent par ailleurs 30% de l'espace terrestre sous toutes les latitudes, et notamment dans les zones marginales pour l'agriculture (Herrero *et al.*, 2016). Leur importance est essentielle en Afrique et en Asie centrale, où l'élevage de ruminants contribue à l'équilibre et à la durabilité des écosystèmes en limitant l'embroussaillage. Il concourt au maintien de la biodiversité, stimule la croissance végétale, participe aux cycles des nutriments, à la dissémination des graines, ou encore améliore l'infiltration des eaux de pluie, et ce, sur de vastes territoires souvent dépourvus de toute autre activité économique.

Revenir sur les multiples rôles de l'élevage dans les pays du Sud permet de mettre en évidence des fonctions qu'il joue aussi dans les économies développées. Dans de nombreux pays du Nord, l'élevage possède, aussi, des fonctions environnementales, sociales, ou économiques qui justifient de ne pas le considérer, de façon mécanique, seulement comme un facteur d'ajustement pour réduire les émissions de gaz à effets de serre (Ryschawy *et al.*, 2017; Dumont *et al.*, 2016). Pour éclairer les arbitrages nécessaires entre ces fonctions environnementales, économiques et sociales, la contribution des différents types d'élevages au changement climatique doit être mieux appréhendée.

En regard des fortes évolutions qu'ont connues les différentes filières de l'élevage au cours des dernières décennies et notamment de leur croissance (voir chapitre 16), ce chapitre présente de façon globale l'impact du secteur de l'élevage sur le changement climatique.

2. Feed-lots : engraissement industriel et intensif de bovins à viande basé sur la production intensive de maïs.

Nous proposons ensuite d'éclaircir certaines des controverses qui sont associées à cette question, qui font désormais de l'élevage un objet particulièrement controversé.

2. Quelles contributions de l'élevage au changement climatique ?

Les fortes dynamiques qui caractérisent le secteur de l'élevage, en particulier sa forte croissance, ont des répercussions majeures sur l'environnement. Partout dans le monde, les productions animales intensives se sont développées, accompagnées de chaînes de valeur industrialisées (Steinfeld *et al.*, 2006 ; de Haan *et al.*, 1997). Cette « révolution de l'élevage », associée à l'extension des terres cultivées pour l'alimentation animale et humaine, a exacerbé la pression humaine sur les terres et sur les ressources naturelles (voir chapitre 1).

Selon les dernières estimations de la FAO (FAO, 2023), le secteur de l'élevage est responsable de 12% des émissions anthropiques mondiales de GES (de 6,2Gt eqCO₂/an), qui se répartissent en émissions directes et indirectes (figure 10.1).

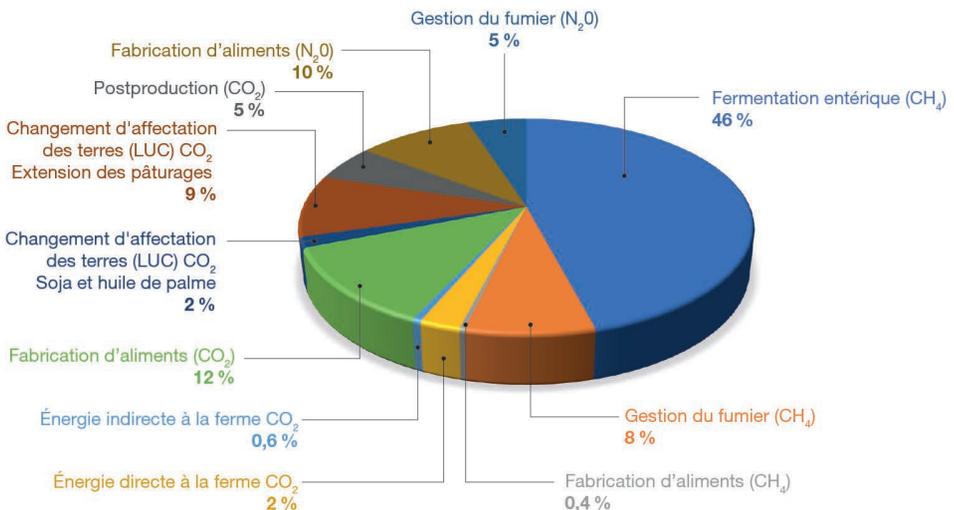


Figure 10.1. Répartition et type des émissions du secteur de l'élevage. Source : d'après FAO (2023).

Les émissions directes forment plus de la moitié des émissions totales du secteur (3,7Gt eqCO₂). Elles comprennent les émissions de méthane (CH₄) entérique, du CH₄ et du N₂O liés à la gestion des effluents, ainsi que les émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie directement sur la ferme.

Les émissions indirectes de CO₂ comprennent la consommation d'énergie en amont des systèmes de production, pour la fabrication d'engrais et de pesticides pour la production, la transformation et le transport d'aliments pour animaux, des animaux vivants et des produits d'élevage. Les émissions indirectes de CH₄ et N₂O proviennent de la fabrication des aliments et des engrais. Enfin les émissions indirectes spécifiques au CO₂ sont associées en particulier à la conversion des forêts en pâturages et à l'expansion des plantations de palmiers à huile et de soja pour la production d'aliments pour animaux.

Au-delà de ces chiffres globaux, les émissions de GES du secteur de l'élevage sont très différentes selon les régions du monde, sans être complètement corrélées aux volumes de production animale (figure 10.2). Elles sont aussi très reliées aux espèces (grands ruminants : bovins 65%, buffles 9%, petits ruminants 7%, volailles 10% et porcins 9%). L'ensemble des ruminants est donc le plus contributeur aux émissions de l'élevage (plus de 80%), du fait des émissions de méthane à hauteur de 54% (31% pour le dioxyde de carbone CO₂, 15% pour l'oxyde nitreux N₂O) (Gerber *et al.*, 2013).

C'est la raison pour laquelle les émissions par unité de protéine produite sont plus élevées pour la viande et le lait de ruminants que pour le porc ou la volaille (Duteurtre *et al.*, 2019). En revanche, il convient de prendre en compte la grande diversité des sous-systèmes d'élevage, certains apparaissant moins émetteurs en carbone. Les systèmes d'élevage au pâturage, basés sur l'utilisation de pâturages naturels et de prairies cultivées, ainsi que les systèmes intégrés culture-élevage, génèrent généralement moins d'émissions : ils ne seraient responsables que de 20% des émissions totales de l'élevage (Gerber *et al.*, 2013).

Ces chiffres font encore l'objet de débats au sein de la communauté scientifique. En particulier, la contribution de l'élevage aux émissions liées au changement d'affectation des terres et à la séquestration du carbone n'est pas encore correctement évaluée. L'analyse par grande région du monde (Gerber *et al.*, 2013) montre que l'Afrique subsaharienne, compte tenu de sa faible productivité, et l'Amérique latine et les Caraïbes, en raison de la conversion des forêts primaires en pâturage et en cultures destinées à l'alimentation animale, sont les régions les plus émettrices par kilogramme de carcasse produite (70 kg eqCO₂/kg). Cependant, les références sur la contribution spécifique des systèmes d'élevages des pays du Sud aux émissions de GES sont insuffisantes et

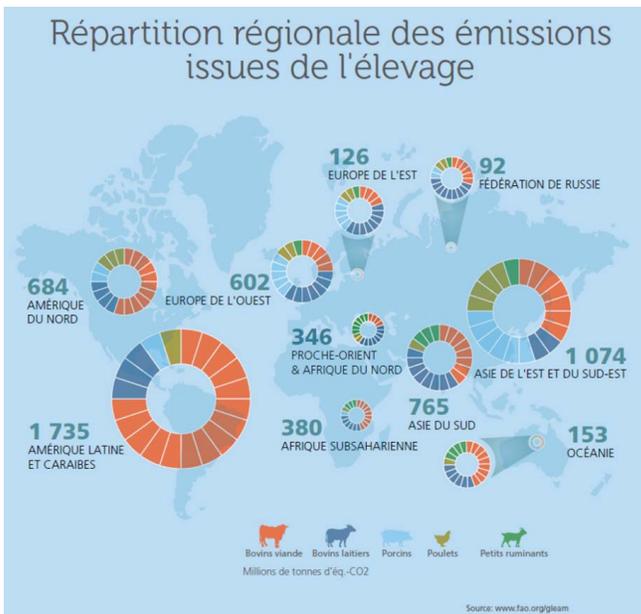


Figure 10.2. Répartition régionale et par espèce des émissions issues de l'élevage. Source : FAO (2016).

ces chiffres cachent une diversité mise en évidence par des évaluations comme celles menées par le Cirad sur des systèmes d'élevages contrastés (Vigne *et al.*, 2015).

Par ailleurs l'évaluation des systèmes d'élevages est très dépendante des méthodes et des métriques utilisées (Blanfort *et al.*, 2022), où les standards sont parfois inadaptés à cette diversité (voir chapitre 16).

3. Quelles options pour des systèmes alimentaires durables ?

Depuis quarante ans, la croissance très rapide des productions animales (voir chapitre 16) a conduit à une croissance proportionnelle des émissions de GES. Cette évolution est rendue d'autant plus problématique que ce sont les systèmes d'élevages les plus intensifs, et les plus spécialisés, qui ont contribué à cet essor des productions animales. Cet engrenage nécessite de revoir les perspectives de transformation du secteur. Cependant, il est également indispensable de préciser cette vision globale en nuanciant l'intensité de ces émissions dans la diversité des contextes qui viennent d'être rapidement évoqués dans le paragraphe précédent. Envisager des options globales risquerait de mettre en péril des communautés rurales et des territoires agropastoraux qui contribuent dans de nombreuses régions au développement durable de la planète. Il s'agit en particulier de mieux réfléchir aux liens entre la production et la consommation de produits animaux.

3.1. Réinventer des systèmes alimentaires locaux

La croissance démographique est le puissant moteur des dynamiques observées sur les différents continents (voir chapitre 16). Pour nourrir près de dix milliards de personnes en 2050, selon les projections des Nations unies, il sera nécessaire de continuer à augmenter les productions d'origine animale. Cela est d'autant plus vrai que les zones où la population continue de s'accroître rapidement sont précisément celles où les individus, majoritairement pauvres, consomment actuellement très peu de produits animaux et aspirent à consommer davantage de viande, de lait et d'œufs (Afrique subsaharienne, Inde, Asie du Sud-Est, etc.). Pour répondre à cette hausse de la demande en produits animaux, les pays ont à disposition quatre options : augmenter le nombre d'animaux élevés sans modification des systèmes ; intensifier leur production par les méthodes conventionnelles ; importer des produits animaux ; ou intensifier de manière écologique les systèmes. Ces quatre options n'ont pas le même impact sur les émissions de gaz à effet de serre et sur le bilan carbone du secteur de l'élevage (tableau 10.1).

3.2. Encourager les substitutions et la réduction des pertes pour favoriser les filières durables

In fine, il apparaît difficile, voire impossible, de concilier à la fois l'augmentation de l'offre en produits animaux et la limitation des émissions de GES à l'échelle de la planète. Certaines solutions visent à diminuer de façon radicale la place de la viande et du lait dans la consommation humaine. Le développement des filières des protéagineux (soja, pois, haricots, etc.) est aujourd'hui soutenu par des politiques publiques offensives. C'est le cas par exemple du pacte vert pour l'Europe, Green Deal³. Cependant,

3. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr.

substituer de la viande ou du lait par du soja n'est pas toujours une solution acceptable sur le plan environnemental. De façon plus confidentielle, de nouvelles filières tentent de s'installer durablement (élevage d'insectes, production de viande *in vitro*), tout en étant elles-mêmes sujettes à controverses : acceptation par les consommateurs, coût environnemental, mode intensif de production, passage à grande échelle. Au fond, ces solutions dites « alternatives » demeurent fondées sur un modèle intensifié, industrialisé, s'appuyant sur un commerce international de produits en amont comme en aval.

Tableau 10.1. Options de stratégies de développement des productions animales pour répondre à l'augmentation de la demande domestique, et impacts associés sur le changement climatique.

Options	Caractéristiques	Impacts sur le changement climatique
Importer des produits animaux	Logistique (transport maritime de viande, de lait en poudre). Systèmes de production intensifiés et processus de transformation (tours de séchage du lait, réfrigération ou congélation de la viande).	Augmentation de l'empreinte carbone liée au transport et à la déforestation importée.
Augmenter le nombre d'animaux sur le territoire national sans changement des systèmes	Systèmes d'élevage non modifiés. Pour les ruminants au pâturage, atténuation possible par le stockage du carbone, ou dans les sols bénéficiant de fumure animale.	Accroissement des émissions GES (voir chapitre 24). Carbone du sol (voir chapitre 17), augmentation ou diminution en fonction des pratiques.
Intensifier les systèmes d'élevage de manière conventionnelle	Recours accru aux aliments concentrés, à la mécanisation ou à la robotisation, à la standardisation (génétique...), à la production de fumier ou de lisier. Spécialisation des systèmes d'élevage, déconnexion des échanges entre élevage et agriculture. ↓ Espaces pâturés, ↑ utilisation de fourrages et d'aliments cultivés.	Réduction GES par kg de produit liée à l'augmentation de la productivité. Réduction du stockage de carbone dans les systèmes d'alimentation du bétail.
Intensifier les systèmes d'élevage de manière écologique en recourant à l'agroécologie	Développement de systèmes d'élevage agroécologiques. Intensification écologique des systèmes mixtes d'agriculture et d'élevage. Reconnexion des échanges entre élevage et agriculture dans les territoires par la valorisation du fumier, la valorisation des résidus de récoltes, etc. ↑ espaces pâturés, ↑ utilisation de fourrages et d'aliments cultivés.	Réduction des émissions de GES par kg de produit, liée à l'augmentation de la séquestration du carbone par les systèmes mixtes. Augmentation du stockage de carbone dans les systèmes d'alimentation du bétail (parcours et prairies) (Blanfort <i>et al.</i> , 2022). Augmentation du stockage de carbone dans les systèmes de culture.

Une autre option souvent proposée est de limiter en priorité la consommation de viande rouge en la substituant par de la viande blanche ou du poisson, productions *a priori* moins émettrices de GES. Par ailleurs, la consommation excessive de viande rouge est décrite désormais comme problématique pour la santé humaine. Mais là encore, l'augmentation de la production de viande blanche ne remet pas en cause le modèle intensifié et industrialisé, dénoncé pour ses externalités socio-économiques (compétition « *feed-food* », alimentation animale/alimentation humaine) environnementales négatives (importation de la déforestation).

Pour éviter cet écueil, une autre voie est possible, celle de l'agroécologie. Il semble aussi opportun de limiter les pertes et les gaspillages tout au long des filières des produits animaux. À l'échelle mondiale, ils seraient de l'ordre de 15 % pour le lait et pour la viande. Pour plus de la moitié, ce gaspillage proviendrait du maillon de la consommation. Cette valeur est considérable, mais l'économie de ces pertes, complexe à mettre en œuvre, resterait timide face à l'ampleur du défi.

Encadré 10.1. L'élevage dans la bioéconomie circulaire : levier pour réduire les pertes alimentaires et contribuer à la protection de l'environnement

La bioéconomie circulaire offre un potentiel important pour soutenir un développement économique durable intégré aux grands défis mondiaux (sécurité alimentaire, changement climatique, gestion des ressources naturelles dans le cadre des limites planétaires ou encore préservation de la biodiversité). Les leviers pour promouvoir la bioéconomie circulaire sont multiples (Muscat *et al.*, 2021). Ils peuvent consister en l'optimisation des processus ou en la réorganisation des activités humaines et l'émergence de nouvelles formes de coopération entre acteurs locaux.

En tant que moteur majeur des flux de biomasses à différentes échelles, la contribution du secteur de l'élevage à la bioéconomie circulaire est importante en tant que bénéficiaire et en tant que contributeur. Un levier majeur impliquant l'élevage repose sur l'utilisation de ressources qui n'entrent pas en compétition avec l'alimentation humaine (ressources naturelles, sous-produits agricoles, sous-produits issus de la transformation d'aliments ou de biocarburants, déchets alimentaires, etc.) pour l'alimentation ou la litière des animaux. Ces biomasses sont alors converties en matière fertilisante, riche en carbone, matière organique et nutriments à utiliser dans la production végétale ou en aliments pour les humains. Par ailleurs, les coproduits de l'élevage, qu'ils proviennent des systèmes de production ou de la transformation, peuvent également être utilisés comme biomatériaux (cuir, biopolymères, etc.) ou bioénergie (combustion du fumier ou biogaz à partir du fumier).

En favorisant le recyclage des biomasses, ces leviers permettent d'améliorer l'efficacité générale des systèmes alimentaires : d'abord parce qu'ils permettent de réduire les pertes alimentaires en trouvant d'autres modes de valorisation de ces biomasses ; ensuite parce qu'ils réduisent les pertes de carbone et de nutriments vers l'environnement, contributions majeures des systèmes alimentaires au réchauffement climatique et à la pollution des écosystèmes. À La Réunion par exemple, l'efficacité azotée globale du système agri-alimentaire est faible (35 % selon Alvanitakis *et al.*, 2024). Bien que le secteur de l'élevage soit déjà impliqué dans 31 % des flux de biomasses à l'échelle de l'île (Kleinpeter *et al.*, 2023), encourager la circularité de la biomasse autour de l'élevage pourraient permettre d'améliorer cette efficacité de + 42 % (Alvanitakis *et al.*, 2024).

Finalement, manger moins de viande ou de lait pour diminuer le nombre d'animaux élevés, notamment les ruminants, serait-il la seule solution efficace et recevable? Les organismes internationaux tels que la FAO ou l'OMS ne publient plus de recommandations en matière de consommation individuelle de lait ou de viande. Cependant, des chiffres de l'ordre de 100 kg/an/pers. pour le lait et de 30 kg/an/pers. pour la viande circulent encore. Ces chiffres sont largement dépassés dans les pays du Nord (respectivement de l'ordre de 200 et 100 kg/an/pers.). Diminuer la consommation individuelle de lait et de viande dans les zones où elle est excessive permettrait de réduire sensiblement la taille des cheptels et donc des émissions de GES. En revanche, la consommation de produits animaux est globalement en deçà de ces seuils dans la majorité des pays du Sud. La marge de manœuvre pour encourager une diminution de la consommation y est donc fort étroite, voire nulle, et inacceptable sur le plan social et nutritionnel.

4. Conclusion : l'élevage, un problème, mais aussi une solution pour la planète

Les filières animales sont en plein essor dans les Suds. Ces évolutions se traduisent par une augmentation rapide des émissions de gaz à effet de serre, et dans le développement de systèmes de production spécialisés et intensifs, dont l'impact carbone est problématique. Dans les pays développés, ces évolutions sont plus anciennes, et la consommation de produits animaux n'augmente plus. Mais les systèmes continuent à se spécialiser et à s'industrialiser, créant d'autres polémiques sur l'utilisation non durable de ressources comme l'eau (voir chapitres 7 et 18) ou l'énergie (voir chapitre 19), et sur la réduction des fonctions multiples de l'élevage.

Les émissions de méthane sont un point d'achoppement majeur de l'acceptation sociétale du développement de l'élevage. Un nouvel accord mondial sur la réduction des émissions de méthane a été acté lors de la COP26 (Global Methane Pledge) pour réduire les émissions de CH₄ de 30 % à l'horizon 2030 par rapport aux niveaux de 2020; l'agriculture et l'élevage sont concernés, mais seulement comme des secteurs secondaires par rapport à ceux de l'énergie et des déchets (voir chapitre 24). Les dynamiques de stockage de carbone doivent être encouragées par la réinvention de nouvelles synergies territoriales ou par la promotion de systèmes agroécologiques. L'impact de l'essor des productions animales sur le changement climatique doit être analysé au regard de la grande diversité des systèmes impliqués et des solutions associées (voir chapitre 16). Plus qu'une variable d'ajustement des émissions de gaz à effet de serre, l'élevage doit être considéré dans ses multiples fonctions afin de valoriser les potentialités de l'intégration agriculture-élevage (Blanfort *et al.*, 2022).

5. Références bibliographiques

Alary V., Duteurtre G., Faye B., 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. *INRAE Productions Animales*, 24(1), 145–156. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.1.3246>

Alvanitakis M., Kleinpeter V., Vigne M., Benoist A., Vayssieres J., 2024. A substance flow analysis to assess the potential benefits of livestock based circularity for nutrient use efficiency and carbon return to soils in the agro-food-waste system of a tropical island. *Agricultural Systems*, 219:104046, 15 p. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2024.104046>

- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.A., Vayssières J., Vigne M., 2022. L'efficiencia pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. *In* : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds.), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*. Versailles, éditions Quæ, 86-104.
- Blanfort V., Vigne M., Vayssières J., Lasseur J., Ickowicz A., Lecomte P., 2015. Les rôles agronomiques de l'élevage dans la contribution à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique au Nord et au Sud. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 5 (1) : 107-115. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=592032
- de Haan C., Steinfeld H., Blackburn H., 1997. Livestock and the Environment: Finding a Balance. Report of the Commission of the European Communities, the World Bank and the governments of Denmark, France, Germany, The Netherlands, UK and USA.
- Dumont B., Dupraz P., (coord.), 2016. Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Synthèse de l'expertise scientifique collective, INRA, France, 1 048 p.
- Duteurtre G., Assouma M.H., Pocard-Chapuis R., Dumas P., Touré I., Corniaux C., *et al.*, 2019. Climate change, animal product consumption and the future of food systems. *In*: Dury S., Bendjebbar P., Hainzeln E., Giordano T., Bricas N. (eds.). Food systems at risk. New trends and challenges. Cirad, FAO, 39-42. <https://doi.org/10.19182/agritrop/00088>
- FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A. Tempio G., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO, Rome, 115 p.
- Herrero M., Henderson B., Havlik, P., Thornton P.K., Conant R.T., Smith P., *et al.*, 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6, 452-461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- Kleinpeter V., Alvanitakis M., Vigne M., Wassenaar T., Lo Seen D., Vayssières J., 2023. Assessing the roles of crops and livestock in nutrient circularity and use efficiency in the agri-food-waste system: A set of indicators applied to an isolated tropical island. *Resources, Conservation and Recycling*, 188:106663, 13 p. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106663>
- Muscat A., de Olde E.M., Ripoll-Bosch R., *et al.*, 2021. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nat Food* 2, 561-566. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7>
- Richard D., Dourmad J.-Y., Coulon J.B., Picon-Cochard C., 2013. Élevages et filières animales. *In* : Soussana J.-F. (coord.), *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Versailles, éditions Quæ, 296 p.
- Ryschawy J., Disenhaus C., Bertrand S., Allaire G., Aznar O., Plantureux S., *et al.*, 2017. Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *Animal*, 11(10), 1861-1872.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C., 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome, FAO, 414 p.
- Vigne M., Blanfort V., Vayssières J., Lecomte P., Steinmetz P., 2015. Contraintes sur l'élevage dans les pays du Sud : les ruminants entre adaptation et atténuation. *In* : Torquebiau E. (coord.). *Changement climatique et agricultures du monde*. Versailles, éditions Quæ, 123-135.

Chapitre 11

Agriculture, santé et changement climatique : vers une vision « une seule santé »

*Marisa Peyre, Didier Lesueur, Flavie L. Goutard, Alexandre Hobeika,
Alexis Delabouglise, Maxime Tesch, Daan Vink, François Roger*

Les liens entre le changement climatique, d'origine humaine, et l'augmentation de l'incidence des maladies infectieuses ont été démontrés (Romanello *et al.*, 2021; Van de Vuurst et Escobar, 2023). Les publications du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) soulignent les dangers croissants liés au changement climatique, notamment les impacts sur la santé des humains, des animaux et sur l'environnement. L'impact d'autres activités humaines telles que la transformation et la fragmentation des habitats naturels altère également les écosystèmes et favorise la propagation de vecteurs tels que les moustiques qui propagent la dengue, le paludisme et le virus Zika, ou les tiques qui provoquent la maladie de Lyme (Calvin *et al.*, 2023). L'augmentation des températures et les variations de la pluviométrie prolongent les périodes de transmission de ces agents pathogènes et introduisent les maladies notamment vectorielles dans de nouvelles zones (Caminade *et al.*, 2019; De Souza et Weaver, 2024). L'intensification des interactions entre les hommes, les animaux domestiques et la faune sauvage, en lien avec cette dégradation des écosystèmes, entraîne également l'augmentation de la circulation et l'émergence de maladies zoonotiques comme Ebola, SARS-CoV (1 et 2), influenza ou le virus Nipah (Leroy *et al.*, 2009). L'augmentation des vagues de chaleur induit un stress thermique qui accroît les mortalités à la fois humaines et animales, et accentue ces risques d'émergences (Ebi *et al.*, 2021).

Il est aussi documenté que le changement climatique affecte négativement l'agriculture et indirectement la santé humaine (Wheeler et von Braun, 2013). Il met en péril la sécurité alimentaire (sécheresses plus sévères et prolongées, augmentation des crues) et en conséquence contribue à la malnutrition des populations. Les incendies causés par les sécheresses, mais aussi les pratiques de brûlis très fréquentes dans de nombreux pays, combinés à une urbanisation galopante regroupant des populations de plus en plus élevées dans les grandes villes, augmentent la pollution de l'air induisant des affections respiratoires (Tran *et al.*, 2023). L'absence d'accès à l'eau potable et les nombreuses crues engendrent l'augmentation de la circulation de maladies liées à l'eau telles que le choléra ou la leptospirose (Levy *et al.*, 2018). L'ensemble de ces conditions météorologiques extrêmes associées à l'impact des actions humaines sur la nature ont un impact significatif sur l'agriculture et sur la biodiversité renforçant ainsi les dangers pour la santé humaine et animale (Owino *et al.*, 2022). Tout cela cause également des traumatismes psychologiques et

un stress très important augmentant les risques de maladies mentales (Hayes *et al.*, 2018). Comme très souvent, les populations les plus vulnérables sont les premières victimes de toutes ces dérégulations et changements. Le Giec a mis en avant dans ces recommandations l'impératif de favoriser des approches holistiques « une seule santé » pour mieux prendre en compte les effets multifactoriels du changement climatique sur l'agriculture et la santé (animale, humaine et environnementale) pour mettre en place des actions adaptées pour prévenir et limiter les impacts sanitaires globaux (Mahon *et al.*, 2024).

L'objectif de ce chapitre est d'approfondir la compréhension et l'analyse des relations entre le changement climatique, l'agriculture et « les santés » pour favoriser des méthodes agricoles durables respectueuses de la santé humaine, mais aussi de l'environnement, peu pris en compte jusqu'alors (figure 11.1). Son objectif est également d'examiner comment une démarche globale qui prend en considération les interactions complexes entre l'agriculture et les santés animale, humaine et environnementale pourrait efficacement mettre en place des systèmes de production durables sans conséquences négatives pour le climat, mais aussi pour les hommes, la biodiversité et l'environnement (Banerjee et van der Heijden, 2023).

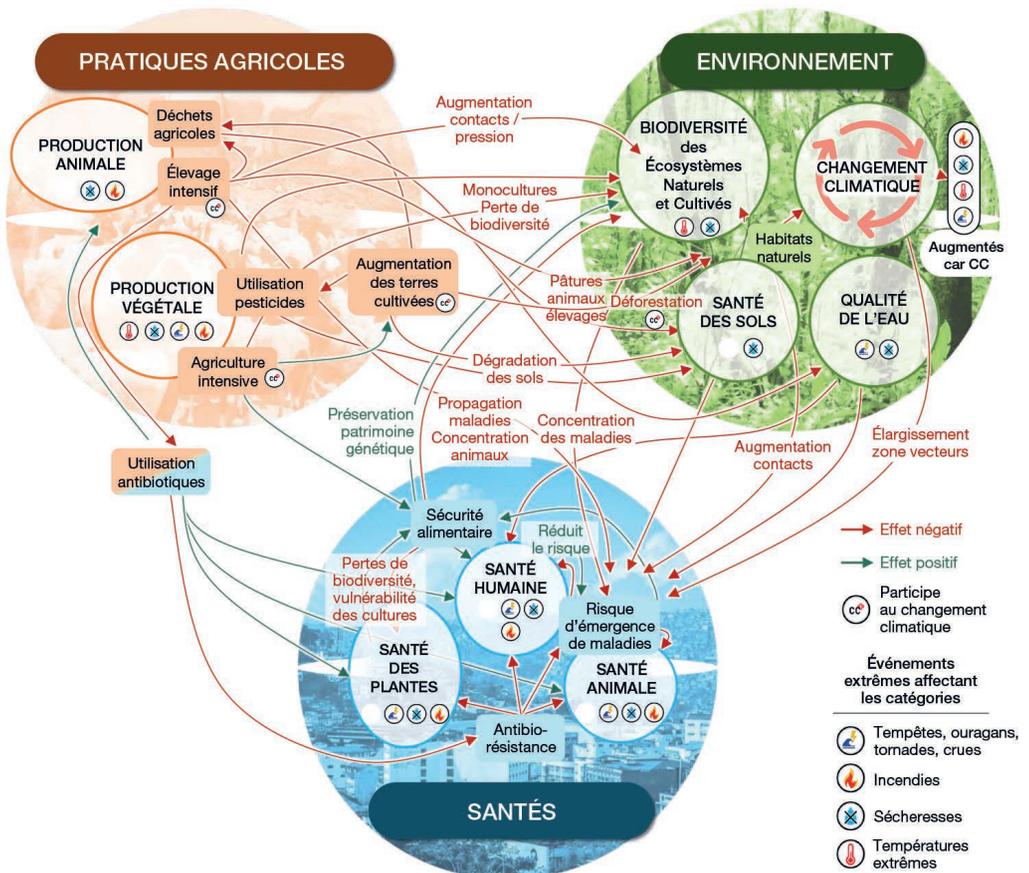


Figure 11.1. Interconnexions entre pratiques agricoles, environnement et santés.

1. L'agriculture, le changement climatique et la santé

Une agriculture saine et durable est essentielle pour la santé humaine. Elle doit fournir des ingrédients sains et à haute valeur nutritive pour l'alimentation des populations, ce qui leur garantit une meilleure santé. Dans le cas contraire, elle peut fournir des aliments contaminés par des résidus chimiques nocifs ou à faible valeur nutritive ou exposés à des intrants chimiques polluants et nocifs pour l'humain et pour les animaux, mettant ainsi leur santé en danger. En 2020, la FAO a montré combien l'agriculture participe directement au changement climatique par le biais des émissions de gaz à effet de serre (GES), liées principalement aux engrais azotés appliqués abusivement (émission de N_2O par exemple), mais aussi par l'élevage intensif qui produit des émissions très importantes de méthane CH_4 (FAO, 2022). L'ensemble de ces phénomènes contribue de manière significative au réchauffement climatique, favorisant la propagation des maladies zoonotiques et transmissibles par les vecteurs (figure 11.1).

Outre les effets directs sur le changement climatique, une agriculture intensive reposant principalement sur l'utilisation d'intrants chimiques pour lutter contre les maladies des cultures, mais aussi sur les antibiotiques donnés au bétail, favorise aussi le développement de résistances des agents pathogènes, rendant par conséquent leur gestion plus complexe et leurs impacts plus importants dans un contexte encore aggravé par les effets du changement climatique (spirale négative) (Gilbert *et al.*, 2017). Classiquement, les pratiques agricoles peuvent être classées selon trois types : les pratiques conventionnelles basées sur des ressources non renouvelables (E), celles intégrant des ressources renouvelables (S) et celles repensant les agroécosystèmes selon les principes de l'agroécologie (R) (Gliessman, 2014; Hill et MacRae, 1996). En santé végétale, les stratégies agroécologiques comme la protection agroécologique des cultures (Deguine *et al.*, 2023) se distinguent par leur faible empreinte carbone, évitant le « gaspillage » des intrants à forte émission de GES (Lamichhane *et al.*, 2015; Wyckhuys *et al.*, 2022). Ces approches, particulièrement les stratégies S et R, sont aussi efficaces pour limiter les risques infectieux, notamment les zoonoses, grâce à la lutte biologique par conservation des habitats (Ratnadass et Deguine, 2021). À l'inverse, les pratiques conventionnelles basées sur l'agrochimie aggravent les résistances aux pesticides, augmentant les risques liés aux vecteurs et aux réservoirs de maladies (paludisme, leptospirose) et aux agents pathogènes fongiques résistants (Ratnadass *et al.*, 2023). Les rodenticides et fongicides triazoles utilisés massivement en agriculture affectent aussi négativement la santé publique et environnementale. Les pratiques S et R, bien qu'imparfaites, réduisent globalement les risques pour les écosystèmes et la santé humaine, tout en augmentant la résilience face au changement climatique. Elles constituent une réponse adaptée pour limiter les résistances antimicrobiennes, réduire les émissions de GES, et renforcer la durabilité des systèmes agricoles face aux défis globaux actuels. C'est en accentuant leur adoption que l'on peut espérer une amélioration de la situation actuelle.

L'impact du changement climatique sur l'agriculture et donc sur la santé est différent si l'on est une femme ou un homme, en raison de leur position au sein des systèmes agri-alimentaires, sanitaires et sociaux. Les femmes sont plus vulnérables face à des événements climatiques extrêmes, car elles sont le plus souvent responsables de la

gestion des ressources naturelles et de la sécurité alimentaire de la famille. Elles ont également un accès limité aux ressources, aux formations ou aux technologies pour y faire face (Lecoutere *et al.*, 2023). Si l'on veut des solutions adaptées et inclusives, il est donc essentiel d'aborder la question du genre dans toutes les initiatives globales, y compris l'approche « une seule santé » (Galiè *et al.*, 2024).

2. Dégradation des écosystèmes naturels et émergences de maladies

2.1. Les pratiques agricoles et les conséquences du changement climatique

Dans leurs quêtes pour trouver de nouvelles terres cultivables, les humains empiètent sur les écosystèmes naturels existants. Cela contribue à intensifier leurs interactions avec les animaux sauvages, dont l'habitat naturel est perturbé par les actions humaines, mais aussi par les effets du changement climatique (sécheresses, incendies, inondations), avec comme conséquence directe un risque accru de propagation de maladies. La déforestation et la transformation des forêts en zones agricoles (agriculture sur brûlis, besoins de terres pour l'agriculture intensive et notamment le soja, etc.) contribuent au changement climatique en limitant les captations de carbone émis dans l'atmosphère et nuisent aux habitats de nombreuses espèces sauvages (Seymour *et al.*, 2022). Ces perturbations rapprochent les humains, les animaux domestiques et la faune sauvage, créant des zones d'interface permettant une transmission inter-espèces et l'émergence de maladies telles qu'Ebola, l'infection à virus Nipah, et les maladies à coronavirus (Magouras *et al.*, 2020).

Les conditions météorologiques extrêmes, comme les périodes de sécheresse ou d'inondation, altèrent la répartition et la disponibilité des ressources agricoles et naturelles et intensifient également les interactions entre les différentes espèces (Bartlett *et al.*, 2022; FAO *et al.*, 2020). La sécurité alimentaire est affectée par ces pertes de production agricole, ce qui favorise dans certaines zones du monde l'augmentation de la consommation de viande et l'élevage intensif d'animaux domestiques (Bonwitt *et al.*, 2018). Cette consommation constitue un risque supplémentaire de transmission interespèce des maladies *via* la manipulation de carcasses ou de produits animaux contaminés ou par leur ingestion dans des conditions de biosécurité limitées (peu ou pas de matériel de protection, cuisson à faible température) (Cornélis *et al.*, 2022). D'autre part, les élevages intensifs, aux conditions de biosécurité limitées, favorisent la transmission et la multiplication des agents pathogènes et augmentent les risques de propagation et d'émergence de maladies animales ou zoonotiques à potentiel pandémique (comme la grippe aviaire) (Delabougliè *et al.*, 2022; Gilbert *et al.*, 2017).

Ces perturbations exercées sur les écosystèmes naturels permettent également une introduction puis une prolifération des parasites vecteurs de ces maladies, en lien avec le réchauffement climatique. Des températures plus élevées augmentent les périodes d'activités et étendent les zones géographiques des moustiques et des tiques, qui sont des vecteurs de nombreuses maladies comme la dengue, le paludisme, la maladie de Lyme, etc. De nouvelles maladies animales, zoonotiques et humaines, telles que les fièvres de la vallée du Rift ou du West Nile, la fièvre hémorragique de Crimée-Congo (FHCC) ou les virus Zika et d'Oropouche, etc. (Anikeeva *et al.*, 2024; Morand et Lajaunie, 2021), émergent ainsi dans de nouvelles zones géographiques.

2.2. Le changement climatique exacerbe la détérioration des sols : un danger pour la santé trop longtemps négligé

L'agroécologie est une pratique qui vise à rendre durable la production agricole tout en préservant l'environnement. Le plus souvent, cela passe par une meilleure santé des sols, qui se matérialise par une importante biodiversité naturelle. La santé des sols est essentielle pour la séquestration durable du carbone, aidant ainsi à limiter le réchauffement climatique tout en assurant des rendements pérennes. Dans une perspective « une seule santé », la santé du sol est centrale, car elle interagit positivement avec la santé des plantes, mais aussi avec celle des animaux et des humains dans un environnement équilibré et sain. Il est donc crucial de mettre en place des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement pour maintenir un équilibre entre la sécurité alimentaire, la santé des écosystèmes et le bien-être général dans un contexte climatique changeant. Pendant de nombreuses années, la santé des sols n'a pas été prise en compte dans la littérature scientifique liée à la santé humaine ou du bétail, mais de plus en plus de travaux montrent qu'elle est centrale et que préserver la santé des sols revient à préserver la santé des hommes (Romano et Zelikoff, 2024; Singh *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023).

3. L'urgence d'une approche intégrée « une seule santé » pour limiter le changement climatique et réduire les risques de pandémies

Après l'épidémie de Covid-19, qui a mis en avant les liens entre le réchauffement climatique et l'accélération de l'émergence de maladies, tous deux liés aux activités humaines y compris agricoles, il est devenu évident que la priorité devait être donnée à une démarche holistique dite « une seule santé » qui prendrait en compte toutes les santés, leurs interconnexions ainsi que les déterminants qui les affectent. Une définition de l'approche « une seule santé », inclusive de l'environnement, a été adoptée à l'échelle internationale (One Health High-Level Expert Panel, Food and Agriculture Organisation of the United Nation, World Health Organisation of the United Nation, Organisation mondiale de la santé animale et l'United Nations Environment Programme) (One Health High-Level Expert Panel *et al.*, 2022). En 2023, la COP28 a pour la première fois intégré dans son programme une journée spécifiquement consacrée aux enjeux sanitaires du réchauffement climatique. La pandémie de la Covid-19 a prouvé que la coopération entre différents secteurs (agriculture, santé animale et humaine, environnement, mais également politiques publiques, économie, social, éducation) est essentielle pour prévenir, se préparer et réagir efficacement aux futures crises (FAO *et al.*, 2022; Sanga *et al.*, 2024), dont la fréquence et le nombre augmentent exponentiellement, comme les événements climatiques extrêmes. Néanmoins, la prise en compte de la prévention et de la réduction des risques reste encore trop limitée et il est important d'agir au plus vite pour que les choses changent positivement (Peyre *et al.*, 2021).

Bien que l'importance de ces problématiques soit reconnue à l'échelle mondiale, le manque d'action subsiste principalement en raison du retard dans l'implication financière et politique¹. Étant donné que les origines du changement climatique et

1. Pandémie: « Financer les actions de prévention est nécessaire pour éviter les prochaines épidémies et limiter les risques climatiques », 2023, 22 juin. *Le Monde*, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/06/22/pandemie-financer-les-actions-de-prevention-est-necessaire-pour-eviter-les-prochaines-epidemies-et-limiter-les-risques-climatiques_6178682_1650684.html.

la survenue des pandémies sont intimement liées par des déterminants communs (impact de l'humain sur la nature), il est impératif de réexaminer les priorités politiques et économiques pour instaurer des mesures concrètes et performantes face à ces menaces globales. Malgré des progrès prometteurs accomplis dans l'agenda climatique international, avec des buts et des responsabilités nationales de plus en plus précis, les mesures tangibles et opérationnelles restent encore trop restreintes. Cette inertie est principalement due au manque de volonté politique et aux logiques économiques dominantes. Par ailleurs, les politiques climatiques sont trop souvent fragmentées et divisées par secteur, ce qui entrave une démarche globale et inclusive. Pour tenter d'harmoniser les stratégies de gestion du climat et de la santé publique, il est impératif de mettre en place une approche « une seule santé », qui visera à accorder les initiatives de lutte contre le changement climatique et de prévention des pandémies.

Dans ce cadre, l'approche de la santé des territoires portée notamment par les approches Socio-Ecological System Health (SESH) et l'approche One Health in Social-Ecological Systems (OHSES) permet de répondre à ces enjeux en apportant une dimension opérationnelle à ces approches intégrées, en lien avec la résilience des systèmes agricoles et de production (De Garine-Wichatitsky *et al.*, 2021 ; Zinsstag *et al.*, 2024). La notion de territoire est un concept complexe englobant des dimensions physiques, sociales, économiques et politiques, défini par ses frontières, qu'elles soient physiques ou symboliques, et par les interactions entre ses composants (voir chapitre 21). Ces interactions sont d'autant plus importantes dans le contexte du changement climatique, qui accentue les pressions sur les écosystèmes territoriaux et modifie les dynamiques socio-écologiques (Wilcox *et al.*, 2019). En mettant l'accent sur l'interdisciplinarité, la résilience et la participation communautaire, ces cadres intègrent les impacts du climat dans la prévention et dans la gestion des maladies (De Garine-Wichatitsky *et al.*, 2021 ; Zinsstag *et al.*, 2024). Ils utilisent également des outils comme la pensée systémique et la modélisation participative pour analyser les interactions dynamiques entre le climat, les écosystèmes et les systèmes humains (Binot *et al.*, 2015 ; Duboz *et al.*, 2018 ; Étienne *et al.*, 2010). Le projet Santé et Territoires illustre cette démarche en promouvant la transition agroécologique dans des *living laboratories* au Sénégal, au Bénin, au Laos et au Cambodge, combinant résilience climatique, santé des sols et systèmes alimentaires durables (Duboz *et al.*, 2018). Cette approche est essentielle pour répondre aux impacts croissants du changement climatique, tout en renforçant la santé et la durabilité des territoires.

4. Conclusion

L'approche « une seule santé » est un instrument crucial pour une meilleure adaptation au changement climatique, en proposant une perspective globale sur la santé des humains, des animaux et de l'environnement. Il est nécessaire de faire face aux maladies infectieuses émergentes zoonotiques ou non, en abordant aussi la gestion des socio-écosystèmes (pratiques agricoles, urbanisation, etc.), la préservation de l'environnement, y compris de la biodiversité et de la santé des sols. Bien que l'approche « une seule santé » gagne en reconnaissance, elle reste encore insuffisamment intégrée dans les politiques nationales et locales. Elle est freinée par une coordination inadéquate entre les secteurs de la santé, de l'agriculture, de l'environnement et des politiques publiques sur le terrain, ce qui empêche une gestion efficace des menaces climatiques et sanitaires.

Par ailleurs, les dispositifs de financement et de gestion, fréquemment fragmentés et inadaptés aux défis globaux, entravent la réalisation pratique de ces stratégies de prévention. Les nations les plus exposées au changement climatique, en particulier celles en développement, manquent de ressources indispensables pour instaurer des dispositifs de prévention efficaces. L'absence de réponses globalement coordonnées aggrave la situation, largement dominée par des mesures réactives plutôt que des mesures préventives. L'approche « une seule santé » se propose pour surmonter ces entraves en favorisant des solutions globales et interdisciplinaires (Olive *et al.*, 2022). Elle promeut l'établissement de synergies entre la santé publique, le contrôle des écosystèmes et l'agriculture durable, en prenant en compte les aspects sociaux et environnementaux des problématiques mondiales. La mise en place de méthodes agricoles durables et résilientes face au changement climatique est essentielle pour préserver un équilibre entre la sécurité alimentaire, la santé des socio-écosystèmes et le bien-être général. L'adoption de l'approche « une seule santé » dans les stratégies globales de lutte contre le réchauffement climatique et les risques sanitaires réduirait à la fois ces risques et améliorerait notre capacité de résistance face à ces crises multiples et simultanées.

5. Références bibliographiques

- Anikeeva O., Hansen A., Varghese B., Borg M., Zhang Y., Xiang J., Bi P., 2024. The impact of increasing temperatures due to climate change on infectious diseases, *BMJ*, 387e079343.
- Banerjee S., van der Heijden M.G.A., 2023. Soil microbiomes and one health, *Nature Reviews Microbiology*, 21(1): 6-20.
- Bartlett H., Holmes M.A., Petrovan S.O., Williams D.R., Wood J.L.N., Balmford A., 2022. Understanding the relative risks of zoonosis emergence under contrasting approaches to meeting livestock product demand, *Royal Society Open Science*, 9(6): 211573.
- Binot A., Duboz R., Promburom P., Phimpraphai W., Cappelle J., Lajaunie C., *et al.*, 2015. A framework to promote collective action within the One Health community of practice: Using participatory modelling to enable interdisciplinary, cross-sectoral and multi-level integration, *One Health*, 144-148.
- Bonwitt J., Dawson M., Kandeh M., Ansumana R., Sahr F., Brown H., Kelly A.H., 2018. Unintended consequences of the 'bushmeat ban' in West Africa during the 2013-2016 Ebola virus disease epidemic, *Social Science & Medicine*, 200: 166-173.
- Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P.W., Trisos C., *et al.*, 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- Caminade C., McIntyre K.M., Jones A.E., 2019. Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1): 157-173.
- Cornélie D., Vigneron P., Vanthomme H., (coord.), 2022. Gabon - Vers une gestion durable de la chasse villageoise. Diagnostic approfondi du département de Mulundu et recommandations stratégiques. SWM Programme. Rome, FAO, Cirad, CIFOR et WCS. <https://doi.org/10.4060/cb9765fr>
- De Garine-Wichatitsky M., Binot A., Ward J., Caron A., Perrotton A., Ross H., *et al.*, 2021. "Health in" and "Health of" Social-Ecological Systems: A Practical Framework for the Management of Healthy and Resilient Agricultural and Natural Ecosystems, *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.616328>
- Deguine J.-P., Aubertot J.-N., Bellon S., Côte F., Lauri P.-E., Lescourret F., *et al.*, 2023. Chapter One - Agroecological crop protection for sustainable agriculture. In: Sparks D.L. (éd.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, 178, 1-59.
- Delabouglière A., Guerin J.-L., Lury A., Binot A., Paul M., Peyre M., *et al.*, 2022. Intensification des systèmes d'élevage et risques pandémiques, *Cahiers Agricultures*, 3116.
- de Souza W.M., Weaver S.C., 2024. Effects of climate change and human activities on vector-borne diseases, *Nature Reviews Microbiology*, 22(8): 476-491.

- Duboz R., Echaubard P., Promburom P., Kilvington M., Ross H., Allen W., *et al.*, 2018. Systems Thinking in Practice: Participatory Modeling as a Foundation for Integrated Approaches to Health, *Frontiers in Veterinary Science*, 5.
- Ebi K.L., Vanos J., Baldwin J.W., Bell J.E., Hondula D.M., Errett N.A., *et al.*, 2021. Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications, *Annual Review of Public Health*, 42: 293-315.
- Étienne M. (coord.), 2010. *La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*, Versailles, éditions Quæ, 384 p.
- FAO, 2022. Greenhouse gas emissions from agrifood systems. Global, regional and country trends, 2000-2020., Rome, 12 p.
- FAO, Cirad, CIFOR, WCS, 2020. Build back better in a post-COVID-19 world – Reducing future wildlife-borne spillover of disease to humans: Sustainable Wildlife Management (SWM) Programme, Rome, 48 p.
- FAO, UNEP, WHO, WOA, 2022. One Health Joint Plan of Action, 2022-2026, Rome, 86 p.
- Galiè A., McLeod A., Campbell Z.A., Ngwili N., Terfa Z.G., Thomas L.F., 2024. Gender considerations in One Health: a framework for researchers, *Frontiers in Public Health*, 12.
- Gilbert M., Xiao X., Robinson T.P., 2017. Intensifying poultry production systems and the emergence of avian influenza in China: a 'One Health/Ecohealth' epitome, *Archives of Public Health*, 75(1): 48.
- Gliessman S., 2014. *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems, Third Edition*, CRC Press, 405 p.
- Hayes K., Blashki G., Wiseman J., Burke S., Reifels L., 2018. Climate change and mental health: risks, impacts and priority actions, *International Journal of Mental Health Systems*, 12(1): 28.
- Hill S.B., MacRae R.J., 1996. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture, *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1): 81-87.
- Lamichhane J.R., Barzman M., Booi K., Boonekamp P., Desneux N., Huber L., *et al.*, 2015. Robust cropping systems to tackle pests under climate change. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2): 443-459.
- Lecoutere E., Mishra A., Singaraju N., Koo J., Azzarri C., Chanana N., *et al.*, 2023. Where women in agri-food systems are at highest climate risk: a methodology for mapping climate-agriculture-gender inequality hotspots, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.
- Leroy E.M., Epelboin A., Mondonge V., Pourrut X., Gonzalez J.-P., Muyembe-Tamfum J.-J., Formenty P., 2009. Human Ebola Outbreak Resulting from Direct Exposure to Fruit Bats in Luebo, Democratic Republic of Congo, 2007, *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 9(6): 723-728.
- Levy K., Smith S.M., Carlton E.J., 2018. Climate Change Impacts on Waterborne Diseases: Moving Toward Designing Interventions, *Current Environmental Health Reports*, 5(2): 272-282.
- Magouras I., Brookes V.J., Jori F., Martin A., Pfeiffer D.U., Dürr S., 2020. Emerging Zoonotic Diseases: Should We Rethink the Animal-Human Interface? *Frontiers in Veterinary Science*, 7.
- Mahon M.B., Sack A., Aleuy O.A., Barbera C., Brown E., Buelow H., *et al.*, 2024. A meta-analysis on global change drivers and the risk of infectious disease, *Nature*, 629(8013): 830-836.
- Morand S., Lajaunie C., 2021. Outbreaks of Vector-Borne and Zoonotic Diseases Are Associated With Changes in Forest Cover and Oil Palm Expansion at Global Scale, *Frontiers in Veterinary Science*, 8.
- OHHLEP, Adisasmito W.B., Almuhairi S., Behraves C.B., Biliogui P., Bukachi S.A., *et al.*, 2022. One Health: A new definition for a sustainable and healthy future, *PLOS Pathogens*, 18(6): e1010537.
- Olive M.-M., Angot J.-L., Binot A., Desclaux A., Dombrevail L., Lefrançois T., *et al.*, 2022. Les approches One Health pour faire face aux émergences : un nécessaire dialogue État-sciences-sociétés, *Natures Sciences Sociétés*, 30(1) : 72-81.
- Owino V., Kumwenda C., Ekesa B., Parker M.E., Ewoldt L., Roos N., *et al.*, 2022. The impact of climate change on food systems, diet quality, nutrition, and health outcomes: A narrative review, *Frontiers in Climate*, 4.
- Peyre M., Vourc'h G., Lefrançois T., Martin-Prevel Y., Soussana J.-F., Roche B., 2021. PREZODE: preventing zoonotic disease emergence, *The Lancet*, 397(10276): 792-793.

Ratnadass A., Deberdt P., Martin T., Sester M., Deguine J.-P., 2023. Impacts of Crop Protection Practices on Human Infectious Diseases, *In: Vithanage M., Prasad M.N.V., One Health: Human, Animal, and Environment Triad*, John Wiley & Sons, 287-308.

Ratnadass A., Deguine J.-P., 2021. Crop protection practices and viral zoonotic risks within a One Health framework, *Science of The Total Environment*, 774, 145172.

Romanello M., McGushin A., Di Napoli C., Drummond P., Hughes N., Jamart L., *et al.*, 2021. The 2021 report of the *Lancet* Countdown on health and climate change: code red for a healthy future, *The Lancet*, 398(10311): 1619-1662.

Romano I., Zelikoff J.T., 2024. Soil health is human health, *Explore*, 20(6): 103047.

Sanga V.T., Karimuribo E.D., Hoza A.S., 2024. One Health in practice: Benefits and challenges of multisectoral coordination and collaboration in managing public health risks: A meta-analysis, *International Journal of One Health*, 26-36.

Seymour F., Wolosin M., Gray E., 2022. Not Just Carbon: Capturing All the Benefits of Forests for Stabilizing the Climate from Local to Global Scales, Washington, World Resources Institute.

Singh B.K., Yan Z.-Z., Whittaker M., Vargas R., Abdelfattah A., 2023. Soil microbiomes must be explicitly included in One Health policy, *Nature Microbiology*, 8(8): 1367-1372.

Sun X., Liddicoat C., Tiunov A., Wang B., Zhang Y., Lu C., *et al.*, 2023. Harnessing soil biodiversity to promote human health in cities, *Npj Urban Sustainability*, 3(1): 1-8.

Tran H.M., Tsai F.-J., Lee Y.-L., Chang J.-H., Chang L.-T., Chang T.-Y., *et al.*, 2023. The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: A review of the current evidence, *Science of The Total Environment*, 898, 166340.

Van de Vuurst P., Escobar L.E., 2023. Climate change and infectious disease: a review of evidence and research trends, *Infectious Diseases of Poverty*, 12(1): 51.

Wheeler T., von Braun J., 2013. Climate Change Impacts on Global Food Security, *Science*, 341(6145): 508-513.

Wilcox B.A., Aguirre A.A., De Paula N., Siriaronrat B., Echaubard P., 2019. Operationalizing One Health Employing Social-Ecological Systems Theory: Lessons From the Greater Mekong Sub-region, *Frontiers in Public Health*, 7.

Wyckhuys K.A.G., Furlong M.J., Zhang W., Gc Y.D., 2022. Carbon benefits of enlisting nature for crop protection, *Nature Food*, 3(5): 299-301.

Zinsstag J., Meyer J.M., Bonfoh B., Fink G., Dimov A., 2024. One Health in human-environment systems: Linking health and the sustainable use of natural resources, *CABI One Health*, 3(1). <https://doi.org/10.1079/cabionehealth.2024.00>

Chapitre 12

Ce que le pastoralisme nous dit du réchauffement climatique

Véronique Ancey, Saverio Krätli, Der Dabire

1. Introduction

1.1. Les définitions sont politiques

Les définitions du pastoralisme tropical ont été produites dans un contexte d'intérêts économiques et de besoins administratifs coloniaux : distinctions selon des gradients de mobilité (nomades, transhumants, sédentaires), d'activité agricole (pasteurs, agropasteurs, paysans) ou d'orientation vers le marché. L'évolution des connaissances scientifiques sur le pastoralisme remet en question ce portefeuille de catégories encore utilisées dans le développement rural et appelle à leur décolonisation (Krätli, 2016; FAO, 2021) ou, moins métaphoriquement¹, à objectiver leur rapport idéologique à l'économie et à l'environnement.

Dans cet esprit, la distinction qui compte ici renvoie à la manière dont les systèmes pastoraux interagissent avec l'environnement. Au prisme des socio-écosystèmes², les « fonctions » pastorales sont-elles optimisées en adoptant l'intégration socio-écologique, en « vivant avec » la nature, ou bien par la mise à distance et l'artificialisation du milieu, dans le but de se protéger contre l'incertitude des conditions naturelles ?

Sous cet éclairage, le pastoralisme est un mode d'existence spécialisé dans l'élevage sur parcours, capable de valoriser la variabilité largement imprévisible des conditions naturelles, et souvent engagé dans des relations productives ou commerciales avec d'autres modes d'existence (FAO, 2021). Les systèmes pastoraux en milieu froid, tempéré ou tropical utilisent la mobilité comme stratégie essentielle, opérable à différentes échelles de temps (quotidienne, saisonnière, pluriannuelle) et d'espace. Ce chapitre concerne les systèmes pastoraux incluant ou non des pratiques de culture à l'échelle de l'économie familiale³.

1. « La décolonisation n'est pas une métaphore » (Tuck *et al.*, 2022).

2. Nous entendons par socio-écosystème (avec Berkes et Folke, 1998) une catégorie créée pour reconnaître que séparer le social et l'écologique n'est jamais vraiment possible en pratique et que, par suite, l'analyse doit tenir compte de cette inévitable intégration.

3. La catégorie « agropastoralisme » introduite dans les années 1970 dans les recherches postcoloniales sur l'élevage des pays dits moins avancés se différencie du pastoralisme par la présence de culture et la sédentarité à l'échelle de l'exploitation. Le haut niveau de durabilité associé à l'intégration de pastoralisme et de cultures peut exister à différentes échelles, y compris entre groupes spécialisés à l'échelle du territoire. L'usage courant du terme *agropastoralisme* ignore cette possibilité et ses réalités sur le terrain, en particulier au Sahel, et considère l'intégration exclusivement à l'échelle de l'exploitation.

L'expression « changement climatique » euphémise les facteurs de risques du dérèglement climatique. Le vocabulaire importe pour cerner le problème avant d'en mesurer les risques : il fait partie du cadrage politique qui distribue — ou efface — les responsabilités. Désigner tout le monde — ou personne — comme responsable du réchauffement climatique participe à dire que celui-ci est inéluctable et insoluble.

Dans la littérature sur le pastoralisme et la résilience, ou la vulnérabilité, les défis « climatiques » sont habituellement distingués des défis « socio-économiques » tels que le manque de services de base, la mauvaise gouvernance ou des politiques adverses. Or, dans la mesure où le réchauffement climatique est provoqué par un modèle économique particulier associé à l'industrialisation et à la course à la croissance, dans l'expression « réchauffement climatique », le terme *climatique* ne veut plus dire « naturel » et, par suite, la distinction entre facteurs climatiques et socio-économiques est trompeuse. Les manifestations climatiques du réchauffement climatique (sécheresses, inondations, événements météorologiques extrêmes) sont tout aussi socio-économiques que l'éclatement d'un barrage mal construit, des fuites polluant l'eau depuis une usine chimique, ou un glissement de terrain frappant une ville à la suite de la déforestation sur les pentes d'une colline. La seule différence est la longueur de la chaîne des causes et des effets que l'on examine.

1.2. Contexte et portée

Ce chapitre se propose de contribuer au dialogue entre science et société sur le dérèglement climatique, à partir du cas du pastoralisme illustré par l'exemple du Sahel, emblématique (1) du contraste historique entre l'importance des systèmes pastoraux dans les territoires et la volonté de forçage technicopolitique vers l'intensification sédentaire (dans les politiques coloniales puis le développement) (Carougeau, 1930; Bocco, 1990); (2) d'un socio-écosystème où l'économie politique du foncier et les droits de mobilité déterminent la possibilité de valoriser la forte variabilité intrinsèque du milieu, exacerbée par le dérèglement climatique (Krätli, 2015); (3) d'une trajectoire d'insertion des États dans l'économie internationale qui les a jusqu'à présent mis en position de récipiendaires des préconisations globales sur le changement climatique⁴ (Losch, 2023).

L'identification des traits fonctionnels⁵ fondamentaux du pastoralisme nous permet de réfléchir sur ce que le pastoralisme peut nous apprendre face au dérèglement climatique, quel que soit le milieu (froid, tempéré ou tropical). Notre réflexion s'appuie sur trois assertions de la littérature spécialisée. Premièrement, les systèmes pastoraux se caractérisent par leur fonctionnement intégré dans la nature. Ils ne sont pas une étape ou un vestige sur la voie de l'intensification de l'élevage. Dans des environnements où la variabilité des ressources fourragères est forte et imprévisible telle qu'observée en milieux arides et subarides, mais aussi en montagne et sur les hauts plateaux (Ellis et Swift, 1988; Behnke *et al.*, 2011), les pasteurs s'ajustent à la variabilité de l'environnement par la variabilité de leur système pastoral, produisant une stabilité relative (Krätli

4. Et ses visions successives : la gouvernance climatique par l'effort collectif partagé mais équitable (article 2 de l'accord de Paris), combinant adaptation et atténuation, diffère du dogme précédent assignant l'adaptation au Sud et l'atténuation au Nord.

5. À la différence des attributs descriptifs, qui varient avec les contextes et les moments : races animales, distance et durée de la transhumance, taux d'alimentation sur parcours, etc.

et Schareika, 2008; Kammili *et al.*, 2011; Meuret et Provenza, 2014; Roe, 2020; Shari-fian *et al.*, 2022; Scoones, 2023). Deuxièmement, la présence globale du pastoralisme, sa durabilité et ses performances relatives nous rappellent que la variabilité de la nature n'est pas en soi une anomalie ou une menace. Les systèmes pastoraux prouvent que la variabilité climatique peut aussi être une ressource. D'autre part, ils nous rappellent qu'aucune protection contre le réchauffement climatique ne viendra de stratégies qui continuent à forcer la stabilité locale en cherchant à maîtriser les fluctuations et les incertitudes sur les facteurs de production, par l'intensification et l'artificialisation du milieu, au prix du dérèglement du climat (FAO, 2021; GIZ, 2022). Troisièmement, les pays du Sud ne sont pas les responsables historiques du déclenchement du réchauffement climatique et la plupart demeurent aujourd'hui des contributeurs négligeables aux émissions de gaz à effet de serre (GES), alors qu'ils affrontent, outre des défis climatiques, une transition démographique inachevée et une faible diversification économique. Par ailleurs, le bilan carbone des systèmes pastoraux en milieux arides et subarides s'avère potentiellement neutre ou même négatif (Assouma *et al.*, 2019), quand la méthode de mesure prend en compte leur intégration dans la nature, se différenciant fondamentalement des modèles dominants de production animale et d'évaluation de l'empreinte carbone centrés sur l'animal isolé de l'environnement (voir chapitres 17 et 21). Cette réalité interroge la pertinence et la priorité des injonctions faites aux pasteurs (et endossées par les États) d'atténuer le changement climatique, qui circulent dans les mondes de l'agriculture et de l'aide au développement (figure 12.1).



Figure 12.1. Une fillette Turkana à la traite du matin, à Lotere, situé à deux jours de marche de Lokiriama vers la frontière ougandaise, dans le district Turkana, au Kenya. Crédit : photo de S. Krätli, 2000.

Ce chapitre propose d'inverser la question : et si ces systèmes pastoraux avaient quelque chose à nous apprendre sur les politiques face au réchauffement climatique ?

La première partie du chapitre situe à grands traits l'évolution des représentations institutionnelles de l'intégration pastoralisme/parcours. La seconde partie liste les facteurs clés permettant ou entravant la résilience des systèmes pastoraux face au réchauffement climatique. En conclusion, nous suggérons pourquoi le cas du pastoralisme intéresse ceux qui réfléchissent sur la durabilité des systèmes sociotechniques en lien avec le vivant, dans un contexte de réchauffement climatique.

2. L'histoire des politiques d'élevage appliquées au pastoralisme, à la lumière du changement climatique

2.1. Histoire de chiffres

Le pastoralisme a historiquement été traité comme d'utilité secondaire dans les politiques sectorielles d'élevage et dans les priorités agricoles, focalisées sur les zones dites utiles et sur les productions à intensifier. Pour des administrations construites autour de référents sédentaires et agraires, le mode d'existence pastoral dispersé, mobile et étroitement dépendant des ressources naturelles était compliqué à contrôler et à transformer. D'ailleurs, les estimations de la taille du cheptel et des populations pastorales dans le monde varient selon les définitions du pastoralisme et les sources utilisées (Pica-Ciamarra *et al.*, 2014; Johnsen *et al.*, 2019). Au minimum, la population vivant de l'élevage « pastoral et agropastoral » dépassait 180 millions de personnes en 2016, présentes dans 75 % des pays (Kieta *et al.*, 2016). Les chiffres officiels sont notoirement reproduits plus ou moins mécaniquement⁶; faute de mieux, compte tenu de l'augmentation démographique au cours des dix dernières années et du fait que la moitié de la surface émergée de la terre est classée en parcours⁷ (ILRI *et al.*, 2021), on peut raisonnablement supposer que le pastoralisme fait vivre des centaines de millions de personnes.

2.2. Récits successifs sur les liens entre pastoralisme, environnement et climat

Au cours des dernières décennies, le rapport du pastoralisme à son environnement a fait l'objet de discours dans plusieurs champs institutionnels, croisant le développement international, la géopolitique subsaharienne ou les politiques sectorielles d'agriculture et d'élevage.

De l'époque coloniale aux premières années d'interventions du développement, dans les années 1960, le pastoralisme a été associé au phénomène de désertification (Davis, 2016), avant que des travaux démontrent qu'en milieux arides le pastoralisme est une solution, non un problème (Swift, 1996). Les capacités des systèmes pastoraux à

6. Les chiffres de 200 à 500 millions repris par les sources relativement récentes extrapolent ceux de 2016 (Maryam Niamir-Fuller, 2016) qui se référaient à une source de 2014 (WISP/UNEP, 2014) incluant les *ranchers* et les zones de conservation. De plus, il faut distinguer les sources sur le pastoralisme et sur l'ensemble des systèmes d'élevage, s'agissant des productions animales et des superficies terrestres cultivées ou non qui sont concernées.

7. Les parcours (*rangelands*) se caractérisent par une végétation indigène d'herbes (*grass*), d'herbacées (*forbs*) et de buissons (*shrubs*) incluant des écosystèmes spontanés. Ils nourrissent des espèces animales domestiques et sauvages broutant et pâturant et accueillent principalement des populations de pasteurs, agropasteurs et *ranchers*. Environ la moitié de la surface de la terre est classifiée comme parcours (ILRI, 2021).

s'accommoder des déséquilibres sont désormais reconnues (Hubert, 2012; Scoones, 2023). Toutefois, la mobilité pastorale reste parfois comprise comme une stratégie d'adaptation dans un environnement hostile, en référence à un optimum qui serait un élevage sédentaire intensif en milieu tempéré et artificialisé. Cette vision hérite de la représentation de la variabilité de la nature comme une anomalie, voire une menace. De même, définir le pastoralisme par l'occupation d'espaces — arides — « où aucune céréale ne pousse » donne implicitement la priorité aux cultures végétales, là où elles sont possibles. En réalité, dans les zones plus humides cultivées, là où les troupeaux pastoraux peuvent séjourner plusieurs mois par an (parfois plus longtemps qu'en zones arides), la fumure des troupeaux et les résidus de récolte créent des bénéfices mutuels aux pasteurs et aux paysans, et transfèrent la fertilité dans le sol. La coexistence et la complémentarité existent là où pasteurs, paysans, autorités coutumières et formelles reconnaissent des droits partagés pour le multiusage des espaces et des ressources.

Dans le champ de la sécurité internationale, depuis les années 2010, une littérature florissante focalisée sur les relations entre le pastoralisme et les conflits a postulé un lien causal entre une dégradation générale des ressources, une vulnérabilité au recrutement terroriste, et une escalade des conflits (agro)pastoraux latents liés à l'accès aux ressources vers des conflits violents à dimension nationale ou régionale. Les études empiriques n'ont pas confirmé cette corrélation (Benjaminsen *et al.*, 2012; Krätli et Toulmin, 2020). Elles montrent en revanche que l'ethnicisation de la question de la crise multifactorielle au Sahel tend à polariser la société entre ceux qui voient dans les pasteurs, en particulier peuls, le principal contingent des groupes djihadistes armés et ces mêmes pasteurs qui se réapproprient cette stigmatisation en justifiant cette situation par la marginalisation sociale et politique dont ils font l'objet depuis l'avènement des États-nations. Les analyses de terrain convergent pour voir dans la crise politique et sécuritaire au Sahel une crise de la gouvernance rurale à forte composante pastorale (Rangé *et al.*, 2020).

L'histoire a montré les limites des orientations politiques transposées aux systèmes pastoraux et reposant sur la sédentarisation : coupure avec l'environnement, mise à l'échelle de pratiques standards, spécialisation des espaces, « rationalisation » technique orientée vers le marché, appropriation exclusive (encadré 12.1). Aujourd'hui, le réchauffement climatique nous en montre les risques pour l'avenir, bien au-delà des systèmes pastoraux.

2.3. Comment les politiques environnementales et le réchauffement climatique se manifestent-ils en milieu pastoral ?

2.3.1. Distinguer la variabilité, le réchauffement climatique et ses facteurs en milieu pastoral

Le pastoralisme s'est constitué avec son milieu; or la variabilité spatio-temporelle des pluies — donc de la concentration des nutriments — est constitutive des zones arides et subarides. Le coefficient de variation de pluviosité annuelle (écart-type/moyenne) s'est toujours situé autour de 30%. Une période très humide a été identifiée entre 1950 et 1968, une période très sèche, entre 1972 et 1995. La période actuelle depuis 1996 est plus arrosée mais de manière irrégulière, proche du profil d'avant les années 1930. En plus de cette hétérogénéité temporelle, le caractère orageux des précipitations dû à la mousson induit une forte hétérogénéité spatiale : sur une année, les précipitations cumulées peuvent varier considérablement à 20-30 km de distance (Ancey et Ickowicz, 2015).

Encadré 12.1. La question foncière : ressources, relations sociales et rôle de l'État

Les espaces pastoraux se distinguent par des zones de regroupement (autour des infrastructures, à proximité des agglomérations) liées à des droits d'accès autorisés, exclusifs collectifs ou individuels, et des espaces de parcours en accès libre, autorisés, ou exclusifs collectifs (les limites spatiales et les droits peuvent évoluer) (Lavigne Delville *et al.*, 2022; Moritz, 2016). Une part décisive de la sécurisation des systèmes pastoraux tient à l'équilibre entre leur ancrage foncier (à travers les faisceaux de droits reconnus) et leur capacité de mobilité (Ancey *et al.*, 2020). La reconnaissance de ces pratiques et des droits coutumiers pastoraux d'accès partagé aux pâturages et aux points d'eau, leur réalité, leurs effets potentiels sur les ressources et sur les organisations sociales qui les activent, leur durabilité, ont alimenté une abondante littérature au Nord comme au Sud, et d'innombrables controverses (Dell'Angelo *et al.*, 2017; Eggertsson, 2009). Elles font l'objet de recommandations institutionnelles (FAO, 2012; Davies *et al.*, 2018). Toutefois, l'expérience montre que reconnaître des terres communes comme un type d'espace, sans reconnaître les droits qui y sont associés (pâturage, cueillette) entre les humains, ne suffit pas à protéger les moyens d'existence pastoraux. En effet, une terre classée comme commune ou partagée est juste une terre qui n'est pas encore privatisée, et peut être vendue comme une autre. Les pasteurs ne les classent pas pour le marché, mais comme un ensemble fonctionnel à leur mode d'existence, en y intégrant ressources, pratiques et droits. Ainsi, au Ferlo sénégalais, un « bon endroit » (*modji jofde*) est défini par les pasteurs par un ensemble de qualités de l'herbe (diversité, qualités nutritives, abondance), du sol, de l'air, par l'absence de parasites, par la sécurité d'accès et la tranquillité (Ancey et Diao, 2004). L'enjeu est de considérer la terre commune associée à un droit *in rem* (pâture, produire de la viande, du lait ou de la laine, en vivre). Dans les territoires colonisés, les droits coutumiers associés aux parcours ont le plus souvent été gommés sans débat par les administrations coloniales. Par comparaison, en Europe où les « communaux* » ont également été considérés au XVIII^e siècle comme des freins aux processus de modernisation, les politiques d'enclosure et de suppression des droits d'usage sur les terres agricoles ont donné lieu à des luttes du monde rural contre le démantèlement des communaux et la privatisation (Vern, 2021; Vivier, 2003). En Afrique subsaharienne, l'extensification des superficies cultivées au détriment des pâturages et des jachères s'est accompagnée d'une fragmentation parcellaire qui isole les pâturages dont l'accès nécessite plus de précautions, un gardiennage plus serré des troupeaux et plus de négociation par les pasteurs (Sambo *et al.*, 2022). Depuis les années 1990-2000, certains pays ont apporté des réponses institutionnelles par l'élaboration de codes pastoraux, mais ces derniers n'ont pas abouti à la sécurisation des espaces agropastoraux (Bonnet, 2013).

* Le terme peut désigner au sens strict des terres non cultivées — forêts, pâturages, landes — appartenant à une communauté villageoise ou au seigneur et faisant l'objet d'usages partagés; et des droits d'usage sur des terres privées, champs ou forêts (glanage, vaine pâture, etc.) (Béaur, 2006).

Depuis 2004, l'augmentation des pluies par rapport à la moyenne de la période 1971-2000 se traduit sur les cartes par une « remontée des isohyètes », mais ces tendances ne sont pas claires. La remontée des isohyètes et les accroissements concomitants de production de biomasse observés amènent certains auteurs à mentionner un « reverdissement du Sahel » (Bégué *et al.*, 2011). Cependant, les prévisions climatiques ne sont pas aussi sûres, compte tenu de la complexité du régime de la mousson africaine.

Les modèles sont encore contradictoires (Hiernaux et Soussana, 2011). À la fin des années 2000, certains prévoient un accroissement des températures de 1,8°C à 4°C, en insistant toutefois sur le fait que les différences locales masquent les tendances globales et que les changements principaux pourront être des événements extrêmes comme des stress thermiques, des sécheresses ou des inondations (Thornton *et al.*, 2009).

2.3.2. Apparition tardive et limitée du pastoralisme dans les négociations internationales sur le climat : les enjeux d'atténuation pour le pastoralisme, un non-problème ?

Dans l'histoire des négociations internationales sur le climat, l'élevage a été inscrit pour la première fois sur l'agenda des négociateurs en 2017, sous le manteau de l'agriculture⁸ (voir chapitre 2). Exclu du texte initial de la décision 4/CP.23, le pastoralisme a été ajouté plus tard en mai 2018 sous le terme *systèmes agropastoraux* à la première session de l'organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique (SBSTA) du secrétariat permanent de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Dans le contenu de ces décisions internationales, le pastoralisme a été traité sous deux angles : l'amélioration des systèmes d'élevage et leur contribution à la durabilité des systèmes agricoles (stockage du carbone dans les sols, santé et fertilité des sols, recyclage des nutriments et gestion des effluents) (SP/CCNUCC, 2017). Cette approche réunit les objectifs des politiques dites d'atténuation et d'adaptation.

Pour mémoire, la contribution de l'élevage aux émissions agricoles de GES varie considérablement selon les régions, les systèmes et les pratiques, mais elle est communément admise comme significative (14,50 % des émissions globales) (Gerber *et al.*, 2013) (encadré 12.2).

Encadré 12.2. Le cas du Burkina Faso : dans les politiques sectorielles affectant le pastoralisme, construire « un pastoralisme respectueux de l'environnement »

Au Burkina Faso, les émissions de GES proviennent à 90,60 % du secteur AFOLU (agriculture, foreries, et autres utilisations des terres) en général, dont 15,57 % du secteur de l'élevage (SPCNDD, 2022). Mais en regard de ces statistiques, le Burkina Faso ne contribue aux émissions mondiales de GES, selon les sources, qu'à hauteur de 0,02 % (Our World in Data, 2022) ou 0,07 % (IEA-EDGAR, 2022). Une diminution spectaculaire de 50 % des émissions totales du Burkina réduirait donc les émissions globales de... 0,01 %; moins, s'agissant du pastoralisme, inclus dans l'élevage, inclus dans l'agriculture.

La politique sectorielle d'élevage au Burkina Faso se centre sur l'augmentation de la production, en raison de la question prégnante de la sécurité alimentaire sur l'agenda, et accessoirement sur la réduction des émissions de gaz. Malgré tout, la dimension environnementale n'est pas absente des programmes nationaux d'appui

8. À travers les décisions 4/CP.23 de la COP23 et décision-/CP.27 de la COP27, instituant respectivement l'action commune de Koronivia pour l'agriculture (SP/CCNUCC, 2017) et l'initiative quadriennale commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire (FCCC/CP/2022/L.4).

Encadré 12.2. (suite)

au pastoralisme. La préoccupation d'un pastoralisme durable est affichée dans la loi d'orientation relative au pastoralisme au Burkina Faso (loi n° 034-2002/an) depuis 2002 et dans la loi d'orientation agro-sylvopastorale, halieutique et faunique (loi n° 070-2015/CNT) depuis 2015; et elle est aussi inscrite dans la vision de la politique « production agro-sylvopastorale, halieutique et faunique » depuis 2018 sous l'expression d'un élevage « respectueux de l'environnement ». Concrètement, les actions portent sur : des sensibilisations de routine sur le pâturage tournant pour éviter le surpâturage et améliorer la qualité des repousses; la récupération et la valorisation des terres dégradées aux fins pastorales; la promotion des parcs agrofouregers (cultures fourragères annuelles et arbustives), la fauche et la conservation des herbes de parcours pour réduire la pression des animaux sur l'environnement; la promotion du biodigesteur pour le recyclage des effluents d'élevage en énergie de cuisson et en fumier pour les champs (depuis 2010) et la réalisation obligatoire d'études d'évaluation de l'impact environnemental des installations pastorales telles que les fermes d'élevage, les parcs de vaccination, les points d'eau et les abattoirs (depuis 2017).

Dans la mise en œuvre de ces actions, il est recommandé aux populations agropastorales de réduire les effectifs du cheptel, de faire des reboisements à partir des plants mis à leur disposition par les services de l'environnement; de pratiquer les cultures fourragères à partir des semences distribuées par les services d'élevage; de faire des réserves fourragères (fauche et conservation de l'herbe des parcours, collecte des résidus de récoltes) en utilisant les équipements distribués par les services d'élevage et de construire des fosses fumières.

Ces mesures révèlent une certaine conscience des contraintes et problèmes pesant sur le pastoralisme. Toutefois, concernant l'environnement, l'imaginaire collectif des services techniques voit un pastoralisme dégradant l'environnement et émetteur de GES. Dans ce contexte, construire un « pastoralisme respectueux de l'environnement » passe par le changement des pratiques des pasteurs. C'est du reste le ministère de l'Environnement qui pilote ces actions, à travers le Bureau national des évaluations environnementales. Étant donné la dimension infime des bénéfices éventuels attendus de la réduction des GES par l'agriculture, l'élevage et le pastoralisme au Burkina Faso, on peut se demander quels sont les réels moteurs des efforts affichés*.

* Pour plus d'information, voir le projet Cassecs, projet de recherche et développement en soutien à l'innovation pour la résilience des élevages pastoraux et agropastoraux dans les pays sahéliers, financé par le programme européen Desira.

3. Les facteurs clés permettant ou entravant la résilience des systèmes pastoraux face au réchauffement climatique

Pour expliquer comment le dérèglement climatique affecte les populations des systèmes pastoraux, nous distinguons trois dimensions dont deux sont déjà visibles et une est de plus en plus probable.

Premièrement, les populations pastorales subissent les conséquences des mesures prises par des groupes plus puissants pour se protéger contre la menace du dérèglement climatique : la ruée géopolitique sur les ressources potentielles. Dans certains cas, celle-ci se fait sous couvert des mesures d'adaptation et d'atténuation, en fermant

des terres de parcours au profit de mines et de production d'énergie censées verdir les économies nationales. D'autres populations rurales que les pasteurs se trouvent dans une position similaire.

Deuxièmement, les populations pastorales supportent les conséquences du dérèglement climatique à travers une variabilité imprévisible inédite dans le contexte. Bien que non prévisible d'une année sur l'autre, la variabilité des conditions naturelles s'exprimait au sein de spectres familiers; à présent, ces spectres eux-mêmes changent. L'épreuve des changements s'amplifie encore avec les obstacles opposés à la stratégie principale des pasteurs pour accéder à des ressources qui varient de manière imprévisible dans le temps et l'espace : la mobilité. Moins les pasteurs peuvent se déplacer avec leurs troupeaux, plus ils sont susceptibles de se trouver en conditions de « sécheresse », ce qui pour eux signifie avant tout le manque d'accès aux ressources en pâturage.

Troisièmement, si le réchauffement dépasse +1,5°C en température globale moyenne, la probabilité de déclencher un ou plusieurs points de bascule du système terrestre s'accroît fortement (Lenton *et al.*, 2023). En cas d'emballement, nous devrions parler de survie plutôt que de résilience; toutefois, face à une catastrophe globale, les populations pastorales ne sembleraient pas dans la pire des positions grâce aux caractéristiques citées plus haut.

Pour discuter les facteurs clés de la résilience des systèmes pastoraux face au réchauffement climatique, cette section se centre sur les deux premières dimensions citées. Six facteurs sont brièvement présentés.

1. Face à une variabilité climatique croissante, la principale source de la résilience pastorale est la spécialisation fondée sur des formes institutionnelles spécifiques. La logique d'intégration et d'adaptation de la production alimentaire dans des environnements naturels très variables se fait avec les conditions naturelles, plutôt qu'en cherchant à s'en protéger en créant des environnements artificiellement stables. Cet aspect caractéristique des interactions entre humains, animaux et milieu dans les systèmes pastoraux converge fondamentalement avec les principes de l'agroécologie, que de nombreux scientifiques voient comme une voie nécessaire à la fois pour l'adaptation et pour l'atténuation face au dérèglement climatique (FAO, 2021).

2. En maintenant la grande flexibilité du système de production lui-même, les systèmes pastoraux adoptent des stratégies de production et des processus opérationnels assez souples pour correspondre à la variabilité des intrants du milieu naturel. La reconstitution annuelle des parcours, la qualité nutritive des ressources utilisées par les troupeaux sont soumises à la variabilité intrinsèque au milieu : variabilité temporelle (jour/nuit; saisonnière; pluriannuelle), et spatiale (entre écosystèmes, facettes de paysages, plantes et même entre différentes parties de la même plante). Les pasteurs sont mieux préparés à être surpris — une stratégie de plus en plus importante face à une variabilité exacerbée et désordonnée par le dérèglement climatique.

3. La mobilité stratégique est l'exemple le plus évident de plasticité systémique du pastoralisme. Elle permet également aux pasteurs de minimiser leur exposition à la sécheresse et à d'autres facteurs de stress. La mobilité est cruciale pour la durabilité écologique et économique du pastoralisme, et pour la résilience de systèmes socio-économiques plus vastes incluant les interactions entre le pastoralisme et les systèmes de production de céréales, les agglomérations et les marchés (Corniaux *et al.*, 2016).

4. Les cheptels pastoraux ont un niveau de biodiversité exceptionnel, incluant la diversité génétique (entre plusieurs espèces dans un troupeau et intraspécifique) et épigénétique⁹. Combinées avec les stratégies pastorales de gestion de troupeau et en particulier la mobilité, ces formes complexes de biodiversité donnent des systèmes d'élevage qui imitent les interactions entre animaux et le milieu des ruminants sauvages. Ce sont aussi les clés de la neutralité carbone estimée de ces systèmes (faible ingestion, adaptation aux variations de ressources) (voir chapitre 24).

5. Les réseaux ruraux et urbains plus ou moins éloignés de parents et d'amis contribuent aux liens au sein et à l'extérieur des communautés et facilitent les mobilités (routinières ou exceptionnelles). D'où l'enjeu de l'intégration du pastoralisme dans les politiques nationales (accompagnement des jeunes, infrastructures de services décentralisées, reconnaissances des droits fonciers pastoraux coutumiers) et régionales (transects transfrontaliers de parcours et de commerce) (Thébaud, 2017; Davies *et al.*, 2018; Sourisseau et Ancey, 2021).

6. L'organisation sociale coutumière et les institutions dans les zones arides, quand elles se fondent sur l'inclusion, et une combinaison de prises de décisions individuelles et collectives quant à la gouvernance des ressources naturelles gardent des options ouvertes en ce qui concerne l'accès aux pâturages et à l'eau (Thébaud, 2017; Davies *et al.*, 2018) (figure 12.2).

Au long de l'histoire du développement pastoral, les systèmes pastoraux ont souvent été représentés aux prises avec un milieu naturel hostile. On s'attend à ce que ce même environnement devienne encore plus hostile avec l'accroissement de la variabilité climatique. C'est pour cette raison que les populations pastorales figurent souvent sur la liste des groupes les plus vulnérables au dérèglement climatique, en particulier en



Figure 12.2. Le troupeau quitte le campement à l'aube pour la journée, dans le district de Moroto, de la région Karamoja, dans le nord-est de l'Ouganda. Crédit : photo de S. Krätli, 2000.

9. L'expression des gènes, sans modification d'ADN, combinant des comportements hérités et rapidement adaptables et des performances en lien avec le milieu : aptitudes à se nourrir, à s'abriter de la chaleur, connaissance du territoire, attachement à l'éleveur; comportements complexes composant la *culture animale* (Krätli, 2023; Provenza, 2008; Landau et Provenza, 2020).

comparaison avec l'agriculture intensive. Mais la résilience de l'agriculture intensive à la variabilité climatique dépend de la création et de l'entretien d'environnement artificiellement stables, au prix d'un réchauffement global croissant. En comparaison, la résilience pastorale entretenue en symbiose avec un environnement variable semble fragile, mais au moins elle ne fait pas courir au monde le risque d'un emballement climatique (GIZ, 2022).

4. En conclusion, les leçons du pastoralisme face au dérèglement climatique

La leçon majeure du pastoralisme face au dérèglement climatique est qu'une variabilité imprévisible des conditions naturelles n'est pas en soi problématique. C'est pourquoi mettre la production agricole à l'abri d'un environnement artificiel n'est pas une nécessité : c'est un choix fait par une partie de l'humanité à un moment de l'histoire ; et c'est seulement depuis cette perspective que la variabilité imprévisible de la nature devient un problème en soi... Le pastoralisme montre qu'un choix différent, conduisant à d'autres ensembles de stratégies de production, peut convertir la variabilité climatique en ressource de valeur pour la production alimentaire.

L'observation du pastoralisme aide à apprécier les conditions de résilience en général face au réchauffement climatique, puisque l'approche « moderne » traditionnelle est rendue obsolète par ses conséquences en matière de dérèglement climatique.

Le cas du pastoralisme démontre l'anachronisme des stratégies actuellement considérées comme sources de résilience au changement climatique — basées sur l'artificialisation de l'environnement pour protéger certains systèmes humains contre la variabilité du climat.

Pour comprendre l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes où existe le pastoralisme, il faut observer les territoires d'attachement et de déplacement des bêtes, des migrations des gens et des échanges économiques (Corniaux *et al.*, 2016). L'approche territoriale va plus loin en complétant la prise en compte de l'intégration entre les systèmes par l'analyse au niveau politique de la décentralisation, par exemple (Sourisseau et Ancy, 2021).

Faute de tirer les conséquences des observations ci-dessus, la résilience climatique des pasteurs continuera à être mise à rude épreuve par divers facteurs de stress, notamment les politiques de sédentarisation, la réduction et la fragmentation des zones pastorales traditionnelles et une gouvernance foncière inappropriée. Au-delà, s'agissant des systèmes alimentaires et des politiques à la base de l'alimentation de la population mondiale, le fonctionnement du pastoralisme ouvre des pistes pour concevoir les changements systémiques nécessaires face au dérèglement climatique.

5. Références bibliographiques

Ancy V., Dia Camara A., 2004. L'information sur les ressources naturelles en milieu pastoral : le secret des « modji jofde », les bons endroits. Communication au XI world Congress of rural sociology, Trondheim, Norway, July 25-30, 2004.

Ancy V., Ickowicz A., 2015. Les points d'eau pastoraux au Sahel : au cœur des pratiques des pasteurs et du développement des territoires. In : Lepart J. (coord.), *Leau des troupeaux en alpages et sur parcours : une ressource à gérer, aménager, partager*. Association Française de Pastoralisme, Cardère éd., 61-72.

- Ancey V., Rangé C., Magnani S., Patat C., 2020. Jeunes pasteurs en ville – Synthèse finale. Accompagner l'insertion économique et sociale des jeunes pasteurs – Tchad et Burkina Faso. Rome, FAO.
- Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162: 62-73.
- Béaur G., 2006. En un débat douteux. Les communaux, quels enjeux dans la France des XVIII^e-XIX^e siècles? *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 3 (1) : 89-114.
- Bégué A., Vintrou E., Ruelland D., Claden M., Dessay N., 2011. Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach, *Global Environmental Change*, 21(2):413-420. <https://www.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.02.002>
- Behnke R., Fernandez-Gimenez M.E., Turner M., Stammler F., 2011. Pastoral migration: mobile systems of livestock husbandry. In: Milner-Gulland E.J., Fryxell J.M., Sinclair A.R.E. (eds), *Animal Migration: A Synthesis*, Oxford University Press.
- Berkes F., Folke C. (eds), 1998. Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience, Cambridge Univ. Press, 476 p.
- Bocco R., 1990. La sédentarisation des pasteurs nomades : les experts internationaux face à la question bédoouine dans le Moyen Orient arabe (1950-1970), *Cahiers des Sciences Humaines*, 26 (1-2): 97-117.
- Bonnet B., 2013. Vulnérabilité pastorale et politiques publiques de sécurisation de la mobilité pastorale au Sahel. *Mondes en développement*, 164(4), 71-91. <https://doi.org/10.3917/med.164.0071>.
- Carougeau J., 1930. Méthodes à préconiser pour augmenter et améliorer l'élevage colonial français, *L'Agronomie coloniale*, 19 (150): 161-169.
- Corniaux C., Ancey V., Touré I., Camara A., Cesaro J-D., 2016. La mobilité pastorale, un enjeu sahélien devenu sous-régional. In : Pesche D., Losch B., Imbernon J. (dir.), Atlas pour le Programme Rural Futures du NEPAD, deuxième édition revue et augmentée, Montpellier, Cirad, NEPAD, 60-61.
- Davies J., Ogali C., Slobodian L., Roba G., Ouedraogo R., 2018. Crossing boundaries: legal and policy arrangements for cross-border pastoralism. FAO.
- Davis D.K., 2016. *The Arid Lands. History, Power, Knowledge*, The MIT Press, 296 p.
- Dell'Angelo J., D'Odorico P., Rulli M.C., Marchand P., 2017. The tragedy of the grabbed commons: Coercion and dispossession in the global land rush. *World Development*, 92: 1-12.
- Eggertsson T., 2009. Hardin's Brilliant Tragedy and a Non-Sequitur Response. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(3): 265-268.
- Ellis J.E., Swift D.M., 1988. Stability of African ecosystems: alternate paradigms and implications for development. *Journal of Range Management*, 41 (6): 450-459.
- FAO, 2012. Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests.
- FAO, 2021. Pastoralism – Making Variability Work. FAO Animal Production and Health Paper No. 185. <https://doi.org/10.4060/cb5855en>
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., et al., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO, Rome.
- GIZ, 2022. Pastoralism and Resilience of Food Production in the Face of Climate Change. Technical background paper, Saverio Krätli et al., 20 p.
- Hiernaux P., Soussana J.F., 2011. Les changements climatiques et leurs impacts attendus en régions chaudes. In : Actes du séminaire Élevage et Environnement en Régions Chaudes. Point sur les controverses, Méthodologies d'étude, Pistes de recherche, Inra-Cirad, Sète 6-10 juin 2011 :8-12.
- Hubert B., 2012. Préface. In : Toutain B., Marty A., Bourgeot A., Ickowicz A., Lhoste P., *Pastoralisme en zone sèche. Le cas de l'Afrique subsaharienne*. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France, 60 p.
- IEA-EDGAR, 2021. Emissions Database for Global Atmospheric Research. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024#emissions_table, consulté 5 mars 2025.
- ILRI, IUCN, FAO, WWF, UNEP and ILC. 2021., Rangelands Atlas. Nairobi Kenya: ILRI.

- IEA-EDGAR, 2022. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023#:~:text=all%20world%20countries-,Main%20findings,61.6%25%20of%20global%20GHG%20emissions.
- Johnsen K.I., Niamir-Fuller M., Bensada A., Waters-Bayer A., 2019. A case of benign neglect: Knowledge gaps about sustainability in pastoralism and rangelands, UNEP and GRID-Arendal.
- Kammili T., Hubert B., Tourrand J.F., 2011. A paradigm shift in livestock management: from resource sufficiency to functional integrity, 28-29 June 2008, Hohhot, China. Ed. de la Cardère, 272 p.
- Kieta N., Kvinikadze G., Pica-Ciamarra U., Bourn D., Honhold N., Georgieva N., Bako D., 2016. Guidelines for the Enumeration of Nomadic and Semi-Nomadic (Transhumant) Livestock. Rome, FAO.
- Krätili S., 2015. Valuing variability: new Perspectives on climate resilient drylands development. IIED. <https://www.iied.org/10128iied>
- Krätili S., 2016. Discontinuity in pastoral development: time to update the method. *OIE Scientific and Technical Review*, 35(2): 485-497.
- Krätili S., 2023. Issues of Declining Livestock Breeds: Revisiting Domestic Animal Diversity in Pastoral Systems. *Pastures & Pastoralism*, 1, 1-14.
- Krätili S., Schareika N., 2010. Living Off Uncertainty: The Intelligent Animal Production of Dryland Pastoralists. *Eur J Dev Res*, 22, 605-622. <https://doi.org/10.1057/ejdr.2010.41>
- Landau S.Y., Provenza F.D., 2020. Of browse, goats, and men: Contribution to the debate on animal traditions and cultures. *Applied Animal Behaviour Science*, 232.
- Lavigne Delville P., Ancey V., Fache E., 2022. Communs et gouvernance des ressources en accès partagé. In : Colin J-P, Lavigne Delville P., Léonard E. (eds), *Le foncier rural dans les pays du Sud : enjeux et clés d'analyse*, IRD, éditions Quæ, 177-255.
- Lenton T.M., Armstrong McKay D.I., Loriani S., Abrams J.F., Lade S.J., Donges J.F., et al. (eds), 2023. The Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter, UK.
- Losch B., 2023. Chapitre 71. Trajectoires d'Afrique subsaharienne : pluralité, spécificités et asynchronies dans la mondialisation. In : Boyer R., Chanteau J.P., Labrousse A., Lamarche T. (coord.), *Théorie de la régulation : Un nouvel état des savoirs*. Dunod, 585-591. <https://doi.org/10.3917/dunod.boyer.2023.01.0584>
- Meuret M., Provenza F. (eds), 2014. *The Art and Science of Shepherding. Tapping the Wisdom of French Herders*. Austin, Acres U.S.A., 432 p.
- Moritz M., 2016. Open property regimes. *International Journal of the Commons*, 10(2): 688-708. <https://doi.org/10.18352/ijc.719>
- Our World in Data, 2022. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>; <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions?insight=there-are-large-differences-in-emissions-across-the-world#key-insights>
- Pica-Ciamarra U., Baker D., Morgan N., Zezza A., Azzarri C., Ly C., et al., 2014. Investing in the Livestock Sector. Why Good Numbers Matter. A Sourcebook for Decision Makers on How to Improve Livestock Data, World Bank Report Number 85732-GLB, The World Bank, Washington.
- Provenza F.D., 2008. What does it mean to be locally adapted and who cares anyway? *Journal of Animal Science*, 86: E271-E284.
- Rangé C., Magnani S.D., Ancey V., 2020. « Pastoralisme » et « insécurité » en Afrique de l'Ouest : Du narratif réifiant à la dépossession politique. *Revue internationale des études du développement*, 243, 115-150.
- Roe E., 2020. A New Policy Narrative for Pastoralism? Pastoralists as Reliability Professionals and Pastoralist Systems as Infrastructure, STEPS Working Paper 113, IDS, Brighton.
- Sambo N., Sayadi Abdou C., Clochard O., 2022. Transhumance transfrontalière dans l'espace CEDEAO. Migreurop, Casella Colombeau S. (dir), *Atlas des migrations dans le monde. Libertés de circulation, frontières et inégalités*, Armand colin, 64-65.
- SP/CCNUCC, 2017. Rapport de la Conférence des Parties sur sa vingt-troisième session. SP/CCNUCC, Bonn, 38 p.

SP/CCNUCC, 2022. Rapport de la Conférence des Parties sur sa vingt-septième session. Décision 3/CP.27 : Initiative commune de Charm el-Cheikh sur la mise en œuvre d'une action climatique pour l'agriculture et la sécurité alimentaire. SP/CCNUCC, Bonn, 41p.

SPCNDD, 2022. Troisième communication nationale sur les changements climatiques. Ouagadougou, MEEA/SPCNDD, 268 p.

Scoones I. (ed.), 2023. *Pastoralism, Uncertainty and Development*, Practical Action Publishing, 180 p. <https://doi.org/10.3362/9781788532457>

Sharifian A., Gantuya B., Wario H.T. Kotowski M.A., Barani H., Manzano P., *et al.*, 2022. Global principles in local traditional knowledge: a review of forage plant-livestock-herder interactions. *Journal of Environmental Management*, 328, 116966.

Sourisseau J.M., Ancey V., 2021. Une approche territoriale et anticipatrice pour une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso. Synthèse (Vol. 17). FAO, 44 p. <https://doi.org/10.4060/cb7925fr>

Swift J., 1996. Desertification Narratives, Winners & Losers. In: Leach M., Mearns R. (eds), *The Lie of the Land. Challenging received wisdom on the African environment*, The International African Institute with James Currey Ltd, London and Oxford.

Thébaud B., 2017. Pastoral and agropastoral resilience in the Sahel: Portrait of the 2014-2015 and 2015-2016 Transhumance (Senegal, Mauritania, Mali, Burkina Faso, Niger). Nordic Consulting Group, with ISRA-Bame and Cirad, for AFL, UK Aid.

Thornton P.K., van de Steeg J., Notenbaert A., Herrero M., 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: a review of what we know and what we need to know, *Agricultural Systems*, 101:113-127.

Tuck E., Wayne Yang K., 2022. *La décolonisation n'est pas une métaphore*. Ed. Rot.Bo.Krik, 128 p.

Vern F., 2021. La forme des communaux dans le droit civil des biens. In : Joye J.-F. (coord.), *Les communaux au XXIe siècle: Une propriété collective entre histoire et modernité*. Presses Universitaires Savoie Mont-Blanc, 295-316.

Vivier N., 2003. La propriété collective en Europe occidentale. Introduction. In : Démélas M.-V., Vivier N. (coord.), *Les Propriétés collectives face aux attaques libérales (1750-1914) : Europe occidentale et Amérique latine*, Presses universitaires de Rennes, 15-38.

WISP/UNEP, 2014. Pastoralism and the Green Economy – a natural nexus? IUCN-World Initiative for Sustainable Pastoralism (WISP) and UNEP, Nairobi.

Chapitre 13

Les grandes cultures et le changement climatique : les cas des filières riz, sorgho, canne à sucre et coton

*Alexia Prades¹, Patricio Mendez del Villar², Didier Tharreau², Edward Gérardiaux^{2,5},
Raphaëlle Ducrot², Aude Ripoche², David Pot³, Mohamed Lamine Tekete³,
Cyril Diatta³, Laurent Laplaze³, Boris Parent³, Isabelle Basile-Doelsch³,
Christine Granier³, Myriam Adam³, Julie Dusserre³, Michel Vaksman³,
Mathias Christina⁴, Christophe Poser⁴, Bruno Bachelier⁵, Romain Loison⁵*

¹ Introduction et conclusion ; ² Filière riz ; ³ Filière sorgho ; ⁴ Filière canne à sucre ; ⁵ Filière coton.

1. Introduction : les filières tropicales face au changement climatique, de grands défis pour des agricultures majoritairement familiales

Alexia Prades

Dans certaines parties du globe, il est aujourd'hui admis que les grandes cultures contribuent significativement au dérèglement climatique, car elles sont conduites, depuis les années 1945-1950, selon des processus massifs d'intensification, consommateurs d'intrants chimiques, d'énergie issue de ressources fossiles et générateurs de gaz à effet de serre (GES). Dans l'ensemble des pays de l'OCDE, les émissions totales de GES d'origine agricole ont augmenté en moyenne de 3,8 % entre 2005 et 2021.

La dénomination *grandes cultures*, utilisée pour ce chapitre et appliquée aux pays en développement des zones tropicales et subtropicales peut paraître inadaptée, car les céréales (riz, sorgho) ou les cultures à visée commerciale (canne à sucre, coton) présentées ci-après sont cultivées, en majorité, de manière extensive sur des exploitations familiales de petite taille. Elles contribuent soit directement comme aliment soit indirectement comme source de revenus à la sécurité alimentaire de millions de familles et participent à la souveraineté alimentaire et énergétique de ces pays (Sourisseau *et al.*, 2014). Certes, les cultures du riz, du sorgho, de la canne à sucre et du coton contribuent aussi, à des degrés divers, au changement climatique. Mais s'il est avéré que les rizières inondées émettent du méthane et que la pratique du brûlis pour la canne à sucre produit des GES, il est aussi prouvé que ces cultures seront fortement affectées par le changement climatique. Dans l'état actuel des connaissances, cela semble un peu moins vrai pour le coton, mais la dépendance de cette culture vis-à-vis des ressources en eau et sa sensibilité à la pression des ravageurs sont des réalités dont les agriculteurs devront tenir compte.

Ce chapitre présente un panorama de quatre cultures des zones tropicales : le riz, le sorgho, la canne à sucre et le coton. Pour chacune d'entre elles, on y trouve la description

de la filière et son contexte international, puis la présentation des impacts provoqués et subis en lien avec le changement climatique, et enfin des propositions de solutions d'adaptation et d'atténuation.

2. Pour une riziculture adaptée aux changements globaux

Patricio Mendez del Villar, Didier Tharreau, Edward Gérardeaux, Raphaëlle Ducrot, Aude Ripoche

2.1. Le riz nourrit la moitié de l'humanité

Le riz est l'aliment de base de plus de la moitié de la population mondiale, en particulier les plus démunis. Dans de nombreux pays du Sud, la sécurité alimentaire et la stabilité sociale et politique dépendent de la disponibilité en riz à des prix « abordables ». Le riz est aussi une source de revenus des ménages dans de nombreux pays. Il est également une denrée indispensable à l'aide d'urgence lorsqu'il s'agit de répondre aux besoins des populations après des événements climatiques extrêmes, dont la fréquence et l'amplitude sont en augmentation.

L'exploitation plus que millénaire de nombreuses plaines rizicoles de manière continue (sans rotation de culture et parfois en double ou triple culture annuelle) témoigne de la résilience des écosystèmes rizicoles aquatiques qui assurent plus des trois quarts de la production mondiale. Dans de nombreuses régions du monde, y compris en Europe et en France, la riziculture joue aussi un rôle important dans la mise en valeur durable et dans la conservation de la biodiversité des zones deltaïques. Le riz est aussi cultivé dans des écosystèmes plus fragiles de mangrove et de terres non inondées (riziculture pluviale stricte), en particulier en Afrique et en Amérique latine.

2.2. Des systèmes rizicoles diversifiés

Une des caractéristiques de la filière riz est probablement la grande diversité de situations agro-socio-économiques existantes. Cette diversité comprend l'intégration de la riziculture dans des systèmes agricoles complexes (par exemple la rizipisciculture), incluant l'élevage, et l'interaction avec d'autres filières (par exemple le maraîchage). Tout en gardant à l'esprit cette diversité, il est toutefois possible d'identifier des caractéristiques de la filière assez tranchées : trois agrosystèmes principaux (riziculture irriguée, de bas-fonds et pluviale stricte), culture vivrière vs production commercialisée, y compris à l'export, intensive en intrants vs intensive en main-d'œuvre, petits producteurs vs gros producteurs. Certaines combinaisons de ces caractéristiques correspondent à des situations agro-socio-économiques très représentatives à l'échelle mondiale : petits producteurs mais en culture intensive en Asie, petits producteurs avec faible utilisation d'intrants en Afrique subsaharienne, grands producteurs en culture intensive en Amérique du Sud, en particulier dans le sud du Brésil, en Uruguay et en Argentine. Ces situations peuvent être assimilées à différentes chaînes de valeur, chacune étant confrontée à des défis différents et définissant un contexte initial différent à prendre en compte pour opérer des changements.

2.3. Un marché mondial du riz confronté à des chocs globaux

En 2023, selon la FAO (2025), la production mondiale de riz paddy a atteint 805 Mt (ou 535 Mt en équivalent riz blanc), dont près de 90 % sont produits et consommés en

Asie. Le continent asiatique est aussi le principal pôle excédentaire et fournisseur de riz pour le reste du monde, en particulier l'Afrique subsaharienne, principale zone déficitaire en riz et premier pôle d'importation avec un tiers des importations mondiales. Malgré un potentiel de production élevé en terres arables, l'Afrique subsaharienne doit ainsi importer entre 30% et 50% du riz consommé. Cette dépendance extérieure l'expose fortement à l'instabilité des marchés internationaux et augmente l'insécurité alimentaire (disponibilité et accès), surtout en zone urbaine.

La crise de 2008, illustrée par la flambée des prix mondiaux, a constitué un choc important, surtout pour les populations les plus démunies. Pour répondre à cette crise, les gouvernements africains, avec leurs partenaires internationaux, ont mis en œuvre de nouvelles politiques de soutien aux filières locales en vue d'atteindre l'autosuffisance en riz. Cependant, les programmes de soutien n'arrivent pas à atteindre les objectifs escomptés de réduction significative de la dépendance rizicole vis-à-vis du marché international. Les crises de tous types, à l'instar de la pandémie de la Covid-19 ou de la guerre en Ukraine, combinées au changement climatique, soulignent la nécessité de développer des systèmes rizicoles plus résilients. Or, sur certains marchés nationaux des pays du Sud, les filières de production locales sont confrontées à la globalisation des échanges et subissent la concurrence des filières d'importation. La faible plus-value des filières valorisant la qualité à l'export (filières bio ou *sustainable rice*) est un élément de contexte à prendre en compte.

Les filières rizicoles globales doivent faire face à des défis multiples et d'ordres différents (biophysiques et environnementaux, techniques, socio-économiques et politiques), qui ajoutent des contraintes supplémentaires à la gestion du changement climatique. Le premier d'entre eux est de générer de la valeur, de la répartir équitablement entre acteurs, et d'améliorer le niveau de vie de 400 millions de riziculteurs pauvres pour réduire les inégalités, sans préjudice pour les 500 millions de consommateurs vivant en dessous du seuil de pauvreté pour une majorité d'entre eux.

2.4. Répondre aux besoins des consommateurs

Un autre défi d'importance est de répondre à la diversification des demandes en matière de qualité organoleptique et industrielle du riz, et aux exigences accrues quant à la qualité nutritionnelle et sanitaire. La qualité est un enjeu tout au long de la chaîne de valeur, de la production à la consommation du riz. Il s'agit non seulement de traiter la question technologique (recherche sur le fonctionnement de la plante, qualités organoleptiques, etc.), mais aussi de s'appuyer sur cette qualité pour mieux valoriser le riz sur le plan commercial, ce qui demande en même temps des innovations organisationnelles.

2.5. Des systèmes rizicoles, des espaces de vie

Au-delà des considérations liées à la commercialisation du riz, les zones rizicoles irriguées sont des territoires dans lesquels des populations sont installées et vivent. La présence permanente de l'eau confère une grande spécificité à ces zones avec, en particulier, des conséquences sur la santé humaine, des enjeux sur les usages de l'eau, une vulnérabilité particulière face au changement climatique. La riziculture irriguée est aussi une source de GES (méthane, protoxyde d'azote) significative en agriculture et donc au cœur des questions liées au changement climatique (IPCC, 2021 ; Sinha *et al.*, 2020).

2.6. Répondre à la sécurité alimentaire future face aux changements globaux

Sur le plan mondial, les défis à relever en matière de production peuvent être résumés ainsi : pour chaque milliard de personnes supplémentaire dans la population mondiale, il faudrait produire 100 Mt supplémentaires de riz paddy (13% de la production totale en 2024) par an (Trébuil et Hossain, 2004) ; et cela avec moins de terres, moins d'eau et moins de main-d'œuvre, avec des systèmes de production plus respectueux de l'environnement, plus résilients face au changement climatique et émettant moins de GES. En 2025, 10-15% des rizières irriguées seront soumises, à des degrés divers, à une contrainte hydrique résultant de demandes urbaines et industrielles accrues et aux effets du changement climatique (Tuong et Bouman, 2003).

La riziculture doit donc, plus que toute autre culture, faire face à l'instabilité du climat et à ses conséquences : l'augmentation des températures diurnes et nocturnes peut nuire à la floraison donc à la production ; l'augmentation du CO₂ atmosphérique augmente la biomasse et si la disponibilité en éléments nutritifs ne peut pas répondre à l'augmentation de la demande, le gain de biomasse ne se traduira pas par des gains de rendements en grains. Cette situation peut même altérer la qualité. La sécheresse, la salinité des sols et les inondations sont des contraintes abiotiques de plus en plus fréquentes qui réduisent les rendements (Lafarge *et al.*, 2015 ; Ahmadi *et al.*, 2015). Le changement climatique peut également favoriser l'émergence ou la réémergence de maladies du riz qui affectent fortement les rendements et la qualité.

Dans un contexte de changement climatique, dont les impacts s'accroissent, l'eau, nécessaire à la majorité des systèmes rizicoles, est en voie de raréfaction et la multiplication de ses usages renforce la compétition entre les utilisateurs sur un même territoire. La filière riz va ainsi devoir gérer la forte consommation d'une ressource en eau sous tension dans les systèmes irrigués en Asie, en Afrique et en Amérique latine. Il va falloir produire avec moins d'eau et codévelopper (jusqu'à l'appropriation durable) des innovations organisationnelles et institutionnelles pour une meilleure gestion des conflits autour de cette précieuse ressource. Une meilleure gestion de l'eau peut aussi contribuer à favoriser des systèmes efficaces émettant moins de GES. La riziculture est en effet responsable d'une part importante des émissions anthropiques de GES (22% des émissions mondiales de méthane d'origine agricole) (IPCC, 2021).

2.7. La transition agroécologique en riziculture, un défi technique

La riziculture mondiale va également devoir faire face à des défis techniques liés au changement climatique. Comment stabiliser ou augmenter la production en limitant les impacts négatifs sur l'humain et l'environnement ? La demande en riz va continuer d'augmenter en raison de l'accroissement de la population mondiale de deux milliards supplémentaires d'ici 2050, dont un milliard en Afrique¹. Dans les systèmes intensifs en intrants, en Asie en particulier, l'objectif sera de produire plus en réduisant l'usage d'intrants chimiques (fertilisants, pesticides) et en accompagnant la réduction potentielle de main-d'œuvre (mécanisation). Réduire l'usage de certains intrants de synthèse, c'est améliorer le bilan carbone, mais c'est aussi réduire la dépendance des riziculteurs vis-à-vis de produits souvent importés, pas toujours disponibles ni accessibles, et dépendants de la stabilité géopolitique mondiale. Enfin, la réduction des

1. ONU, 2024. Population. <https://www.un.org/fr/global-issues/population>.

intrants contribue à réduire les coûts de production compte tenu de l'augmentation des prix. En Afrique, le contexte est assez différent dans la mesure où les quantités d'engrais chimiques sont relativement réduites (entre 100 et 200 kg/ha), cela étant dû en grande partie à la contrainte financière et à leur disponibilité réduite; une situation qui tend à s'aggraver avec le quadruplement des prix des engrais entre 2020 et 2022, du fait de la pandémie, et avec de nouvelles augmentations depuis la guerre en Ukraine en 2022 et ses répercussions sur les échanges internationaux.

Certains agrosystèmes riziocoles (deltas, zones protégées, riziculture pluviale) sont particulièrement fragiles et doivent bénéficier d'une attention particulière. Les solutions agroécologiques sont une voie pour les protéger. L'augmentation de la diversité végétale dans les systèmes riziocoles est nécessaire pour limiter la perte de fertilité des sols et pour augmenter la résilience face au changement climatique, mais elle reste un défi technique important en riziculture irriguée ou inondée.

3. Sorgho et changement climatique : des besoins d'adaptation, mais aussi un vecteur d'atténuation

David Pot, Mohamed Lamine Tekete, Cyril Diatta, Laurent Laplaze, Boris Parent, Isabelle Basile-Doelsch, Christine Granier, Myriam Adam, Julie Dusserre, Michel Vaksman

Le sorgho, espèce originaire du nord-est de l'Afrique, combine deux visages. Il constitue en premier lieu un des piliers de la sécurité alimentaire dans les zones semi-arides du globe, et il représente un vecteur de la transition agroécologique pour les systèmes de production des pays du Nord. Dans ces deux contextes, le sorgho va devoir s'adapter aux évolutions induites par le changement climatique, mais il jouera aussi un rôle dans l'atténuation de ce dernier.

3.1. Le sorgho : une espèce clé pour la sécurité alimentaire et un levier potentiel pour la transition agroécologique

Le sorgho est la cinquième céréale la plus produite dans le monde et il constitue l'alimentation de base de plus de 500 millions de personnes dans les zones semi-arides. Il est cultivé de façon significative (surface supérieure à 5 000 ha/pays) dans 72 pays et il occupe au niveau mondial une superficie de 40,2 Mha (période considérée de 2018 à 2022) pour une production annuelle moyenne de 59,1 Mt. Les plus importantes surfaces sont situées en Afrique subsaharienne (Soudan et Soudan du Sud : 7,6 Mha; Nigeria : 5,69 Mha; Niger : 3,72 Mha), en Inde (4,42 Mha) et aux États-Unis (2,09 Mha). En Europe, en moyenne 277 000 ha de sorgho ont été mis en production entre 2018 et 2022. Les cinq plus grands pays producteurs sur la période 2018-2022 sont les États-Unis (8,71 Mt/an), le Nigeria (6,71 Mt/an), l'Éthiopie (4,79 Mt/an), le Mexique (4,54 Mt/an) et l'Inde (4,4 Mt/an).

Les rendements en Afrique de l'Ouest ont peu évolué entre 1998-2002 et 2018-2022 (+ 6,4 %) et les augmentations de production ont donc majoritairement dépendu, dans cette région, d'un accroissement des surfaces.

En Afrique, la consommation humaine, correspondant à une très large gamme de produits, représente près des trois quarts de l'utilisation du sorgho. Actuellement, dans les pays du Nord et les pays émergents, le sorgho est essentiellement utilisé

pour l'alimentation animale. En complément, il s'affirme comme une espèce phare pour la production énergétique (Thomas *et al.*, 2021) et il présente des atouts pour la production de biomatériaux.

Pour soutenir ces filières de valorisation, le sorgho s'appuie sur des propriétés biologiques spécifiques. C'est une plante à photosynthèse en C4, ce qui lui assure une assimilation efficace du carbone à haute température. Sa forte tolérance aux stress abiotiques et notamment aux stress hydriques et à la faible disponibilité en nutriments a été abondamment documentée (Schlegel *et al.*, 2018), ce qui en fait donc une culture avec une empreinte environnementale relativement faible. Enfin, même si plusieurs ravageurs et maladies peuvent l'affecter, cette espèce peut tout de même être considérée comme rustique et relativement peu sensible aux stress biotiques, nécessitant donc peu de traitements phytosanitaires.

3.2. Impacts du changement climatique sur la production de sorgho

En Afrique de l'Ouest, le changement climatique est déjà à l'œuvre. Entre 2000 et 2009, une hausse de 1 °C par rapport à l'ère préindustrielle a entraîné des pertes de rendement de 5 % à 15 % pour le sorgho (Sultan *et al.*, 2019).

Des projections montrent diverses réductions de rendement pour le futur. En Afrique de l'Ouest (hors Niger), des scénarios à +1,5 °C et +2 °C indiquent des baisses de rendement de 2 % et 5 % respectivement, indépendamment des niveaux de fertilisation (Faye *et al.*, 2018). Les projections les plus récentes effectuées en 2020 pour les cinq principaux pays producteurs d'Afrique de l'Ouest ont mis en évidence des pertes de l'ordre de 15 % à 28 % (Defrance *et al.*, 2020). Le Niger bénéficiant là encore d'un effet favorable des évolutions climatiques.

Des réductions de rendement, plus ou moins importantes, sont donc à attendre, mais ces données ne peuvent à elles seules prédire si les besoins des populations seront couverts. La prise en compte des évolutions des besoins des populations en Afrique de l'Ouest (+300 % sur la base des évolutions démographiques) anticipe un très large différentiel négatif entre ceux-ci et les capacités de production futures (Defrance *et al.*, 2020).

Les conditions environnementales en évolution affecteront également la qualité des productions. En ce qui concerne la qualité du grain, des augmentations de la dureté des grains, des teneurs en protéines accompagnées par une diminution de la digestibilité des protéines et une modification des équilibres en micronutriments ont été mises en évidence en condition de déficit hydrique (Impa *et al.*, 2019). En condition de stress thermique chaud, des diminutions des teneurs en protéines, de leur digestibilité ainsi qu'une augmentation de la dureté des grains ont été observées. Ces deux contraintes environnementales sont aussi associées à une réduction globale des teneurs en micronutriments (Impa *et al.*, 2019).

La qualité de la biomasse, essentielle pour l'alimentation animale et les bioénergies, sera également affectée. Le déficit hydrique augmente les sucres solubles et diminue les teneurs en lignines et cellulose des tiges (Luquet *et al.*, 2019).

Néanmoins, il est important de souligner, tant pour le grain que pour la biomasse, que les impacts sur les produits finis qui sont consommés ou utilisés n'ont pas encore été précisément analysés.

3.3. Le sorgho : un contributeur à l'atténuation du changement climatique

L'aptitude des cultures à atténuer le changement climatique repose principalement sur deux leviers : leur capacité à stocker le carbone atmosphérique dans le sol et à réduire les émissions de GES (CO_2 , CH_4 , N_2O).

En ce qui concerne la séquestration du carbone dans le sol, le sorgho bénéficie d'un système racinaire profond. Une vue globale de la biomasse pouvant contribuer à la séquestration du carbone (notamment au travers de l'enfouissement de résidus de cultures dans le sol) pour les céréales et les légumineuses en Afrique et en Asie a été fournie récemment (Kuyah *et al.*, 2023). Cette étude met en évidence que le sorgho présente les quantités de carbone potentiellement stockables parmi les plus importantes tant au niveau de l'appareil aérien que de l'appareil racinaire et elle souligne l'importance du carbone disponible au travers de la rhizodéposition.

L'estimation des émissions de CO_2 , basée sur la plus large étude réalisée jusqu'à présent (périmètre géographique et durée analysés), indique des niveaux d'émissions de 250 g de CO_2 /kg de sorgho-grain produit². Cette valeur est à comparer, en prenant toutes les précautions nécessaires, à celle obtenue sur le maïs-grains, pour le même périmètre géographique, qui est de 390 g de CO_2 /kg (Adom *et al.*, 2012). Au niveau de l'Afrique subsaharienne, il a été montré que l'utilisation de pailles de sorgho à hauteur de 25 % pour compléter les fourrages très pauvres des pâturages naturels de fin de saison sèche permet de faire diminuer la production de méthane entérique des ruminants (zébus fulani) de 21 % (Gbenou *et al.*, 2024).

Au niveau des émissions de N_2O , la capacité du sorgho à inhiber la nitrification dans les sols grâce au contenu de ses exsudats racinaires devrait aussi lui permettre de réduire ses émissions par rapport à d'autres grandes cultures (Subbarao *et al.*, 2013).

3.4. Changement climatique : adapter la filière sorgho et optimiser son potentiel d'atténuation

Malgré les propriétés intrinsèques du sorgho, ses systèmes de culture devront s'adapter pour être en mesure de répondre aux besoins futurs des producteurs et des consommateurs. Il est important de noter que les agriculteurs mettent déjà en œuvre des stratégies d'adaptation aux évolutions climatiques basées sur leurs savoirs traditionnels en modifiant les dates de semis et les variétés, en déplaçant leurs cultures dans des milieux plus favorables et en mettant en œuvre des stratégies d'économie d'eau (Amadou *et al.*, 2022) et d'association de culture (Traore *et al.*, 2023). Cette constatation souligne la nécessité de dialogues étroits entre les agriculteurs et les chercheurs pour développer des solutions compensant les effets négatifs attendus du changement climatique.

L'optimisation des systèmes mettant en œuvre des associations du sorgho avec des légumineuses (niébé et autres) (voir chapitre 21) constituera un des vecteurs clés d'adaptation. Les possibilités d'accès à des fertilisants seront aussi des leviers de maintien, voire d'augmentation des rendements, même si le système deviendra plus vulnérable au changement climatique (Adam *et al.*, 2020). Le levier variétal sera aussi essentiel. Au-delà de l'adaptation de la phénologie et de l'utilisation du caractère *stay-green* qui constituent déjà des cibles pour les programmes de sélection

2. SGS North America, 2015. The-Carbon-Footprint-of-Sorghum.pdf.

(voir chapitre 21), d'autres caractères devront être ciblés. En effet, même si le sorgho est connu comme étant tolérant au stress hydrique, une large variabilité existe au sein de sa diversité et les mécanismes physiologiques et génétiques sous-jacents n'ont pas encore été identifiés. Il est crucial d'explorer plus finement la variabilité de l'efficacité d'utilisation de l'eau en s'intéressant aux caractéristiques hydrauliques des plantes, tant au niveau de l'appareil aérien (efficacité de transpiration, cavitation du xylème, etc.) que de l'appareil racinaire (anatomie, architecture et rhizodéposition). La compréhension fine du système racinaire sur le plan de l'anatomie, production d'exsudats et capacité de recrutement de partenaires du microbiome, permettra aussi d'optimiser les capacités de stockage de carbone dans le sol. Enfin, les développements de variétés pertinentes et de systèmes de cultures durables devront être menés dans des contextes de stress combinés (sécheresse, température) et récurrents auxquels les plantes seront exposées dans le futur.

3.5. Évolution des systèmes de production de sorgho : vers une approche multiespèce prenant en compte et tirant parti des différents contextes de production

Les évolutions des systèmes de production impliquant le sorgho devront se faire en reconnaissant les intérêts des cultures associées, ce qui amènera sans aucun doute à une évolution d'une part des pratiques culturales, mais aussi des caractères à sélectionner pour les nouvelles variétés. Les besoins des consommateurs devront être systématiquement (mieux) pris en compte pour définir les évolutions souhaitées des systèmes de cultures et des nouvelles variétés. L'identification des idéotypes (combinaison de caractères) pertinents à développer bénéficiera sans aucun doute des connaissances de la biologie comparative et translationnelle. En effet, au lieu d'opposer de manière simpliste le sorgho et le maïs — le sorgho étant traditionnellement considéré comme une espèce plus tolérante au déficit hydrique que le maïs, alors que ces résultats sont remis en question (Rotundo *et al.*, 2024) —, des synergies entre les recherches menées sur ces deux espèces seront à développer pour le bénéfice des producteurs et des consommateurs. Enfin, il est important de rappeler ici que l'adaptation des systèmes de cultures aux conditions futures ne reposera pas uniquement sur des aspects de pilotage agronomique (rendement et qualité des produits), mais aussi sur des approches intégrant les aspects socio-économiques, notamment la disponibilité de la main-d'œuvre et les possibilités d'intensification (disponibilité et qualité des intrants, gestion des flux de biomasse, etc.).

4. La canne à sucre face au changement climatique

Mathias Christina, Christophe Poser

4.1. Impacts et enjeux liés au changement climatique pour la culture de la canne à sucre

La culture de la canne à sucre est un pilier économique pour de nombreux pays tropicaux et subtropicaux, fournissant non seulement du sucre pour la consommation humaine, mais aussi des biocarburants, des aliments et des litières pour animaux, et des produits dérivés industriels. La canne à sucre est actuellement cultivée sur environ 26 Mha de terres agricoles à l'échelle mondiale, employant des millions de personnes

dans les secteurs de la culture, du transport, de la transformation et de la distribution. Les plus grands producteurs mondiaux se trouvent au Brésil, en Asie du Sud-Est (Inde, Chine, Thaïlande), mais la canne est également présente dans l'ensemble des zones tropicales et subtropicales (États-Unis, Afrique du Sud et de l'Ouest, Australie). Face à une demande croissante, les zones de culture sont en extension.

Au même titre que d'autres grandes cultures comme le maïs ou le blé, la culture de canne contribue significativement aux émissions de GES (Tongwane *et al.*, 2016). La conduite de la culture représente la majorité des émissions en comparaison du processus de transformation industriel (Macedo *et al.*, 2008), en raison de la mécanisation, de l'utilisation d'intrants chimiques ou encore de la pratique du brûlage encore courante dans certains pays, bien que son arrêt soit largement promu pour limiter les GES. À titre d'exemple, une étude, réalisée au Brésil entre 2005 et 2006, a montré que le transport des cannes après la coupe ne représentait que 7 % des émissions de GES, contre 11 % pour la production de fertilisants et 19 % résultant de la pratique du brûlage (Macedo *et al.*, 2008).

Le changement climatique constitue également une menace sérieuse pour cette filière, mais les conséquences attendues varient fortement en fonction des zones concernées (Linnenluecke *et al.*, 2018). Les enjeux sont nombreux : les variations des régimes de précipitations, l'augmentation des températures, la hausse du niveau de la mer dans les zones côtières et la fréquence accrue des événements climatiques extrêmes comme les cyclones et les inondations (Warren *et al.*, 2024).

Les études ont montré des projections contrastées selon les zones climatiques, en raison de la combinaison de conditions favorables pour les cultures C4³ (augmentation de la température et du CO₂) et de régimes de précipitations défavorables (figure 13.1). En effet, la canne à sucre nécessite des conditions climatiques spécifiques pour croître de manière optimale. Elle prospère dans des régions où les précipitations sont abondantes, idéalement supérieures à 1500 mm par an, et où les températures moyennes journalières se situent entre 22 °C et 30 °C⁴. Les sols bien drainés et fertiles sont également essentiels pour des rendements élevés. Toutefois, l'augmentation des températures moyennes et la variabilité accrue des précipitations rendent plus difficile la gestion des cultures et compromettent la stabilité des rendements.

Les impacts du changement climatique sur la canne à sucre sont multiples et variés. La modification des régimes de précipitations peut entraîner des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus sévères (Carvalho *et al.*, 2015), affectant la croissance de la canne à sucre qui nécessite des apports d'eau réguliers pour maximiser les rendements (Jones *et al.*, 2015). Une bonne gestion de l'irrigation pourrait d'ailleurs permettre d'augmenter les rendements dans de nombreuses régions (Linnenluecke *et al.*, 2018). Néanmoins, la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration due à des températures plus élevées réduisent la disponibilité de l'eau douce, aggravant la concurrence pour cette ressource entre l'agriculture, les usages domestiques et industriels et encore plus dans le cadre d'une demande d'amélioration de la qualité des eaux.

3. Culture C4 : culture dont la photosynthèse est de type C4, signifiant que le premier glucide formé possède quatre atomes de carbone. Les plantes en C4 se caractérisent par un meilleur rendement photosynthétique et une meilleure utilisation de l'eau que les plantes en C3.

4. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/en/>.

L'augmentation des températures pose également un défi de taille. La maturation de la canne (accumulation du sucre dans les tiges) est perturbée par une chaleur excessive, notamment par l'augmentation des minimales nocturnes. De plus, des températures et des humidités plus élevées favorisent la prolifération de parasites et de maladies, comme la rouille brune de la canne à sucre ou les adventives, qui peuvent nuire à la production (Goebel et Sallam, 2011). Néanmoins, l'augmentation des températures est davantage vue comme bénéfique pour la culture de canne dans de nombreuses régions, sous condition de disponibilité en eau satisfaisante.

L'augmentation du niveau de la mer pourrait également exercer une pression croissante sur les surfaces de production de canne à sucre (Warren *et al.*, 2024). Les zones côtières, où la canne à sucre est souvent cultivée en raison de leurs sols fertiles et de leur climat favorable, sont particulièrement vulnérables aux inondations favorisées par la montée des eaux. La canne à sucre est une culture sensible aux inondations, entraînant la pourriture des racines et une réduction de la qualité et de la quantité des récoltes (Gomathi *et al.*, 2015). Une élévation du niveau de la mer peut également entraîner une salinisation accrue des sols, rendant les terres agricoles moins productives ou même infertiles. Par conséquent, certaines des principales régions productrices, comme celles situées dans les deltas et les plaines côtières, pourraient voir leur production diminuer significativement.

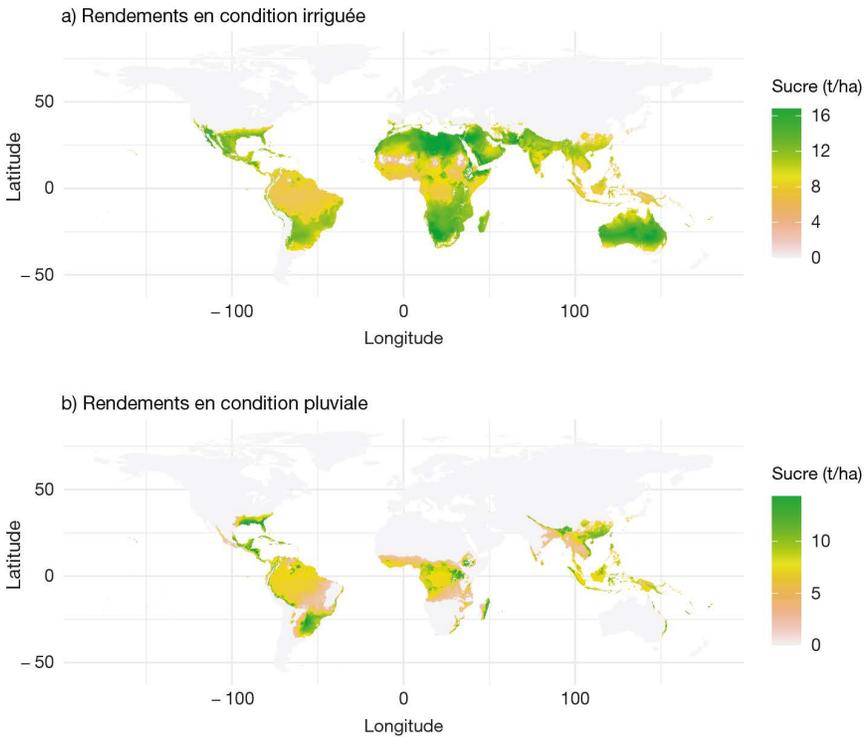


Figure 13.1. Exemple de gradient de potentiel de rendements de canne à sucre dans le cadre du changement climatique : période 2041-2070. Source : données gaez-services.fao.org.

Rendement en sucre (t/ha) en condition irriguée (a) ou pluviale (b), modèle climatique GFDL-ESM2M, scénario RCP4.5.

4.2. Voies d'adaptation et potentiel d'atténuation de la culture de la canne à sucre

Pour faire face au changement climatique, les agriculteurs devront adopter des stratégies d'adaptation technique et d'atténuation efficaces, mais également revoir la répartition géographique des zones cultivées. L'une des principales voies d'adaptation technique est la sélection et la culture de variétés de canne à sucre plus résistantes à la sécheresse, à la chaleur et aux maladies (Goebel et Sallam, 2011 ; Grandis *et al.*, 2024). En particulier, la résistance à la sécheresse est perçue comme une caractéristique essentielle à développer pour les futures variétés. Une augmentation de la profondeur d'enracinement et de l'efficience d'utilisation de l'eau des variétés est un atout recherché pour ces variétés tolérantes à la sécheresse. Les programmes de création et de sélection variétales, longs (dix à quinze ans) et coûteux, associés aux travaux d'amélioration des pratiques agronomiques sur ces variétés améliorées, jouent un rôle crucial.

L'optimisation de l'irrigation est également essentielle dans de nombreuses régions du monde. Les techniques d'irrigation goutte-à-goutte, par exemple, permettent une utilisation plus efficace de l'eau, réduisant les pertes par évaporation et assurant que les plantes reçoivent l'humidité nécessaire en période de sécheresse. De plus, les pratiques limitant l'évaporation telles que le paillage peuvent améliorer la rétention d'eau, augmentant ainsi la résilience des cultures face aux variations climatiques.

Une autre voie d'adaptation, plus spécifique à certaines régions, consiste à transférer les cultures vers des régions devenues plus favorables à la culture de canne en lien avec l'augmentation des températures ou l'adaptation des variétés (Poser *et al.*, 2020). Par exemple, les zones de haute altitude dans les îles tropicales de l'océan Indien seront plus favorables à la culture de canne même en conditions non irriguées (Christina *et al.*, 2024). Aussi un décalage de la période de coupe dans certaines régions comme le nord de l'Afrique du Sud a montré du potentiel pour améliorer le rendement dans le futur (Park *et al.*, 2007). Par conséquent, on commence déjà à observer un intérêt accru pour la canne à sucre dans de nouvelles régions historiquement peu productrices, comme le sud de l'Europe par exemple.

La diversification des cultures constitue une autre stratégie d'adaptation, en particulier pour les petits exploitants agricoles. En intégrant des cultures complémentaires, les agriculteurs peuvent réduire leur dépendance à une seule culture, diversifiant ainsi leurs sources de revenus et améliorant la résilience de leurs exploitations agricoles face aux aléas climatiques (Aurand *et al.*, 2022). En outre, le développement de pratiques agroécologiques durables, comme les associations de cultures, peut aider à maintenir la productivité des terres à long terme en améliorant la structure du sol, en augmentant la biodiversité et en réduisant l'érosion, tout en diminuant l'usage de pesticides (Soulé *et al.*, 2024) contribuant ainsi à la réduction des GES.

Par ailleurs, les cultures de canne à sucre peuvent jouer un rôle significatif dans l'atténuation du changement climatique grâce à plusieurs mécanismes, notamment le stockage de carbone dans le sol, mais également à travers un impact direct sur le climat local (Loarie *et al.*, 2011). La canne à sucre possède un système racinaire dense et profond, qui permet de séquestrer du carbone dans le sol (voir chapitre 17) de manière efficace, en comparaison d'autres cultures (La Scala Junior *et al.*, 2012). À titre d'exemple, une étude au Brésil a estimé à 2,4t/ha le CO₂ émis lors d'un cycle de culture d'un an de canne (de Figueiredo *et al.*, 2010), ce qui est inférieur à la quantité de carbone présente

dans les racines de canne à la coupe (2 à 6 t/ha de carbone organique) (Chevalier *et al.*, 2023). De plus, la canne à sucre est souvent utilisée pour produire de la biomasse et du bioéthanol (voir chapitre 19), des solutions remplaçant les combustibles fossiles qui contribuent à réduire les émissions de GES. Des initiatives visant à réduire les émissions de GES provenant de la production de canne à sucre peuvent également contribuer à l'atténuation du changement climatique. En particulier, l'utilisation de résidus de canne à sucre pour la production de bioénergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les processus de transformation sont des exemples de mesures pouvant réduire l'empreinte carbone de la filière (Cherubin *et al.*, 2021). Il en est de même pour les économies d'eau réalisées dans l'usine et aux champs.

En conclusion, le changement climatique pose des défis significatifs pour la culture de la canne à sucre, mais des stratégies d'adaptation existent et cette culture présente un fort potentiel d'atténuation à travers le stockage de carbone *via* son système racinaire profond. En combinant innovation agronomique, pratiques agricoles durables et soutien politique nécessaire à la transition, il est possible de renforcer la résilience de la canne à sucre face aux impacts climatiques et de garantir la pérennité de cette filière essentielle pour de nombreuses économies nationales. Néanmoins, les petits exploitants agricoles, qui représentent une grande partie de la production mondiale de canne à sucre, sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique. Par conséquent, les politiques gouvernementales et les investissements dans les infrastructures agricoles, comme les systèmes de gestion de l'eau et les programmes de soutien aux petits exploitants, sont essentiels pour renforcer la résilience de la culture.

5. Le coton face au changement climatique

Edward Gérarddeaux, Bruno Bachelier, Romain Loison

5.1. La filière coton dans le monde : une répartition sur les cinq continents avec de grandes disparités

Avec une production annuelle de plus de 24 Mt, le coton est depuis plusieurs décennies la première fibre naturelle et la deuxième fibre textile en volume, derrière les fibres synthétiques. En 2022-2023, les deux tiers de la production mondiale de fibre de coton provenaient de la zone Asie-Océanie, un quart était produit sur le continent américain et moins d'un dixième en Afrique.

Le rendement moyen mondial de 800 kg de fibre par hectare cache de grandes disparités entre les zones de production. Ainsi, quand l'Australie obtient plus de 2 000 kg/ha, l'Afrique n'en produit en moyenne que 400 kg/ha. Cet écart traduit la diversité des conditions abiotiques, biotiques, techniques et organisationnelles de la production cotonnière. Concrètement, le spectre va d'une petite agriculture familiale faiblement mécanisée pour les pays du Sud à une agriculture intensive pour les pays développés.

Dans les pays cotonniers où la culture est peu intensive, le cotonnier est cultivé principalement dans de petites exploitations familiales, sur une surface de quelques hectares, de façon quasi exclusivement pluviale, en petite mécanisation attelée, rarement motorisée. La récolte est encore largement manuelle, ce qui constitue un frein lié à la pénurie de main-d'œuvre. Des cultures alimentaires (légumineuses, céréales, etc.) entrent en rotation dans le système de culture et bénéficient pour certaines de

l'arrière-effet de la fertilisation du cotonnier. Selon les zones de production, soit les producteurs se fournissent en intrants sur le marché local et vendent leur récolte à des collecteurs (Asie) soit les producteurs contractualisent avec une société cotonnière, publique ou privée, qui leur fournit à crédit les intrants en début de campagne et leur garantit l'achat de leur récolte à un prix fixé en début de campagne (Afrique). Bien que fournissant dans ces conditions une faible marge aux producteurs, la culture cotonnière y est considérée comme une culture de rente, contribuant pour une part importante aux revenus monétaires de plusieurs millions de familles. Il s'y ajoute plusieurs dizaines de millions de personnes impliquées dans les différentes étapes de la filière, de la production à la transformation.

Dans les pays les plus avancés (États-Unis, Australie), la culture cotonnière est pratiquée par de grandes exploitations, motorisée du semis à la récolte, irriguée et intensive selon les principes de l'agriculture de précision, et conduite à base de variétés performantes, souvent transgéniques. Lorsqu'ils ne sont pas eux-mêmes égreneurs⁵, les producteurs sous-traitent la transformation primaire de leur récolte à des entreprises privées et restent propriétaires de la fibre et des graines obtenus, qu'ils vendent ensuite à des intermédiaires commerciaux.

La transformation secondaire de la fibre de coton en textile a beaucoup de difficultés à se développer localement en Afrique, qui exporte près de 90 % de sa production et perd ainsi la quasi-totalité de la plus-value associée aux produits textiles (fil, étoffe, vêtement, etc.). En un siècle, elle a fortement régressé sur les autres continents, essentiellement au profit de quelques pays asiatiques, dont les industries transforment plus de 80 % de la production mondiale. Cette forte concentration dans des pays à faible coût de main-d'œuvre permet de mettre sur le marché mondial des textiles dont une partie alimente la fast-fashion.

Si la fibre représente les trois quarts de la valeur de la récolte, la graine contribue également à l'économie de la filière. Il s'agit d'une source oléoprotéagineuse importante, le plus souvent valorisée localement dans l'alimentation humaine (huile) et animale (tourteau), mais aussi en cosmétique.

5.2. Impacts du changement climatique sur les grandes zones de production cotonnières

Comme pour toutes les cultures, le changement climatique va avoir un effet sur les conditions de croissance, donc sur les rendements et la durabilité des filières cotonnières. Grâce à plusieurs de ses traits, le cotonnier réagira différemment par rapport à d'autres cultures. C'est une plante résistante à la sécheresse et aux fortes chaleurs, principalement grâce à ses caractéristiques physiologiques.

– Premièrement, sa température de base⁶ de 12 °C en fait une plante dont les plages de croissance et de fonctionnement sont élevées : entre 27 °C et 32 °C pour la croissance végétative et entre 24 °C et 27 °C pour le développement fructifère.

5. Un égreneur est un entrepreneur public ou privé chargé de réaliser l'égrenage (ou transformation primaire) du coton-graine (produit de la récolte du cotonnier, composé de graines portant des fibres) pour séparer la fibre de la graine.

6. Température de base (ou zéro de végétation) : température en dessous de laquelle une culture ne peut croître et se développer.

- Deuxièmement, la croissance indéterminée du cotonnier, qui produit des organes fructifères et des organes végétatifs de façon concomitante durant tout son cycle et qui a la capacité de faire chuter les organes fructifères peu développés, lui confère une certaine plasticité. Ainsi, une période de forte chaleur ou de sécheresse de durée modérée n'affecte pas la production de façon irrémédiable, car la plante va compenser en produisant à nouveau des organes fructifères à la levée du stress.
- Troisièmement, le système racinaire du cotonnier est pivotant, permettant une exploration profonde des sols et un accès à l'eau jusqu'à 1,5 m de profondeur.
- Quatrièmement, le cotonnier est une plante anisohydrique : il ne ferme pas ses stomates lors de déficits hydriques modérés. Cette caractéristique lui permet ainsi de maintenir la photosynthèse pour produire plus de racines, explorer plus de sol et accéder à des ressources hydriques plus profondes, en relation avec la caractéristique précédente.

C'est aussi une plante dite en C3⁷, moins performante vis-à-vis du CO₂ que les plantes en C4, nombreuses en régions tropicales (maïs, sorgho, canne à sucre, etc.). Un enrichissement en carbone de l'atmosphère va donc leur être très favorable (Mauney *et al.*, 1994).

Pour toutes ces raisons, les changements climatiques auront des effets moins négatifs sur le cotonnier que sur d'autres plantes, surtout si la ressource en eau est disponible par l'irrigation, une pluviométrie abondante ou des nappes profondes. En revanche, dans des conditions de cultures pluviales strictes et limitantes, comme dans les zones cotonnières d'Afrique semi-aride et subhumide, des effets négatifs des fortes températures sont à craindre. Ils ne seront contrebalancés par l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère que si la pluviométrie est suffisante.

En Chine, actuel premier producteur mondial, les effets du changement climatique seront en moyenne négatifs, avec toutefois des disparités régionales : négatifs dans la vallée du Yangtze et neutres ou positifs dans les régions du nord-ouest et du fleuve Jaune (Chen *et al.*, 2015).

Aux États-Unis, le coton est cultivé dans les États du Sud. Les prévisions des effets du changement climatique y sont contrastées entre les pertes et les gains de rendements (Sharma *et al.*, 2022), en raison d'un effet négatif d'une augmentation des fréquences des événements extrêmes et d'un effet positif de l'élévation du CO₂ et des précipitations.

Les études scientifiques des effets du changement climatique en Afrique subsaharienne ne sont pas nombreuses. Les grands bassins de production du coton sont les zones soudanaises et soudano-sahéliennes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Les prévisions du Giec montrent des situations contrastées entre l'ouest et l'est. Des déficits pluviométriques au Sénégal, au Mali et au Burkina Faso provoqueront des baisses de rendement. En revanche, des augmentations de pluies au Nigeria, au Cameroun et au Tchad, et des situations incertaines intermédiaires entre ces deux zones (Côte d'Ivoire, Ghana, Bénin, Togo) pourraient permettre des augmentations de rendements. Au Bénin, Amouzou (2018) prévoit des effets variables plutôt positifs compris entre -7% et +41% sur les rendements, tout en attirant l'attention

7. Plante en C3 : plante dont le mécanisme photosynthétique est basé sur la production de glucides à trois atomes de carbone.

sur des difficultés de disponibilité du sol en azote en cas de forte demande liée à l'augmentation des biomasses. Au Cameroun, des effets positifs sont aussi prévus (Gérardeaux *et al.*, 2013).

En Europe, le coton est cultivé en Espagne et surtout en Grèce avec des rendements élevés grâce à l'irrigation et à la mécanisation. Les températures basses de printemps sont un facteur limitant important de la croissance de la culture et le réchauffement climatique pourrait ici apporter des changements favorables. L'adaptation des systèmes de culture sera possible pour en profiter (Engonopoulos *et al.*, 2021). De plus, la ressource en eau y est en compétition avec les besoins des populations. La culture pourrait se développer dans des pays plus au nord comme la France, l'Italie ou la Bulgarie.

En Australie, les études ont montré des effets contrastés sur les rendements et sur la qualité des fibres, même pour les systèmes de cultures pluviaux (Luo *et al.*, 2016; Williams *et al.*, 2015). Les événements extrêmes (sécheresses, inondations, vagues caniculaires) seront plus nombreux avec des impacts négatifs plus importants.

En Asie centrale, le coton est cultivé dans des plaines soumises à des hivers très froids et des étés très chauds. Les cultures sont irriguées, mais les ressources en eau sont déjà très exploitées. Les prévisions des effets du réchauffement climatique sont une augmentation de la demande en eau et donc une diminution des rendements et des superficies en coton qui pourraient disparaître de certaines zones (Schlubach, 2021).

Enfin, le coton est également produit en Inde : il y est prévu un déclin des rendements dans le Nord et des effets neutres à positifs dans la partie centrale et sud (Hebbar *et al.*, 2013). Il est probable que les rendements augmentent, mais que la pression des ravageurs aussi.

En conclusion, sans même considérer les adaptations possibles, les changements climatiques ne vont pas bouleverser la carte et les conditions de culture du coton. Quelques régions du monde vont se trouver gagnantes comme le sud de l'Europe, l'Afrique centrale, le sud de l'Inde, et d'autres, perdantes comme l'Afrique de l'Ouest, l'Asie centrale, le nord de l'Inde, la vallée du Yangtze en Chine.

5.3. Les voies d'adaptation et d'atténuation de la culture du coton dans un contexte de changement climatique

La sélection variétale associée aux choix des dates de semis optimales est une activité de recherche adaptative qui consiste notamment à faire correspondre les phases de croissance d'une culture à celles de disponibilité en ressources (Zimmermann *et al.*, 2017). De plus, une augmentation de température de 2,5°C va provoquer une accélération du développement de la culture et mécaniquement un raccourcissement du cycle des variétés de cinq jours pour la floraison et dix jours pour la maturité. Ce qui peut fortement dérégler le synchronisme entre les périodes où les besoins en eau sont couverts par la pluviométrie. Pour pallier cet effet, la sélection combinée à la recherche de dates de semis optimales peut s'adapter en choisissant des variétés au cycle plus ou moins long, afin de ramener la floraison et la maturité aux dates souhaitées (Wu *et al.*, 2023).

Dans certaines zones cotonnières, les changements climatiques provoqueront des conditions favorables à la croissance du cotonnier. Mais pour que ces conditions favorables produisent une amélioration des rendements, il faudra assurer une bonne nutrition des plantes pour espérer des gains de productivité. Les gains de biomasse

permis par les conditions favorables doivent être couverts par une amélioration de l'offre du sol en éléments nutritifs. Dans les systèmes de cultures familiaux d'Afrique, où l'accès au marché des intrants est limité et où les sols sont fragiles, il est fort probable que ces gains potentiels soient réduits à néant. Une des voies prometteuses pour améliorer la fertilité des sols sans recourir uniquement aux intrants extérieurs est de pratiquer des systèmes de cultures agroécologiques, faisant intervenir des rotations ou des associations avec des légumineuses, enfouies ou laissées sur le sol pour constituer un mulch de couverts végétaux. Là encore, les capacités des petites exploitations familiales à modifier leurs systèmes de culture, à avoir accès aux marchés de semences et d'équipements agricoles restent limitées. La mise en œuvre de ces voies d'adaptation dépendra des politiques publiques d'appui.

Comme pour la plupart des cultures, la culture du coton est émettrice de gaz à effet de serre à travers les intrants azotés, le carburant et l'électricité des tracteurs, de l'irrigation, des récolteuses et celui des usines d'égrenage. On estime à 1,6 t la quantité de GES émise pour produire une tonne de fibres (Hedayati *et al.*, 2019). Toutefois, si l'on arrête son bilan à l'année de production, le carbone stocké dans les fibres et dans les racines est supérieur à celui émis pour le produire. Malheureusement, avec le temps, le carbone stocké dans les fibres se relâche dans l'atmosphère à travers le cycle de vie des tissus (Cotton Incorporated, 2009). Les recherches en agroforesterie ou en agroécologie qui visent à améliorer la résilience des systèmes de culture face aux changements climatiques en améliorant la fertilité du sol et en diminuant la dépendance aux intrants azotés de synthèse contribuent également à améliorer les bilans des GES. Des expériences sont en cours un peu partout dans le monde, on citera celles conduites dans le projet Desira-UE Innovac au Nord-Cameroun, qui visent à qualifier les effets des parcs agroforestiers sur la durabilité des cultures.

6. Conclusion : les filières tropicales face au changement climatique, des connaissances à partager, des temporalités à gérer, une gouvernance à repenser

Alexia Prades

Les solutions préconisées pour les cultures vivrières ou commerciales présentées dans ce chapitre sont de trois ordres. Le premier regroupe des solutions à court terme, dont de nombreuses exploitations se sont déjà emparées : optimisation de la gestion de la ressource en eau, valorisation de la biodiversité cultivée locale, changement de pratiques culturales incluant souvent un virage agroécologique des systèmes, comme les essais de combinaisons culturales innovantes. Le deuxième type de solution inclut des mesures plus radicales, réalisables à moyen terme, comme les déplacements de zones de production. Enfin, les solutions à long terme reposent, entre autres, sur l'amélioration variétale associée à une compréhension de plus en plus fine des mécanismes de fonctionnement de la plante dans un environnement complexe (plantes de services, agroforesterie, etc.) et contraint par l'instabilité climatique.

Ces trois types de solutions se déploient à des échelles de temps différentes (voir chapitre 20), mais ont cependant un point commun. Elles sont encore toutes insuffisamment étudiées, alors qu'elles présentent des résultats encourageants (Côte *et al.*, 2019); résultats qui nécessitent, dès à présent, de mobiliser une gouvernance

multiéchelle coordonnée et un réel soutien des politiques publiques pour accompagner le changement et la prise de risque. Certaines de ces solutions vont bouleverser les trajectoires de territoires entiers et, en particulier, leurs populations. Elles vont également nécessiter un effort de recherche multidisciplinaire et transfilière (lorsqu'il s'agira par exemple d'étudier certaines formes d'associations culturelles ou de remplacer une culture par une autre). Elles devront aussi mobiliser des pratiques de la recherche en partenariat, faisant de plus en plus appel à des approches participatives. Les solutions existent et les acteurs de la recherche, notamment ceux des filières, sont prêts à accompagner la transformation de ces territoires. « S'ils jouent un rôle central dans l'alimentation de la planète, les petits producteurs n'ont pourtant accès qu'à 1,7 % du financement de l'action climatique », rappelle le Fonds mondial de transformation de l'agriculture (Fida), dans un article publié sur son site le 4 avril 2022. Il y a urgence à changer de posture, à modifier nos regards, nos pratiques, nos institutions et à faire enfin confiance à ces productrices et producteurs qui ont un rôle clé dans la résilience de leurs territoires vis-à-vis du changement climatique.

7. Références bibliographiques

- Adam M., MacCarthy D.S., Traoré P.C.S., Nenkam A., Freduah B.S., Ly M., Adiku S.G.K., 2020. Which is more important to sorghum production systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa: Climate change or improved management practices? *Agric. Syst.* 185, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102920>
- Adom F., Maes A., Workman C., Clayton-Nierderman Z., Thoma G., Shonnard D., 2012. Regional carbon footprint analysis of dairy feeds for milk production in the USA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 520-534. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0386-y>
- Ahmadi N., Baroiller J-F., D'Cotta H., Morillon R., 2015. Adaptation à la salinité. In : Torquebeieu E., coord., *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, éditions Quæ, 50-62.
- Amadou T., Falconnier G.N., Mamoutou K., Georges S., Alassane B.A., François A., et al., 2022. Farmers' Perception and Adaptation Strategies to Climate Change in Central Mali. *Weather Clim. Soc.* 14, 95-112. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-21-0003.1>
- Amouzou K.A., Naab J.B., Lamers J.P.A., Borgemeister C., Becker M., Vlek P.L.G., 2018. CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water- and N- use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. *Agricultural Systems*, 165, 85-96.
- Aurand T.C., Sunthornvarabhas J., Sriroth K., 2022. Value Addition Through Diversification of the Sugar Industry from Farm to Mill, *Sugar Tech*, 24(4): 1155-1166.
- Carvalho A.L. de, Menezes R.S.C., Nóbrega R.S., Pinto A. de S., Ometto J.P.H.B., von Randow C., Giarolla A., 2015. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, north-eastern region of Brazil, *Renewable Energy*, 78, 26-34.
- Chen C., Pang Y., Pan X., Zhang L., 2015. Impacts of climate change on cotton yield in China from 1961 to 2010 based on provincial data. *Journal of Meteorological Research*, 29, 515-524.
- Cherubin M.R., Carvalho J.L.N., Cerri C.E.P., Nogueira L.A.H., Souza G.M., Cantarella H., 2021. Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy, *Land*, 10(1): 72.
- Chevalier L., Christina M., Février A., Jourdan C., Ramos M., Poultney D., Versini A., 2023. Sugarcane responds to nitrogen fertilization by reducing root biomass without modifying root accumulation, Présenté à xxxi International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT) Congress, Hyderabad, India.
- Christina M., Mézino M., Le Mézo L., Todoroff P., 2024. Modeled impact of climate change on sugarcane yield in Réunion, a tropical island, *Sugar Tech*, 8 p.
- Côte F.-X., Poirier-Magona E., Perret S., Roudier P., Rapidel B., Thirion M.-C., 2018. *La transition agro-écologique des agricultures du Sud*. Versailles, éditions Quæ, 368 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2824-9>

Cotton Incorporated, 2009. Summary of Life Cycle Inventory Data for Cotton (Field to Bale – version 1.1 – 2 July 2009). Cotton Incorporated, USA.

de Figueiredo E.B., Panosso A.R., Romão R., La Scala N., 2010. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil, *Carbon Balance and Management*, 53.

Defrance D., Sultan B., Castets M., Famién A.M., Baron C., 2020. Impact of Climate Change in West Africa on Cereal Production Per Capita in 2050. *Sustainability*, 12, 7585. <https://doi.org/10.3390/su12187585>

Engonopoulos V., Kouneli V., Mavroeidis A., Karydogianni S., Beslemes D., Kakabouki I., *et al.*, 2021. Cotton versus climate change: the case of Greek cotton production. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49, 12547.

FAO, 2025. FAOSTAT: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

Faye B., Webber H., Naab J.B., MacCarthy D.S., Adam M., Ewert F., *et al.*, 2018. Impacts of 1.5 versus 2.0°C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. *Environ. Res. Lett.* 13, 034014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaab40>

Gbenou G.X., Assouma M.H., Bastianelli D., Kiendrebeogo T., Bonnal L., Zampaligre N., *et al.*, 2024. Supplementing zebu cattle with crop co-products helps to reduce enteric emissions in West Africa. *Arch. Anim. Nutr.*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2024.2356326>

Gérardeaux E., Sultan B., Palai O., Guiziou C., Oetli P., Naudin K., 2013. Positive effect of climate change on cotton in 2050 by CO₂ enrichment and conservation agriculture in Cameroon. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 485-495.

Giec, 2021. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis.

Goebel F.-R., Sallam N., 2011. New pest threats for sugarcane in the new bioeconomy and how to manage them, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(1-2) : 81-89.

Gomathi R., Rao P.N.G., Chandran K., Selvi A., 2015. Adaptive Responses of Sugarcane to Waterlogging Stress: An Over View, *Sugar Tech*, 17(4): 325-338.

Grandis A., Fortirer J.S., Navarro B.V., de Oliveira L.P., Buckeridge M.S., 2024. Biotechnologies to Improve Sugarcane Productivity in a Climate Change Scenario, *Bioenergy Research*, 17(1): 1-26.

Hebbar K.B., Venugopalan M.V., Prakash A.H., Aggarwal P.K., 2013. Simulating the impacts of climate change on cotton production in India. *Climatic Change*, 118, 701-713.

Hedayati M., Brock P.M., Nachimuthu G., Schwenke G., 2019. Farm-level strategies to reduce the life cycle greenhouse gas emissions of cotton production: An Australian perspective. *Journal of Cleaner Production*, 212: 974-985.

Impa S.M., Perumal R., Bean S.R., John Sunoj V.S., Jagadish S.V.K., 2019. Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. *J. Cereal Sci.* 86, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.013>

IPCC, 2021. Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B>

Jones M.R., Singels A., Ruane A.C., 2015. Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa, *Agricultural Systems*, 139, 260-270.

Kuyah S., Muoni T., Bayala J., Chopin P., Dahlin A.S., Hughes K., *et al.*, 2023. Grain legumes and dryland cereals contribute to carbon sequestration in the drylands of Africa and South Asia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 355, 108583. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108583>

Lafarge T., Julia C., Baldé A., Ahmadi N., Muller B., Dingkuhn M., 2015. Stratégie d'adaptation du riz en réponse à la chaleur au stade de la floraison. In : Torquebieau E., coord., *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, éditions Quæ, 37-49.

La Scala Junior N., De Figueiredo E.B., Panosso A.R., 2012. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities, *Brazilian Journal of Biology*, 72(3): 775-785.

Linnenluecke M.K., Nucifora N., Thompson N., 2018. Implications of climate change for the sugarcane industry, *WIREs Climate Change*, 9(1): e498.

- Loarie S.R., Lobell D.B., Asner G.P., Mu Q., Field C.B., 2011. Direct impacts on local climate of sugarcane expansion in Brazil, *Nature Climate Change*, 1(2): 105-109.
- Luo Q., Bange M., Johnston D., 2016. Environment and cotton fibre quality. *Climatic Change*, 138, 207-221.
- Luquet D., Perrier L., Clément-Vidal A., Jaffuel S., Verdeil J.-L., Roques S., *et al.*, 2019. Genotypic covariations of traits underlying sorghum stem biomass production and quality and their regulations by water availability: Insight from studies at organ and tissue levels. *GCB Bioenergy*, 11, 444-462. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12571>
- Macedo I.C., Seabra J.E., Silva J.E., 2008. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020, *Biomass and bioenergy*, 32(7): 582-595.
- Mauney J.R., Kimball B.A., Pinter P.J., LaMorte R.L., Lewin K.F., Nagy J., Hendrey G.R., 1994. Growth and yield of cotton in response to a free-air carbon dioxide enrichment (FACE) environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70, 49-67.
- Park S., Howden M., Horan H., 2007. Evaluating the impact of and capacity for adaptation to climate change on sectors in the sugar industry value chain in Australia., in XXVI Congress, International Society of Sugar Cane Technologists, ICC, Durban, South Africa, 29 July-2 August 2007, 312-326.
- Poser C., Barau L., Mézino M., Goebel F.-R., Ruget F., 2020. Effect of the germination threshold temperature on the geographical distribution of the variety R583 in Reunion Island., *International Sugar Journal*, 122(1461): 640-657.
- Rotundo J.L., Salinas A., Gomara N., Borrás L., Messina C., 2024. Maize outyielding sorghum under drought conditions helps explain land use changes in the US. *Field Crops Res.* 308, 109298. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109298>
- Schlegel A.J., Lamm F.R., Assefa Y., Stone L.R., 2018. Dryland Corn and Grain Sorghum Yield Response to Available Soil Water at Planting. *Agron. J.* 110, 236-245. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0398>
- Schlubach J., 2021. Downscaling model in agriculture in Western Uzbekistan climatic trends and growth potential along field crops physiological tolerance to low and high temperatures. *Heliyon*, 7, e07028.
- Sharma R.K., Kumar S., Vatta K., Dhillon J., Reddy K.N., 2022. Impact of recent climate change on cotton and soybean yields in the southeastern United States. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100348.
- Sinha R., Soni P., Perret S., 2020. Environmental and economic assessment of paddy based cropping systems in Middle Indo-Gangetic plains, India. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8:100067. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100067>
- Soulé M., Mansuy A., Chetty J., Auzoux S., Viaud P., Schwartz M., *et al.*, 2024. Effect of crop management and climatic factors on weed control in sugarcane intercropping systems, *Field Crops Research*, 306, 109234.
- Sourisseau J.-M., 2014. *Agricultures familiales et mondes à venir*. Versailles, éditions Quæ, 364 p.
- Subbarao G.V., Nakahara K., Ishikawa T., Ono H., Yoshida M., Yoshihashi T., *et al.*, 2013. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization. *Plant Soil*, 366, 243-259. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1419-9>
- Sultan B., Defrance D., Iizumi T., 2019. Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Sci. Rep.* 9, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49167-0>
- Thomas H.L., Pot D., Jaffuel S., Verdeil J.-L., Baptiste C., Bonnal L., *et al.*, 2021. Mobilizing sorghum genetic diversity: Biochemical and histological-assisted design of a stem ideotype for biomethane production. *GCB Bioenergy*, 13, 1874-1893. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12886>
- Tongwane M., Mdlambuzi T., Moeletsi M., Tsubo M., Mliswa V., Grootboom L., 2016. Greenhouse gas emissions from different crop production and management practices in South Africa, *Environmental Development*, 19, 23-35.
- Traore A., Falconnier G.N., Couédel A., Sultan B., Chimonyo V.G.P., Adam M., Affholder F., 2023. Sustainable intensification of sorghum-based cropping systems in semi-arid sub-Saharan Africa: The role of improved varieties, mineral fertilizer, and legume integration. *Field Crops Res.* 304, 109180. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109180>

- Trébuil G., Hossain M., 2004. *Le Riz, enjeux écologiques et économiques*, Belin, Paris, 263 p.
- Tuong T.P., Bouman B.A.M., 2003. Rice production in water-scarce environments. In: Kijne J.W., Barker R., Molden D. (eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. CABI Publishing, 53-67. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/epdf/10.1079/9780851996691.0053>
- Warren R., Price J., Forstenhäusler N., Andrews O., Brown S., Ebi K., et al., 2024. Risks associated with global warming of 1.5 to 4°C above pre-industrial levels in human and natural systems in six countries, *Climatic Change*, 177(3): 48.
- Williams A., White N., Mushtaq S., Cockfield G., Power B., Kouadio L., 2015. Quantifying the response of cotton production in eastern Australia to climate change. *Climatic Change*, 129, 183-196.
- Wu F., Guo S., Huang W., Han Y., Wang Z., Feng L., et al., 2023. Adaptation of cotton production to climate change by sowing date optimization and precision resource management. *Industrial Crops and Products*, 203, 117167.
- Zimmermann A., Webber H., Zhao G., Ewert F., Kros J., Wolf J., et al., 2017. Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. *Agricultural Systems*, 157, 81-92.

Chapitre 14

Palmier à huile : construire la résistance climatique

Alain Rival, Cécile Chéron-Bessou

Le palmier à huile (*Elaeis guineensis* et *oleifera*) représente encore l'archétype de la monoculture intensive développée dans les plantations pérennes. Cultivé sur 24Mha dans la ceinture intertropicale, son système d'exploitation a peu évolué depuis un siècle (Rival et Chalil, 2023). Le développement à grande échelle de cette culture, même s'il s'est sensiblement ralenti au cours de la dernière décennie (Gaveau *et al.*, 2022), suscite encore nombre de questions de recherche récurrentes concernant la durabilité de la production.

La controverse qui accompagne depuis plus de trente ans le développement du palmier à huile concerne aussi la gestion du changement climatique dans une filière très mondialisée et en pleine mutation. L'héritage colonial a ainsi façonné une géopolitique basée sur l'exploitation des ressources au Sud (plantations) et la transformation au Nord (raffinage, transformation industrielle et distribution). Ce paysage change vite : les industriels du Sud (Indonésie, Malaisie, Colombie, Thaïlande) investissent progressivement les activités de l'aval de la filière, y compris la production d'agrocarburants. La filière palmier reste liée aux échanges intercontinentaux, avec un rôle croissant dévolu aux géants asiatiques (Chine et Inde), à la fois dans la consommation d'huile brute et dans sa transformation. La raréfaction de la main-d'œuvre rurale (il manquait 20% de la force de travail disponible dans les plantations dans les années précédant la Covid-19) va contraindre la filière à des évolutions rapides, notamment en matière de mécanisation et d'automatisation.

La faible résilience climatique des systèmes de culture actuels se révèle lorsque surviennent des sécheresses extrêmes, avec des conséquences mesurables sur la productivité. En Asie du Sud-Est, les épisodes El Niño de 2015 puis de 2019 ont mis en évidence la faible résilience climatique des systèmes d'exploitation en cours, villageois comme industriels. Les sécheresses intenses ont pour conséquence directe de bloquer les échanges gazeux et la capacité photosynthétique des palmiers. Simultanément, les brouillards secs générés par les feux de forêt et l'écobuage incontrôlé viennent fortement diminuer la productivité des plantations. Le palmier à huile présente en outre la propriété de bifurquer vers une floraison mâle quand les conditions agroclimatiques deviennent défavorables, avec une incidence sur la productivité mesurable sur plusieurs années (Monzon *et al.*, 2021).

Les pertes de biodiversité liées à l'expansion des plantations au détriment des forêts tropicales ont un impact direct sur le fonctionnement des écosystèmes à l'intérieur et autour des plantations (Meijaard *et al.*, 2020). Ainsi, les plantations de palmiers à huile peuvent contribuer au changement climatique, notamment par la

déforestation, tout en étant fragilisées par les risques liés à ce changement. Ces déséquilibres dans les écosystèmes affectent non seulement la fréquence et l'intensité des précipitations auxquelles le palmier est très sensible, mais également le cortège de nuisibles (ou, au contraire, de pollinisateurs) rendant la plante plus vulnérable aux changements climatiques.

1. Situation de la filière

L'huile de palme est l'huile végétale la plus consommée au monde; la demande s'est accélérée avec l'émergence de nouveaux débouchés dans le secteur des agrocarburants, s'ajoutant aux utilisations alimentaires et oléochimiques traditionnelles (Rival et Levang, 2013). Cette forte croissance a indéniablement contribué au développement économique des principaux pays producteurs, principalement l'Indonésie et la Malaisie, qui fournissent désormais 83 % de la demande mondiale (USDA, 2023). Le secteur est une source clé de réserves de change, ainsi qu'un instrument majeur de réduction de la pauvreté et de développement économique rural (Feintrenie *et al.*, 2010; Rist *et al.*, 2010). À l'échelle mondiale, l'huile de palme fournit 40 % de la demande mondiale en huile végétale sur un peu moins de 6 % des terres utilisées pour produire toutes les huiles végétales. Pour obtenir la même quantité d'huile à partir d'autres sources comme le soja, le colza ou le tournesol, il faudrait mettre en culture entre quatre et dix fois plus de terres. Les avantages comparatifs de l'huile de palme par rapport aux huiles végétales concurrentes reposent encore sur de faibles coûts de production qui résultent structurellement de l'abondance des terres arables, de la productivité naturelle élevée de la culture et du faible coût de la main-d'œuvre (Meijaard *et al.*, 2024).

La production mondiale d'huile de palme approche aujourd'hui 80 Mt, pour une superficie totale cartographiée de 24 Mha, dont 40 % d'exploitations industrielles de palmiers à huile et 60 % de petits exploitants. Ces deux types d'exploitants ont des impacts directs bien différents sur le changement climatique. Les petits exploitants familiaux (moins de 40 ha) suivent des systèmes d'exploitation différents de ceux des grands périmètres agro-industriels, basés sur l'utilisation intensive d'intrants (engrais chimiques principalement). Les petits planteurs restent handicapés par le manque d'accès à un matériel végétal adapté et sélectionné, même si les filières semencières ont fait d'énormes progrès dans leur capacité de diffusion du progrès génétique. Les capacités d'adaptation et d'atténuation, par manque de moyens et de ressources, seront beaucoup plus faibles dans les plantations villageoises que dans les grands périmètres agro-industriels. Certaines sociétés de plantation, en Amérique latine comme en Asie du Sud-Est, ont développé des systèmes d'irrigation permettant de faire face aux sécheresses récurrentes et d'intensité plus forte.

En Afrique, la proportion de la production d'huile de palme assurée par les petits planteurs est de plus de 80 % dans la plupart des pays producteurs (Côte d'Ivoire, Cameroun, Nigeria). Ces systèmes utilisent très peu, voire pas du tout, d'intrants chimiques et reposent sur l'exploitation de matériel végétal non amélioré, conduisant à des rendements faibles et à une vulnérabilité prononcée aux événements climatiques extrêmes.

Au cours de la dernière décennie, l'Indonésie a réussi à réduire de manière remarquable la déforestation pour la production d'huile de palme. En 2018-2022, la déforestation pour l'huile de palme était de 32 406 ha/an, soit 18 % du pic atteint dix années plus tôt. Il est important de noter que la déforestation a diminué au cours d'une

période d'expansion continue de la production d'huile de palme. Les données récentes montrent une augmentation inquiétante de 18 % de la déforestation liée à l'huile de palme, bien qu'elle soit restée inférieure à celle enregistrée au cours des années précédentes. Les provinces forestières de Kalimantan ont été les plus durement touchées, représentant 72 % de l'ensemble de la déforestation liée à l'huile de palme en Indonésie pour la période 2018-2022. L'île de Sumatra a vu la déforestation pour l'huile de palme multipliée par 3,7 en 2022 par rapport à 2020.

La nouvelle législation européenne, le règlement EUDR (European Union Deforestation Regulation), interdit la vente de marchandises issues de la déforestation ou de la dégradation des forêts. Cette mesure vise à limiter l'impact environnemental des produits, notamment agricoles et forestiers, importés dans l'UE (Gilbert, 2024). En règle générale, les opérateurs (y compris les non-PME) doivent faire preuve de diligence raisonnable à l'égard de tous les produits entrant dans le champ d'application du règlement, auprès de chacun de leurs fournisseurs. Ils doivent mettre en place un système de diligence raisonnable. Les opérateurs s'approvisionnant entièrement en produits de base dans des zones classées à faible risque seront soumis à des obligations de diligence raisonnable simplifiées. Alors qu'il devait s'appliquer à la fin de l'année 2024, de nombreuses voix, en Europe comme dans les pays du Sud, ont demandé un report du règlement. En effet, la nouvelle réglementation requiert la mise en place *de novo* d'un système de traçabilité des approvisionnements, régulièrement mis à jour et appuyé par une cartographie fiable des parcelles. Sur le terrain, les principales difficultés concernent l'absence de relevés cadastraux et de titres de propriété, principalement pour les petits propriétaires exploitants indépendants. Les principaux pays producteurs, en particulier l'Indonésie et la Malaisie, ont ainsi demandé un report du règlement, jugé nécessaire à la mise en place des mesures de vérification. La Commission européenne avait proposé de reporter d'une année son entrée en vigueur, du 30 décembre 2024 au 30 décembre 2025. Le Parlement européen a ensuite voté pour créer une nouvelle catégorie de pays considérés comme « sans risque », et qui seraient exemptés de certaines obligations. Le report de la loi a été finalement publié au Journal officiel de l'UE le 23 décembre 2024, de sorte que le règlement européen sur le contrôle des exportations sera appliqué à partir du 30 décembre 2025 par les moyennes et grandes entreprises, et à partir du 30 juin 2026 par les petites et microentreprises. L'avenir du règlement EUDR sur le long terme reste donc incertain, alors qu'il concerne l'un des textes les plus importants de l'Union européenne en matière d'environnement.

L'introduction de systèmes biodiversifiés susceptibles d'offrir une meilleure résilience climatique que les plantations monospécifiques développées sur le modèle post-colonial est en cours d'expérimentation (Rival *et al.*, 2023; Zemp *et al.*, 2023; Masure *et al.*, 2023) dans plusieurs pays.

2. Les impacts du changement climatique dans le cas du palmier à huile

2.1. Impacts sur les rendements

La faible résilience climatique des systèmes de production d'huile de palme est observable dans la figure 14.1, qui montre des oscillations dans la production d'huile de palme notamment à la suite de l'épisode El Niño-Southern Oscillation (ENSO) qui s'est produit en Asie du Sud-Est en 2015.

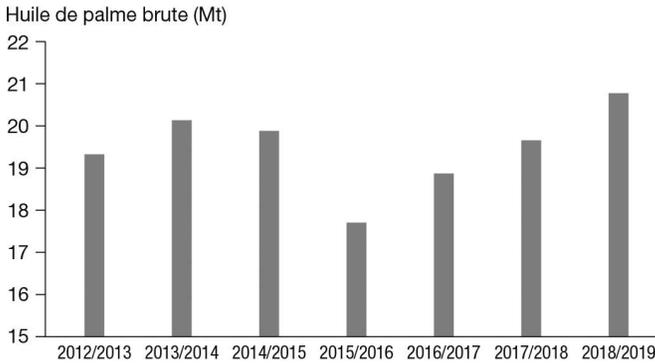


Figure 14.1. Production d'huile de palme brute en Malaisie. Source : USDA-FAS (2012-2019).

En 2015, les plantations malaisiennes ont dû faire face au double impact provoqué par la sécheresse extrême. Elles ont été affectées directement par les réponses induites par le stress hydrique, telles que les changements dans le sex-ratio qui aura des répercussions décalées dans le temps, et la baisse du développement des fruits et de la synthèse d'huile. En outre, elles ont subi indirectement l'impact des feux de brousse liés aux activités d'écobuage dans et autour des plantations, qui a limité l'activité photosynthétique des palmiers durant des mois, lorsque d'épais brouillards secs recouvraient l'ensemble de la région (Khor *et al.*, 2021).

Stiegler *et al.* (2019) ont montré que les conditions de brume mesurées durant l'épisode ENSO ont entraîné une pause complète de l'assimilation nette de carbone chez le palmier à huile, qui a duré près d'un mois et demi, et cette situation s'est révélée être à l'origine d'une baisse du rendement du palmier à huile de 35%. Le modèle développé par Stiegler *et al.* (2019) a également permis de démontrer qu'une intensification de la sécheresse pouvait diminuer significativement l'absorption nette de CO₂. Les brouillards secs très épais, lorsqu'ils sont aggravés par la sécheresse, peuvent induire des pertes conséquentes de productivité et d'absorption nette de CO₂ par les peuplements de palmiers à huile.

D'autre part, Eycott *et al.* (2019) ont émis l'hypothèse que les pertes de biodiversité liées à l'expansion des plantations de palmiers à huile aux dépens des forêts humides ont entraîné une série d'impacts mesurables sur le fonctionnement de l'écosystème à l'intérieur de la plantation de palmiers ainsi que sur la résilience de ces fonctions aux changements de régimes pluviométriques, avec un impact réel sur le rendement.

2.2. Impacts sur la pression phytosanitaire

Le dérèglement climatique affecte tous les êtres vivants, y compris les nuisibles ou les agents pathogènes des cultures. Pendant des décennies, les plantations de palmiers à huile ont été protégées grâce au confinement des agents pathogènes dans des contextes spécifiques, limités géographiquement. La sélection variétale a alors permis de développer des génotypes résistants/tolérants en réponse à ces contraintes. D'autre part, des mesures de quarantaine ont limité les risques de contamination. Le changement climatique est hautement susceptible de modifier ces cloisonnements. Si les zones de culture favorables se déplacent, les agents pathogènes suivront, tandis que les dynamiques au sein des cortèges de proies-prédateurs peuvent également être directement affectées par les dérèglements.

Le palmier à huile est historiquement sensible à deux agents pathogènes principaux, les champignons *Ganoderma* en Asie, *Fusarium* en Afrique, et la pourriture du cœur (*bud rot*) en Amérique latine, due à des cortèges variables d'agents pathogènes (Merciere *et al.*, 2017; Paterson *et al.*, 2013). Ces auteurs ont modélisé comment le changement climatique pourrait influencer l'impact de ces agents pathogènes, en simulant à la fois les effets directs sur ces derniers et les effets indirects liés au déplacement des plantations vers de nouvelles zones. Dans les zones de production actuelles, la pression est susceptible d'augmenter du fait d'une fragilité accrue des palmiers dans un contexte changeant rapidement et se détériorant dans certaines zones actuellement favorables (Paterson *et al.*, 2013; Paterson, 2019). Par ailleurs, certains agents pathogènes passent par des vecteurs tels que les insectes, dont le développement est stimulé par l'augmentation des températures, augmentant ainsi les risques parasitaires pour le palmier à huile (Paterson et Lima, 2010). Enfin, les déplacements d'humains et de leurs moyens de production, en raison des migrations climatiques, vont entraîner le déplacement des agents pathogènes, le décroisement des risques et la propagation d'agents pathogènes existants ou l'adaptation de nouveaux vecteurs. Les effets négatifs pourraient être partiellement compensés par la propagation des plantations de palmiers dans de nouvelles zones vierges de parasites — un phénomène identifié comme *parasites lost* — mais la probabilité et l'étendue de ce phénomène sont difficilement quantifiables (Paterson *et al.*, 2013).

À cause du manque de connaissances actuelles sur les cycles de développement et d'infestation des agents pathogènes et les nombreuses incertitudes sur les effets indirects du changement climatique, il est difficile de prédire les tendances globales en ce qui concerne la pression phytosanitaire. Néanmoins, il est indéniable que les incertitudes face aux risques vont fortement augmenter, réduisant d'autant les marges de manœuvre connues. Les lacunes scientifiques et agronomiques actuelles sont déjà préjudiciables pour les solutions à trouver prochainement.

3. Bilan carbone et solutions d'atténuation

L'approche mise en œuvre en analyse du cycle de vie (ACV) ou dans des calculateurs de bilan carbone basés sur l'ACV permet de quantifier l'ensemble des sources de gaz à effet de serre (GES). Divers travaux ont mis en évidence les principales sources de GES et les possibilités d'atténuation, notamment le calculateur PalmGHG basé sur les normes ACV (ISO 14040 et 14044, 2006). Ce calculateur a été développé par la RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) pour permettre aux producteurs d'huile de palme d'estimer et de surveiller leurs émissions nettes de GES et ainsi d'identifier et de contrôler les zones à risques dans leur chaîne de production (Bessou *et al.*, 2014).

La principale source de GES intervient au moment de l'implantation des palmeraies, si celles-ci sont établies après une déforestation ou un drainage de tourbières ou de marécages (Bessou *et al.*, 2014; Cooper *et al.*, 2020; Schmidt, 2010). Les facteurs d'émissions pour les forêts tourbières reconverties se situent entre 70 et 117 t eqCO₂/ha/an (intervalle de confiance [IC] de 95%), le CO₂ et le N₂O étant responsables d'environ 60% et 40% de cette valeur. Ces émissions suggèrent que la conversion des tourbières en Asie du Sud-Est contribue entre 16,6% et 27,9% du total combiné des émissions nationales de GES de la Malaisie et de l'Indonésie, soit entre 0,44 et 0,74% (IC de 95%) des émissions mondiales annuelles (Cooper *et al.*, 2020).

Par ailleurs, les plantations de palmiers à huile nécessitent des apports d'engrais qui représentent 46% à 85% des coûts de production et qui contribuent substantiellement aux impacts environnementaux tels que l'acidification des terres et le changement climatique. Ces apports d'engrais sont la deuxième source de GES, notamment pour les systèmes très intensifs, voire la première source lors de plantation sans déforestation et sur sols minéraux. Selon les types d'engrais minéraux et leurs origines, les étapes de production et de transport contribuent plus ou moins au bilan carbone. Mais l'essentiel des GES est lié aux émissions lors de ces apports en plantation. Les pratiques agro-écologiques permettent de réduire les intrants tout au long du cycle de culture. Durant la phase immature de la culture, une couverture temporaire du sol avec des légumineuses a pour avantages de recycler les nutriments provenant de la décomposition des stipes de la récolte précédente et d'empêcher le développement des mauvaises herbes. Ensuite, tout au long du cycle cultural, le recyclage dans les plantations de coproduits abondants et très diversifiés améliore la teneur en éléments nutritifs du sol et ses propriétés physico-chimiques et biologiques (Bessou *et al.*, 2017). Les plantations de palmiers à huile peuvent générer environ 16 t/ha/an de coproduits, en plus de la production d'huile de palme et de palmiste (environ 5 t/ha/an). Dans les grandes plantations agro-industrielles, les rafles sont le plus souvent cocompostées, notamment avec les effluents liquides produits des usines d'extraction de l'huile, augmentant ainsi la valeur nutritive et la stabilité de l'amendement tout en réduisant les coûts de transport ainsi que les impacts environnementaux du traitement des effluents (Baron *et al.*, 2019). Les résultats de l'ACV ont mis en évidence que le compostage des résidus organiques peut remplacer 10% à 25% des engrais synthétiques, tout en réduisant sensiblement l'impact sur le changement climatique. Malgré les grandes quantités de coproduits générées, la demande au sein ou en dehors de la chaîne de valeur peut dépasser l'offre, de sorte que les questions de concurrence et de transfert de fertilité devront être précisément étudiées pour caractériser les pratiques durables à l'échelle du paysage.

La dernière source significative de GES est les émissions de CH₄ durant le traitement en anaérobiose des effluents liquides des huileries. Des techniques de captage et de recyclage existent et se développent rapidement dans les grandes industries. À plus petite échelle, la meilleure option est de valoriser ces effluents durant le compostage qui nécessite une humidification régulière.

Les sources de GES et les leviers d'atténuation pour la production d'huile de palme sont connus. Les critères de la RSPO ont d'ailleurs été ajustés au cours des mises à jour en prenant en compte ces résultats avec, notamment, des critères beaucoup plus drastiques concernant les plantations sur tourbières et des obligations de plans de réduction des GES (RSPO, 2018). Néanmoins, à l'échelle globale, les risques demeurent soit en matière d'expansion des terres cultivées de manière non climato-intelligente pour des raisons politiques et économiques soit du fait du manque de connaissances ou d'accès à l'information concernant la qualité des sols et les apports climato-intelligents, combinant des apports organiques recyclés et le maintien d'une couverture du sol protectrice.

4. Évolution prédite de la zone de production

Les régions tropicales continuent à être explorées pour étendre la culture du palmier à huile en réponse à l'accroissement des besoins alimentaires et énergétiques (Tapia *et al.*, 2021), alors que des études de modélisation indiquent que le climat va devenir

progressivement moins propice à la culture du palmier à huile (Paterson *et al.*, 2017). Ces auteurs estiment ainsi que la proportion de surfaces inadaptées augmenterait de 6 %, tandis que les zones hautement favorables diminueraient de 22 % d'ici à 2050. Une forte diminution de l'aptitude à la culture est anticipée, avec une chute spectaculaire d'ici 2100, suggérant l'apparition de régions totalement inadaptées, bien qu'elles soient actuellement propices à la culture du palmier à huile. De nombreuses régions productrices d'Amérique latine et d'Afrique (Brésil, Colombie et Nigeria) devraient ainsi connaître une régression spectaculaire des surfaces aptes à la culture du palmier à huile. *A contrario*, d'autres régions subtropicales pourraient devenir exploitables pour le palmier à huile et intéressantes en ce qui concerne l'historique parasitaire vierge (Paterson et Lima, 2011). Selon les modélisations de la FAO et de l'IIASA, avec le modèle GAEZ v4.0 (2021), les rendements potentiels en huile de palme en 2040 diminueraient globalement avec plus de zones où les rendements diminueraient comparées à celles où les conditions permettraient une nouvelle production ou une augmentation de rendement par rapport à 2010 (figure 14.2).

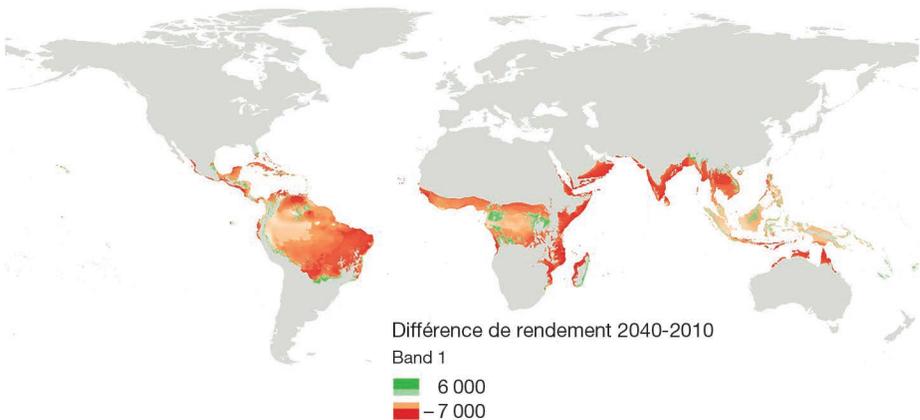


Figure 14.2. Différences de rendements potentiels en huile de palme entre 2010 et 2040. Source : Chéron-Bessou ; données FAO/IIASA, modèle GAEZ v4.0 (2021).

En kg d'huile CPO – Crude Palm Oil – par hectare, sans irrigation, haut niveau d'intrants ; le rouge signifie une baisse de rendement, le vert une hausse.

Le récent rapport du Giec (Shaw *et al.*, 2022) souligne que les pays du Sud-Est asiatique (où sont concentrés près de 90 % de la production mondiale d'huile de palme) sont régulièrement identifiés comme les plus vulnérables aux risques climatiques, avec des secteurs clés tels que l'agriculture, les villes, les infrastructures ou les écosystèmes terrestres, qui devraient être fortement exposés à de multiples aléas. En raison de leur développement rapide et de leur forte population, les pays asiatiques émettent de plus en plus de GES, même si les émissions par habitant et les émissions cumulées sont relativement plus faibles que dans les économies développées.

Le palmier à huile est une plante de domestication et d'exploitation à grande échelle relativement récentes. Son développement rapide, chez les petits planteurs comme chez les agro-industriels, a conduit (pour le palmier comme pour toutes les espèces végétales) à une réduction de la base génétique utile, principalement guidée par la rentabilité à l'hectare. La mise au point de variétés résistantes au *Fusarium* puis au

Ganoderma a encore rétréci cette base génétique, réduisant encore l'agrobiodiversité exploitable. Chez le palmier à huile, l'amélioration variétale progresse au rythme imposé par une culture pérenne de cycle long. Créer, multiplier et évaluer un nouveau cultivar va demander près de cinquante ans de recherche : l'inflexion des programmes de recherche et développement vers la résistance à la sécheresse est en cours pour encore longtemps...

5. Conclusion

Face à l'urgence des réponses à apporter pour contrer et s'adapter au changement climatique, les filières de production d'huile de palme se trouvent aujourd'hui à la croisée des chemins (Rival et Chalil, 2023; Rival et Bessou, 2023). Dans un secteur totalement mondialisé et soumis à des défis multiples, le *statu quo* n'est plus de mise : des réponses urgentes et concrètes sont nécessaires pour transformer en profondeur ces systèmes de production.

Le règlement européen sur la déforestation importée¹ entend mettre fin à l'importation de produits issus de la déforestation sur le continent tels que le cacao, le café, le soja, l'huile de palme, le bois, la viande bovine, mais aussi le caoutchouc. Le règlement sur la déforestation pourrait permettre une baisse de la déforestation globale de 10%, selon l'étude d'impact de la Commission européenne, et ferait de l'Union européenne un pionnier sur le sujet, mais les incertitudes autour de son application restent nombreuses.

Le changement climatique agit comme un révélateur des faiblesses avérées d'une filière solide, mais qui doit amorcer des mutations profondes. Face aux incertitudes croissantes liées au contexte géopolitique mondial, la transition agroécologique des systèmes de production doit être une priorité pour les scientifiques, les décideurs politiques et l'industrie du palmier à huile dans tous les pays producteurs.

6. Références bibliographiques

Baron V., Saoud M., Jupesta J., Praptantyo I.R., Admojo H.T., Bessou C., Caliman J.P., 2019. Critical parameters in the life cycle inventory of palm oil mill residues composting. *IJoLCAS*, 3(1): 19.

Bessou C., Chase L.D.C., Henson I.E., Abdul-Manan AFN., Milà I., Canals L., *et al.*, 2014. Pilot application of PalmGHG, the RSPO greenhouse gas calculator for oil palm products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.008>

Bessou C., Verwilghen A., Beaudoin-Ollivier L., Marichal R., Ollivier J., *et al.*, 2017. Agroecological practices in oil palm plantations: examples from the field. *OCL*, 24(3). <https://doi.org/10.1051/o cl/2017024>

Cooper H., Evers S., Aplin P., Crout N., Dahalan M.P.B., Sjogersten S., 2020. Greenhouse gas emissions resulting from conversion of peat swamp forest to oil palm plantation. *Nat Commun*, 11, 407. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14298-w>

Eycott A.E., Advento A.D., Waters H.S., Luke S.H., Aryawan A.A.K., Hood A.S., *et al.*, 2019. Resilience of ecological functions to drought in an oil palm agroecosystem. *Environmental Research Communications*, 1(10): 101004.

FAO et IIASA, 2021. Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v4) – Data Portal user's guide. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb5167en>.

1. <https://www.deforestationimportee.ecologie.gouv.fr/reglement-europeen-contre-la-deforestation-et-la-degradation-des-forets/article/reglement-europeen-contre-la-deforestation-et-la-degradation-des-forets>.

- Feintrenie L., Chong W.K., Levang P., 2010. Why do farmers prefer oil palm? Lessons learnt from Bungo district, Indonesia. *Small-scale forestry*, 9, 379-396.
- Gaveau D.L., Locatelli B., Salim M.A., Husnayaen, Manurung T., Descals A., *et al.*, 2022. Slowing deforestation in Indonesia follows declining oil palm expansion and lower oil prices. *PLoS one*, 17(3), p.e0266178.
- Gilbert C.L., 2024. The EU Deforestation Regulation. *EuroChoices*, 23(3), 64-70. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12436>
- Khor J.F., Ling L., Yusop Z., Tan W.L., Ling J.L., Soo E.Z.X., 2021. Impact of El Niño on oil palm yield in Malaysia. *Agronomy*, 11(11), 2189.
- Masure A., Martin P., Lacan X., Rafflegeau S., 2023. Promoting oil palm-based agroforestry systems: an asset for the sustainability of the sector. *Cahiers Agricultures*, 32, 16.
- Meijaard E., Brooks T.M., Carlson K.M., Slade E.M., Garcia-Ulloa J., Gaveau D.L., *et al.*, 2020. The environmental impacts of palm oil in context. *Nature plants*, 6(12), 1418-1426.
- Meijaard E., Virah-Sawmy M., Newing H.S., Ingram V., Holle M.J.M., Pasmans T., *et al.*, 2024. Exploring the future of vegetable oils. Oil crop implications – Fats, forests, forecasts, and futures. Gland, Switzerland: IUCN, and SNSB. <https://doi.org/10.2305/KFJA1910>
- Mercière M., Boulord R., Carasco-Lacombe C., Klopp C., Lee Y.-P., Tan J.-S., *et al.*, 2017. About *Ganoderma boninense* in oil palm plantations of Sumatra and peninsular Malaysia: Ancient population expansion, extensive gene flow and large-scale dispersion ability. *Fungal Biol.* 121, 529-540.
- Monzon J.P., Slingerland M.A., Rahutomo S., Agus F., Oberthür T., Andrade J.F., *et al.*, 2021. Fostering a climate-smart intensification for oil palm. *Nature Sustainability*, 4(7), 595-601.
- Paterson R.R.M., 2019. *Ganoderma boninense* Disease of Oil Palm to Significantly Reduce Production After 2050 in Sumatra if Projected Climate Change Occurs. *Microorganisms*, 7(1): 24. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7010024>
- Paterson R.R.M., Lima N., 2010. How will climate change affect mycotoxins in food? *Fd. Res. Int.* 43, 1902e1914.
- Paterson R.R.M., Lima N., 2011. Further mycotoxin effects from climate change. *Fd. Res. Int.* 44, 2555e2566.
- Paterson R.R.M., Kumar L., Shabani F., Lima N., 2017. World climate suitability projections to 2050 and 2100 for growing oil palm. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5), 689-702.
- Paterson R.R.M., Sariah M., Lima N., 2013. How will climate change affect oil palm fungal diseases? *Crop Protection*, 46: 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.12.023>
- Rist L., Feintrenie L., Levang P., 2010. The livelihood impacts of oil palm: smallholders in Indonesia. *Biodiversity and conservation*, 19, 1009-1024.
- Rival A., 2017. Breeding the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) for climate change. *OCL*, 24 (1): D107. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017001>
- Rival A., Ancrenaz M., Lackman I., Burhan S., Zemp C., Firdaus M., Djama M., 2023. Innovative planting designs for oil palm-based agroforestry. *Agroforestry Systems*, 99(1), p.27.
- Rival A., Bessou C., 2023. Climate change is challenging oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production systems. In: Abul-Soad A.A., Al-Khayri J.M., (eds.), *Cultivation for enhanced climate change resilience. Volume 1: Tropical fruit trees*. CRC Press, 109-126.
- Rival A., Chalil D., 2023. Oil palm plantation systems at a crossroad. *OCL*. 30, 28. <https://doi.org/10.1051/ocl/2023029>
- Rival A., Levang P., 2013. *La palme des controverses : palmier à huile et enjeux de développement*. Versailles, éditions Quæ.
- RSPO, 2018. Principles and Criteria For the Production of Sustainable Palm Oil, Endorsed by the RSPO Board of Governors and adopted at the 15th Annual General Assembly by RSPO Members on 15 November, 2018
- Schmidt J.H., 2010. Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. *Int J Life Cycle Assess* 15(2): 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0142-0>

Partie 2. Les systèmes agricoles et alimentaires, et le secteur des terres

Shaw R., Luo Y., Cheong T.S., Abdul Halim S., Chaturvedi M., Hashizume G.E., *et al.*, 2022: Asia. *In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 1457-1579. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.012>

Stiegler C., Meijide A., Fan Y., Ashween Ali A., June T., Knohl A., 2019. El Nino Southern Southern Oscillation (ENSO) event reduces CO₂ uptake of an Indonesian oil palm plantation. *Biogeosciences*, 16(14): 2873-2890.

Tapia J.F.D., Doliente S.S., Samsatli S., 2021. How much land is available for sustainable palm oil? *Land Use Policy*, 102, 105187.

USDA - United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>

Zemp D.C., Guerrero-Ramirez N., Brambach F., Darras K., Grass I., Potapov A., *et al.*, 2023. Tree islands enhance biodiversity and functioning in oil palm landscapes. *Nature*, 618, 316-321. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06086-5>

Chapitre 15

Les productions horticoles face au changement climatique

*Éric Malézieux, Damien Beillouin, Raphaël Belmin, Isabelle Grechi,
Rémi Kahane, Thibaud Martin, Fabrice Le Bellec*

1. Introduction : le changement climatique, une menace pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale

Aujourd'hui, dans le monde, plus de deux milliards d'individus souffrent de carences en micronutriments, et près de trois milliards d'individus n'ont pas les moyens de s'offrir une alimentation saine et nutritive (FAO, 2020). Or les produits alimentaires de l'horticulture, fruits, légumes, plantes aromatiques et médicinales, de par leur richesse en fibres, vitamines, et composés minéraux essentiels comme le fer, contribuent de manière décisive à une alimentation diversifiée et riche. La recommandation de la FAO et de l'OMS, à savoir consommer plus de 400 g de fruits et légumes frais par jour et par personne, n'est cependant atteinte que dans certaines régions d'Asie et parmi les populations aisées des pays industrialisés, contrairement aux pays à faible revenu, particulièrement en déficit. La consommation durable de fruits et légumes variés constitue donc une préoccupation centrale pour la sécurité alimentaire mondiale. Or le changement climatique affecte directement et indirectement les productions horticoles en raison de leur périssabilité et de leur sensibilité aux facteurs biotiques et abiotiques. Dans ce contexte, comment la grande diversité des fruits et légumes cultivés peut-elle offrir aux agriculteurs davantage de possibilités pour s'adapter et devenir moins vulnérables aux aléas climatiques ? Ce chapitre analyse les principaux impacts et risques induits par le changement climatique, et tente d'identifier les voies d'adaptation en cours dans les différents systèmes horticoles du monde.

2. Les impacts du changement climatique sur les productions horticoles

Les productions horticoles vont être affectées par le changement climatique par trois principales voies : en modifiant l'efficacité physiologique des plantes, leur phénologie, et finalement les quantités disponibles et la qualité des produits récoltés, en modifiant la répartition géographique de certaines espèces horticoles à l'échelle mondiale, et en modifiant les contraintes biotiques liées aux bioagresseurs et leurs dégâts sur les cultures, tout autant que les populations d'auxiliaires, les pollinisateurs et les micro-organismes du sol.

2.1. Impacts sur la physiologie et la phénologie des plantes, sur les rendements et sur la qualité des produits

L'augmentation des concentrations de CO₂ favorise des rendements plus élevés des cultures, particulièrement chez les plantes en C₃, où l'efficacité de la photosynthèse

est limitée par les concentrations atmosphériques actuelles de CO₂ (Scheelbeek *et al.*, 2018). Cela s'explique par une augmentation de la photosynthèse et par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau. Cependant, ces effets peuvent être atténués en présence d'autres facteurs de stress environnementaux (comme l'augmentation de l'O₃ et des températures), ou bien par l'acclimatation photosynthétique sur le long terme (Kimball *et al.*, 2007). L'augmentation des concentrations de CO₂ aurait aussi des effets négatifs sur la qualité nutritionnelle des plantes en C3, avec une diminution de la teneur en minéraux majeurs (Loladze, 2014).

Dans les régions tropicales, les températures atteignent déjà, voire dépassent, les seuils optimaux des plantes à certaines périodes de l'année. Ces seuils dépendent en partie de leur métabolisme carboné : les plantes en C3, comme la tomate et la plupart des plantes horticoles, prospèrent à des températures optimales de 20°C à 32°C, tandis que les plantes en C4, comme le maïs doux, tolèrent des températures jusqu'à 34°C. Lors des épisodes de chaleur, l'efficacité de la photosynthèse diminue ; la respiration des plantes augmente. Les épisodes de chaleur ont des effets néfastes sur le nombre, la morphologie et le fonctionnement des organes reproducteurs des plantes. Une élévation des températures peut aussi entraîner de fortes baisses des rendements en affectant la fécondation. Cela peut passer par une altération de la réceptivité des stigmates ou par le désynchronisme entre les périodes de vol des pollinisateurs et les périodes de floraison des cultures (Duchenne *et al.*, 2019). L'exposition des cultures à des températures élevées (El Niño de 2015-2016 et 2023-2024 en Amérique centrale et du Sud) peut aussi entraîner des troubles physiologiques altérant l'apparence des produits, et modifier leur qualité organoleptique et nutritionnelle (Moretti *et al.*, 2010 ; Christopoulos et Ouzounidou, 2021 ; Kishor *et al.*, 2023). Les plantes cultivées sous abri sont aussi exposées à ce risque (Fink *et al.*, 2009). De plus, le manque de période plus froide peut perturber la levée de dormance de certains arbres fruitiers, légumes vivaces ou bisannuels, tel l'oignon, et le déclenchement de la floraison de certaines espèces.

Le changement climatique modifie la disponibilité en eau pour les plantes, ce qui peut conduire à un stress hydrique qui a généralement un effet négatif sur la floraison, la nouaison, la rétention et la croissance des fruits. Une moindre disponibilité en eau diminue les rendements. Des baisses moyennes de l'ordre de 20 % de la production de fruits, de noix et de graines ont été observées lorsque la disponibilité en eau était réduite de 50 % (Alae-Carew *et al.*, 2020). Les stress hydriques affectent également les teneurs en sucres, acides et caroténoïdes, positivement ou négativement selon le stade de développement du fruit auquel ce stress est appliqué et le génotype (Ripoll *et al.*, 2016).

Les émissions de polluants, en entraînant une augmentation des concentrations de l'ozone troposphérique, posent un défi climatique supplémentaire pour les cultures horticoles. Ce gaz peut pénétrer les plantes par leurs stomates, endommager les structures cellulaires des feuilles et entraîner des baisses de rendement, un retard dans la maturation des fruits et une diminution de leur teneur en sucre.

Ainsi, le changement climatique, par le biais d'interactions entre le CO₂, la température, la disponibilité en eau et d'autres manifestations climatiques, altère de manière complexe à la fois les volumes et la qualité des productions horticoles. Les interactions avec d'autres facteurs (comme le cycle biologique, le matériel génétique, la localisation géographique, le mode de culture et les pratiques agricoles, le stade de la culture durant lequel intervient l'événement climatique) rendent la formulation d'une projection claire de l'impact du changement climatique encore plus difficile.

2.2. Les futures répartitions d'espèces horticoles : entre menaces et opportunités

Le changement climatique, en modifiant les conditions de croissance des plantes, a au fil des décennies transformé la répartition des zones de culture des espèces horticoles. Ce déplacement géographique affecte *in fine* la sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations. Avec un réchauffement climatique mondial de +2°C, la moitié des terres cultivables actuelles verraient la diversité potentielle des cultures diminuer, alors que les latitudes élevées connaîtraient, en revanche, une augmentation de la diversité potentielle des cultures, offrant ainsi des possibilités d'adaptation au changement climatique (Mahaut *et al.*, 2022). Globalement, des espèces originaires de climats chauds prospèrent déjà dans ces nouvelles zones (Lenoir *et al.*, 2008). En Espagne, les cultures subtropicales telles que les avocatriers et les manguiers occupent désormais 4% de la superficie totale des vergers (Esrce, 2018). En Afrique centrale, le changement climatique aurait des effets plutôt positifs sur les zones potentielles de culture des légumes racines, des tubercules et des bananes, mais affecterait négativement les zones de culture de la pomme de terre (Manners *et al.*, 2021). La majorité des données scientifiques sur les changements des aires de répartition des cultures se focalisent cependant sur quatre principales cultures de base : riz, maïs, blé et soja. Notre compréhension des impacts du changement climatique sur les cultures de fruits et légumes reste encore limitée.

2.3. Impact sur les bioagresseurs

Le changement climatique influence directement la prolifération et la distribution des arthropodes phytophages ainsi que des maladies virales et bactériennes qu'ils transmettent (Muilenburg et Herms, 2013; Skendžić *et al.*, 2021). Les arthropodes des zones tempérées devraient voir leurs populations augmenter, tandis que ceux des régions tropicales, vivant près de leur optimum thermique, pourraient être affectés négativement si les températures dépassent cet optimum ou atteignent leur seuil léthal (Bonebrake et Deutsch, 2012). Leur capacité à se disperser permettrait à certaines espèces de se déplacer vers des latitudes et des altitudes plus élevées, où les températures deviennent plus favorables.

Le changement des régimes de précipitations influence également les arthropodes (lessivage par les fortes pluies ou mortalité induite par une stagnation de l'eau dans le sol en phase tellurique). Par exemple le taux de mortalité des pupes de *Bactrocera zonata* augmente significativement avec la teneur en eau du sol (El-Gendy et AbdAllah, 2019). Selon Gely *et al.* (2020), la plupart des guildes d'insectes seraient affectées négativement par le stress hydrique, à l'exception des xylophages, des scolytes, des suceurs de sève et des mineuses de feuilles.

Les arthropodes phytophages seront également affectés par la disponibilité et la qualité de la plante hôte et par la perturbation du réseau trophique (Eigenbrode et Adhikari, 2023; Muilenburg et Herms, 2013; Skendžić *et al.*, 2021).

Le réchauffement peut augmenter ou diminuer la synchronisation phénologique entre les arthropodes, leurs plantes hôtes et leurs ennemis naturels (Forrest, 2016). Les asynchronies phénologiques devraient cependant moins concerner les régions tropicales.

Les plantes soumises à un environnement enrichi en CO₂ présentent des statuts physiologiques (rapport C/N, concentration d'azote, composés secondaires) qui peuvent réduire leur qualité nutritionnelle ou agir comme défenses contre les ravageurs.

Inversement, certains insectes broyeurs peuvent consommer davantage de tissus végétaux pour compenser la moindre qualité nutritionnelle de ces plantes.

Les agents pathogènes sont sensibles aux conditions abiotiques, en particulier la température et l'humidité relative, qui influencent directement leur cycle évolutif, ou indirectement la physiologie et la réponse immunitaire des plantes. Les effets du changement climatique sur les maladies des cultures fruitières tropicales varient, avec une sévérité qui pourrait augmenter (dans le cas du bananier et du champignon *Fusarium oxysporum*) ou diminuer (dans le cas du bananier et du champignon *Mycosphaerella fijiensis*) (Ghini *et al.*, 2011). À des températures élevées, les plantes pourraient être plus sensibles aux agents pathogènes en raison de la suppression de leur immunité (Singh *et al.*, 2023).

Le changement climatique modifie l'incidence des bioagresseurs sur les cultures. L'ampleur de ces modifications est toutefois difficile à prédire, surtout pour les productions horticoles, qui présentent une grande diversité spécifique et variétale. Les bioagresseurs et leurs ennemis naturels ne seront pas uniformément affectés, car les effets climatiques varient selon les espèces et selon les systèmes plante-bioagresseur, et dépendent de l'interaction des facteurs climatiques et du contexte environnemental. Les facteurs climatiques auront aussi des effets complexes sur les pollinisateurs, augmentant ou réduisant leur efficacité selon le contexte (Eigenbrode et Adhikari, 2023; IPBS, 2016).

3. S'adapter au changement climatique : les innovations en marche

L'adaptation des systèmes horticoles face au changement climatique se traduit par trois grandes stratégies d'adaptation : l'augmentation et la valorisation de la diversité cultivée et la sélection génétique pour des espèces moins exigeantes, la création d'un environnement plus favorable autour des cultures (du mulch à la serre hors-sol), et la bonne gestion des ressources, dont celle, essentielle, de l'eau. Ces stratégies d'adaptation s'appuient également sur des politiques publiques et sur des innovations territoriales.

3.1. L'adaptation des systèmes de culture

3.1.1. Les atouts de la diversité

L'horticulture englobe des espèces à cycles courts (annuels ou bisannuels) et à cycles longs (cinq à dix ans, voire supérieurs à dix ans), avec une grande diversité biologique (multiplication végétative ou sexuée, plantes herbacées ou ligneuses). Les fruits et légumes, en plus de leur diversité, sont cultivés dans un large éventail de systèmes de culture et de production, allant des systèmes vivriers plurispécifiques en permaculture sans intrant chimique (comme les jardins créoles, les microjardins vivriers) aux systèmes de monoculture intensive souvent monovariétaux, voire monoclonaux (bananes, ananas) utilisant de grandes quantités d'intrants chimiques, ou encore aux serres hors-sol avec atmosphère et flux nutritifs contrôlés, véritables « usines à plantes ». La résilience et l'adaptation de ces différents systèmes au changement climatique sont à l'évidence très différentes. Sans pouvoir détailler toutes les formes d'adaptation potentielles, il est crucial de souligner l'importance de la diversité des espèces dans un système donné pour fournir des services écosystémiques et pour assurer sa résilience face aux aléas climatiques (Kahane *et al.*, 2013; Malézieux *et al.*, 2009; Malézieux *et al.*, 2022; Beillouin *et al.*, 2021).

La diversité intraspécifique et les voies d'amélioration génétique constituent une autre forme d'adaptation. Pour faire face au changement climatique, la robustesse des cultivars traditionnels, dont il convient de conserver le patrimoine (biologique et immatériel comme les savoir-faire paysans), et la sélection variétale constituent deux voies complémentaires. Les variétés fortement améliorées, souvent hybrides, nécessitent pour la plupart des techniques intensives (irrigation, fertilisation, protection phytosanitaire) et des investissements financiers élevés, exposés aux risques climatiques. Les variétés dites « paysannes » profitent aux petites exploitations grâce à leur potentiel d'adaptation : jojoba, arganier, pois d'Angole, amarante pour l'aridité, niébé, haricot mongo pour les cycles courts, et variétés traditionnelles rustiques de gombo, roselle, aubergines africaines. Certaines cultures horticoles, oubliées ou négligées, maraîchères ou fruitières, aromatiques ou médicinales, offrent ainsi de nouvelles opportunités. Les systèmes semenciers paysans « informels » constituent un énorme réservoir de gènes d'intérêt face au changement climatique et favorisent aussi l'adoption de pratiques agroécologiques bénéfiques pour le petit paysanat. Les agriculteurs disposent également de marges de manœuvre en ajustant les calendriers de plantation et de semis, en favorisant les rotations et les associations de cultures, dont l'agroforesterie. Ces stratégies combinent la préservation du patrimoine biologique et immatériel, avec des innovations permettant de mieux adapter les cultures aux défis climatiques.

3.1.2. La gestion des ressources en eau

Le problème de l'approvisionnement en eau est particulièrement aigu au Maghreb et en Afrique subsaharienne, où les ressources en eau sont mal réparties et de plus en plus aléatoires. Dans ce contexte, des forages et des pompes coûteux sont parfois mis en œuvre. Dans de grands bassins de production comme la vallée du fleuve Sénégal, l'extension des surfaces irriguées est appuyée par des politiques d'aménagement financées par l'aide internationale. Ce choix, s'il répond à un besoin à court terme, dessine pour demain un modèle fragile et vulnérable, car dépendant d'une eau captée et acheminée à grand renfort d'énergie fossile (figure 15.1). D'autres projets encouragent l'adoption de techniques d'irrigation économes, comme le goutte-à-goutte, et tentent d'intégrer les savoir-faire des communautés paysannes dans les démarches de conception agroécologiques (Belmin *et al.*, 2022 et 2023a). Les agro-systèmes oasiens traditionnels du Maghreb et d'Afrique subsaharienne s'appuient par exemple sur des cultures multistrates (palmacées, arbres fruitiers et cultures maraîchères) qui conservent l'eau et réduisent l'évapotranspiration. Dans les zones semi-arides du Burkina Faso, les paysans utilisent la technique du « zaï », qui consiste à semer à sec dans des trous amendés avec du fumier, qui se remplissent ensuite d'eau à l'arrivée des premières pluies (Belmin *et al.*, 2023a). Dans certaines régions, la gestion des ressources en eau bénéficie de nouveaux apports technologiques (goutte-à-goutte, capteurs d'humidité, déclencheurs à distance, etc.), mais pour réussir elle doit s'appuyer avant tout sur une gouvernance humaine, sociale et solidaire, pour en rendre durables les effets, de la parcelle aux bassins-versants.

3.1.3. Les cultures protégées

Les serres, dans lesquelles les paramètres du climat sont maîtrisés, sont caractéristiques de l'horticulture. L'artificialisation du milieu peut même devenir complète dans des situations climatiques extrêmes telles que les déserts (Californie, Israël), les



Figure 15.1. Dans les grands bassins de production comme la vallée du fleuve Sénégal, l'extension des surfaces irriguées est appuyée par des politiques d'aménagement financées par l'aide internationale. Mais ce choix, s'il répond à un besoin à court terme, dessine sur le long terme un modèle agricole fragile et vulnérable, car dépendant d'une eau captée et acheminée à grand renfort d'énergie fossile. Crédit : photo de R. Belmin, Cirad.

zones polluées ou totalement urbanisées (Le Caire, Singapour). Les « usines à plantes » s'adressent à des contextes spécifiques et pour des espèces à forte valeur économique ou culturelle (herbes aromatiques, fraises, piments). L'horticulture devient une agriculture technologique, parfois verticale (et donc avec une empreinte spatiale extrêmement limitée), qui mobilise les avancées scientifiques les plus récentes dans les domaines du numérique, de la robotique, de la métabolomique, de l'énergie (lampes LED, photovoltaïsme, cogénération, etc.). Pour autant, les questions de rentabilité, de changement d'échelle, de consommation énergétique et d'acceptabilité sociale de ces systèmes très intensifiés restent posées. Des solutions « low-tech » voient également le jour en zones densément peuplées, basées sur le recyclage des eaux, des matières organiques et des matériaux locaux (hydroponie, aéroponie, aquaponie, cultures verticales, sur les toits) ou même en zones rurales, pour la protection contre les insectes, en particulier en Afrique subsaharienne (Nordey *et al.*, 2017). Ces systèmes, en s'affranchissant des aléas climatiques, contribuent à la sécurité nutritionnelle soit directement par la consommation des produits frais, légumes-feuilles ou fruits soit par le revenu de leur vente (Orsini *et al.*, 2013).

Ces vingt dernières années ont été marquées par la mise au point de nouvelles pratiques permettant de produire avec moins d'intrants chimiques. Les pratiques traditionnelles basées sur la diversité biologique (agroforesterie, jardins créoles) sont revues et adaptées pour s'intégrer dans de nouveaux circuits économiques et pour répondre aux nouveaux besoins. Les pratiques agroécologiques peuvent aussi mobiliser les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC),

en particulier pour permettre d'anticiper des épisodes climatiques défavorables, d'éviter les pertes de pré et post-récolte, d'optimiser la gestion de l'eau, et de contrôler, par des capteurs et l'imagerie numérique, des surfaces ou des volumes protégés. Leur applicabilité dans des conditions de production économiquement et socialement fragiles est encore interrogée.

3.2. Les adaptations organisationnelles (filières, systèmes alimentaires, politiques publiques)

Si de nouvelles pratiques culturales agroécologiques sont nécessaires pour faire face au changement climatique, il est également essentiel de considérer l'aval des filières, source importante de pertes pour les produits horticoles, particulièrement périssables et sensibles aux variations climatiques. L'impact est particulièrement fort dans les pays à revenu faible, où les infrastructures (routes, lieux de stockage et de distribution) sont défaillantes. Cela est particulièrement vrai pour les filières locales, parfois dérivées des filières d'exportation, comme c'est le cas pour la mangue en Côte d'Ivoire (figure 15.2). À un autre niveau, si de nouvelles pratiques doivent être mises en œuvre dans les filières horticoles, de l'amont à l'aval, celles-ci ne seront efficaces à l'échelle globale que si les pratiques de consommation alimentaire changent également (diversification et végétalisation des régimes), et si les politiques publiques accompagnent ce mouvement (Belmin *et al.*, 2023b).



Figure 15.2. Récolte de la mangue, à Korhogo, en Côte d'Ivoire. Les mangues destinées aux marchés locaux sont transportées dans des conditions ne permettant pas de préserver la qualité du produit. Il en résulte d'importantes pertes en cas d'intempéries (phases d'exposition au soleil, pluies intenses). Crédit : photo d'É. Malézieux.

4. Les stratégies d'atténuation

En comparaison avec les grandes cultures ou l'élevage, l'horticulture, en raison des surfaces plus réduites, n'est pas un contributeur majeur au changement climatique. Le pouvoir de séquestration du carbone reste modeste au regard de secteurs comme la forêt. Mais l'horticulture est souvent consommatrice de nombreux intrants chimiques (plastiques, engrais, pesticides) dérivés du pétrole. Les stratégies d'atténuation en horticulture se concentrent principalement sur la réduction des émissions de GES associées aux pratiques agricoles. Le recyclage des effluents en culture hors-sol, l'application précise des engrais et des sources de nutriments organiques peuvent minimiser les émissions polluantes. L'adoption de pratiques de travail du sol réduit peut séquestrer du carbone, améliorer la structure du sol et réduire les émissions dues à sa perturbation. La transition vers des pratiques agricoles biologiques diminue l'utilisation d'engrais synthétiques et de pesticides, réduisant ainsi l'empreinte carbone de la production horticole. La mise en œuvre de sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires et les éoliennes sur les exploitations horticoles peut aider à réduire les émissions de GES associées à la consommation d'énergie. Le développement de circuits courts, la consommation de produits saisonniers, la réduction des pertes et du gaspillage alimentaire au long de la chaîne d'approvisionnement horticole, de la production à la consommation, réduiront aussi les émissions. Le choix de matériaux d'emballage écologiques et la réduction des emballages excessifs peuvent aussi contribuer à réduire l'empreinte carbone des produits horticoles.

5. Conclusion

À l'heure où les problèmes de malnutrition persistent à l'échelle mondiale et où le changement climatique s'accélère, de nouvelles voies doivent être trouvées pour l'agriculture. Les produits horticoles alimentaires, essentiels pour une alimentation saine, sont au cœur de ces défis. Cependant, augmenter la production seule ne résoudra pas la malnutrition. Dans les sociétés occidentales, soumises aux nouvelles pathologies nutritionnelles (obésité, diabète de type II, maladies cardiovasculaires), les processus de surconsommation d'aliments transformés, d'énergie et d'intrants chimiques fonctionnent en synergie. Les carences en micronutriments affectent systématiquement les populations défavorisées dans tous les pays. Dans les économies les plus dépendantes de l'agriculture, le changement climatique va affecter toutes les composantes de la sécurité alimentaire, c'est-à-dire l'accessibilité, la disponibilité, l'utilisation et la stabilité alimentaires. Augmenter la diversité alimentaire pour les plus pauvres est une étape décisive pour améliorer la nutrition (Malézieux *et al.*, 2024). La recherche doit viser à accroître l'accessibilité et la disponibilité des fruits et légumes dans les régions défavorisées, en augmentant et en diversifiant la production, et en limitant les pertes. Face au défi climatique et à la perte de biodiversité, il est nécessaire d'élargir les thèmes de recherche actuels en incluant les interactions entre agriculture, alimentation et santé, afin de mieux comprendre les liens étroits entre la production alimentaire, la santé humaine et environnementale.

6. Références bibliographiques

- Alae-Carew C., Nicoleau S., Bird F.A., Hawkins P., Tuomisto H.L., Haines A., *et al.*, 2020. The impact of environmental changes on the yield and nutritional quality of fruits, nuts and seeds: a systematic review. *Environmental research letters*, 15, 2: 023002.
- Beillouin D., Ben-Ari T., Malézieux E., Seufert V., Makowski D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27 (19) : 4697-4710.
- Belmin R., Malézieux E., Basset-Mens C., Martin T., Mottes C., Della Rossa P., *et al.*, 2022. Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework. *Agron. Sustain. Dev.*, 42, 3.
- Belmin R., Sawadogo H., Ndiénor M., 2023a. Cultiver sans eau ou presque : la technique du zaï au Sahel. *The Conversation*.
- Belmin R., Paulin M., Malézieux E., 2023b. Adapting agriculture to climate change: which pathways behind policy initiatives?. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 59.
- Bonebrake T.C., Deutsch C.A., 2012. Climate heterogeneity modulates impact of warming on tropical insects. *Ecology*, 93(3), 449-455.
- Christopoulos M., Ouzounidou G., 2021. Climate change effects on the perceived and nutritional quality of fruit and vegetables. *J. Innov. Econ. Manag.*, 34, 79-99.
- Duchenne F., Thébault E., Michez D., Elias M., Drake M., Persson M., *et al.*, 2019. Phenological shifts alter the seasonal structure of pollinator assemblages in Europe. *Nature Ecology and Evolution*, 4(1):115-121.
- Eigenbrode S.D., Adhikari S., 2023. Climate change and managing insect pests and beneficials in agricultural systems. *Agronomy Journal*, 115, 2194-2215.
- El-Gendy I.R., AbdAllah A.M., 2019. Effect of soil type and soil water content levels on pupal mortality of the peach fruit fly [*Bactrocera zonata* (Saunders)] (Diptera: Tephritidae). *International Journal of Pest Management*, 65:2, 154-160.
- ESYRCE, 2018. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. MAPA, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2018_tcm30-504212.pdf
- FAO, 2020. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2020. Relever le défi de l'eau dans l'agriculture. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb1447fr>
- Fink M., Kläring H.P., George E., 2009. Horticulture and Climate Change. In: Dirksmayer W., Sourell H., Eds., *Water in Horticulture*, vol. 328, Landbauforschung, Sdh, 1-9.
- Forrest J.R.K., 2016. Complex responses of insect phenology to climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 17:49-54.
- Ghini R., Bettiol W., Hamada E., 2011. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*, 60, 122-132.
- IPBES, 2016. Rapport d'évaluation sur les pollinisateurs, la pollinisation et la production alimentaire. Résumé à l'intention des décideurs. https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/downloads/2016_spm_pollination-fr.pdf
- Kahane R., Hodgkin T., Jaenicke H., Hoogendoorn C., Hermann M., Keatinge J.D.H., *et al.*, 2013. Agrobiodiversity for food security, health and income. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4): 671-693. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0147-8>
- Kimball B.A., Idso S.B., Johnson S., Rillig M.C., 2007. Seventeen years of carbon dioxide enrichment of sour orange trees: final results. *Global Change Biol.* 13:2171-2183.
- Kishor P.B.K., Guddimalli R., Kulkarni J., Singam P., Somanaboina A.K., Nandimandalam T., *et al.*, 2023. Impact of Climate Change on Altered Fruit Quality with Organoleptic, Health Benefit, and Nutritional Attributes. *J. Agric. Food Chem.* 71, 17510-17527.
- Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., De Ruffray P., Brisse H., 2008. A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 320(5884): 1768-1771. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1156831>
- Loladze I., 2014. Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO₂ depletes minerals at the base of human nutrition. *eLife*, 3:e02245.

Mahaut L., Pironon S., Barnagaud J.Y., Bretagnolle F., Khoury C.K., Mehrabi Z., *et al.*, 2022. Matches and mismatches between the global distribution of major food crops and climate suitability. *Proceedings of the Royal Society B*, 289(1983), 20221542.

Malézieux E., Beillouin D., Makowski D., 2022. Feeding the world better: Crop diversification to build sustainable food systems. *Perspective*, 58: 1-4.

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., *et al.*, 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 43-62.

Malézieux E., Verger E.O., Avallone S., Alpha A., Biu Ngigi P., Lourme-Ruiz A., *et al.*, 2024. Biofortification versus diversification to fight micronutrient deficiencies: an interdisciplinary review. *Food Sec.*, 16, 261-275.

Manners R., Vandamme E., Adewopo J., Thornton P., Friedmann M., Carpentier S., *et al.*, 2021. Suitability of root, tuber, and banana crops in Central Africa can be favoured under future climates. *Agricultural Systems*, 193, 103246.

Moretti C.L., Mattos L.M., Calbo A.G., Sargent S.A., 2010. Climate changes and potential impacts on postharvest quality of fruit and vegetable crops: A review. *Food Research International*, 43: 1824-1832.

Muilenburg V.L., Herms D.A., 2013. Responses of Insect Pests to Climate Change: Effects and Interactions of Temperature, CO₂, and Soil Quality. *In: Sivakumar M.V.K., Lal R., Selvaraju R., Hamdan I. (eds.), Climate Change and Food Security in West Asia and North Africa*. Springer Dordrecht, 423 p.

Nordey T., Basset-Mens C., De Bon H., Martin T., Deletre E., Simon S., *et al.*, 2017. Protected cultivation of vegetable crops in sub-Saharan Africa: limits and prospects for smallholders. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37 (6):e53. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0460-8>

Orsini F., Kahane R., Nono-Womdim R., Gianquinto G., 2013. Urban agriculture in the developing world: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 33:695-720. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0143-z>

Ripoll J., Urban L., Brunel B., Bertin N., 2016. Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. *J. Plant Physiol.*, 15(190): 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006>

Scheelbeek P.F., Bird F.A., Tuomisto H.L., Green R., Harris F.B., Joy E.J., *et al.*, 2018. Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(26), 6804-6809.

Singh B.K., Delgado-Baquerizo M., Egidi E., Guirado E., Leach J.E., Liu H., Trivedi P., 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, 21: 640-656.

Skendžić S., Zovko M., Živković I.P., Lešić V., Lemić D., 2021. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*, 12, 440.

Chapitre 16

Les systèmes d'élevage face aux défis du changement climatique

Vincent Blanfort, Christian Corniaux, Véronique Alary, Guillaume Duteurtre

Les filières animales sont en pleine restructuration dans les pays industrialisés ainsi que dans les pays en développement et émergents. Les évolutions des dernières décennies — notamment la concentration des élevages et des industries de transformation et distribution — ont considérablement intensifié et étendu l'empreinte de l'élevage sur la planète. Le sous-secteur des productions animales est à présent considéré comme un contributeur majeur du changement climatique au sein du secteur agricole. La FAO (2023) évalue les émissions de gaz à effet de serre (GES) des systèmes d'élevage (bovins, buffles, ovins, caprins, porcs et poulets) à environ 12 % de l'ensemble des émissions anthropiques. Mais au-delà des évaluations strictement quantitatives des émissions, ces impacts doivent être aussi analysés au regard de la diversité des systèmes impliqués et des multiples fonctions qu'ils assurent. Les finalités productives de l'élevage sont aujourd'hui envisagées de manière plus large. Il ne s'agit plus seulement d'assurer la sécurité alimentaire des populations, mais aussi de considérer les multiples services sociaux et environnementaux de cette activité (voir chapitre 10). Parmi ces services, certains contribuent d'ailleurs à l'atténuation des impacts de l'agriculture sur le changement climatique. C'est le cas par exemple du recyclage des résidus de culture par les animaux, de l'apport de fertilisants organiques, ou du stockage du carbone dans les sols de prairies. Or, face au changement climatique, ces multiples services sont fragilisés. L'élevage ne doit ainsi pas être seulement considéré comme un « problème » pour l'environnement, mais également comme une « solution » face au changement climatique, au regard de ses potentiels d'atténuation et d'adaptation.

Après un point général synthétique sur l'état et l'évolution des filières animales dans le monde, ce chapitre aborde les principaux impacts du changement climatique sur les différents secteurs de l'élevage (hormis l'aquaculture) et montre comment il peut participer à des solutions d'adaptation et d'atténuation au sein de gouvernances en œuvre à plusieurs niveaux.

1. Dynamique des filières animales dans le monde

L'élevage est présent partout sur la planète. Quels que soient la latitude, le climat, en plaine comme en montagne, en zones rurales comme en zones urbaines, des hommes et des femmes produisent, transforment et consomment des produits animaux. Derrière ce terme générique d'« élevage » se cache donc une grande diversité de situations et de pratiques. Les espèces domestiques sont nombreuses : bovins (vaches, buffles, yacks, etc.), ovins, caprins, camélidés (dromadaires, chameaux, lamas, etc.),

porcins, volailles (poules, canards, lapins, pintades, etc.), équins (chevaux, ânes, etc.), rennes, etc. La diversité d'espèces s'accompagne d'une diversité des produits animaux : viandes blanches et rouges, abats, lait, œufs, laine, cuirs et peaux, et fumier ou lisier. Les différentes espèces sont aussi élevées pour leur force de traction (animaux de transport, pour les travaux agricoles sachant que moins de 10 % des exploitations agricoles dans le monde disposent d'un tracteur) ou pour leur fonction de thésaurisation, notamment dans les pays du Sud. Les systèmes de production eux-mêmes sont très variés allant des systèmes très extensifs (élevage transhumant) aux systèmes très intensifs (élevages de porcs et de poulets en batterie, mégafermes laitières, feed-lots¹), en passant par des fermes familiales de polyculture-élevage et des systèmes herbagers sous forme de *ranching* extensif ou de pâturages gérés en rotation.

Néanmoins, à l'instar du secteur agricole, les systèmes d'élevage s'intensifient globalement à l'échelle de la planète et des continents. La production a nettement augmenté au cours des dernières décennies. Alors que la population humaine a été multipliée par 1,76 de 1980 à 2020 (figure 16.1), la production de poulets a été multipliée par 5,3, celle d'œufs par 3,4, de petits ruminants par 2,2, de porcs par 2,1, de lait par 2,0 et de bovins par 1,6 (FAOSTAT, 2023). Autrement dit, les productions issues de l'élevage ont augmenté plus vite que la population humaine, à l'exception notable de la viande bovine. Cette tendance est à l'origine du débat actuel sur l'élevage et ses impacts.

En 2023, avec 246Mt, les viandes blanches (majoritairement, la production de poulet de 120Mt et de porc de 108Mt), issues de monogastriques, devançant largement les productions de viandes rouges issues des ruminants, qui comptent pour 114Mt (majoritairement, la production de viande bovine de 80Mt, et de viande ovine et caprine de 16Mt). L'essor du poulet est constaté sur tous les continents, notamment en Asie et surtout en Chine, où il a décuplé depuis 1980. Cette croissance s'appuie sur le développement de systèmes industriels très intensifs, responsables de fortes émissions de GES pour ces régions (voir chapitre 10). Cette expansion de l'élevage également constatée en Amérique latine et en Amérique du Nord est moindre en Europe malgré la substitution des viandes rouges par des viandes blanches (l'Europe, leader des productions animales en 1980, est désormais largement dépassée par l'Asie). Dans ce panorama, l'Afrique enregistre une augmentation de ses productions animales, mais qui demeurent à des niveaux déficitaires, surtout pour les viandes blanches. Le ratio entre la population humaine et les productions animales totales y est très faible au regard des autres continents. Cela traduit des niveaux de productivité et d'intensification bas, peu impactants globalement pour le climat, mais insuffisants pour nourrir toute la population alors qu'elle devrait encore doubler dans les vingt ans à venir. Le pastoralisme fournit actuellement 70 % du lait et la moitié de la viande de bovins et de petits ruminants consommés dans les pays du Sahel.

Par ailleurs, ces fortes évolutions de l'élevage tirées par la demande (voir chapitre 10) remettent en cause les systèmes traditionnels de production sous la pression économique, sanitaire et normalisatrice des principaux acteurs publics et privés (Teissier d'Orfeuil *et al.*, 2015). Ces évolutions se réalisent avec des gouvernances nationales et internationales encore insuffisantes et très dominées par les enjeux commerciaux. Dans les pays en développement, notamment en Afrique, les politiques nationales en faveur de l'élevage sont rares du fait des priorités sur les cultures de base. En Europe, les ambitions sont incertaines en matière d'élevage en lien avec les

1. Parcs d'engraissement industriels et intensifs de bovins exploités pour la production de viande.

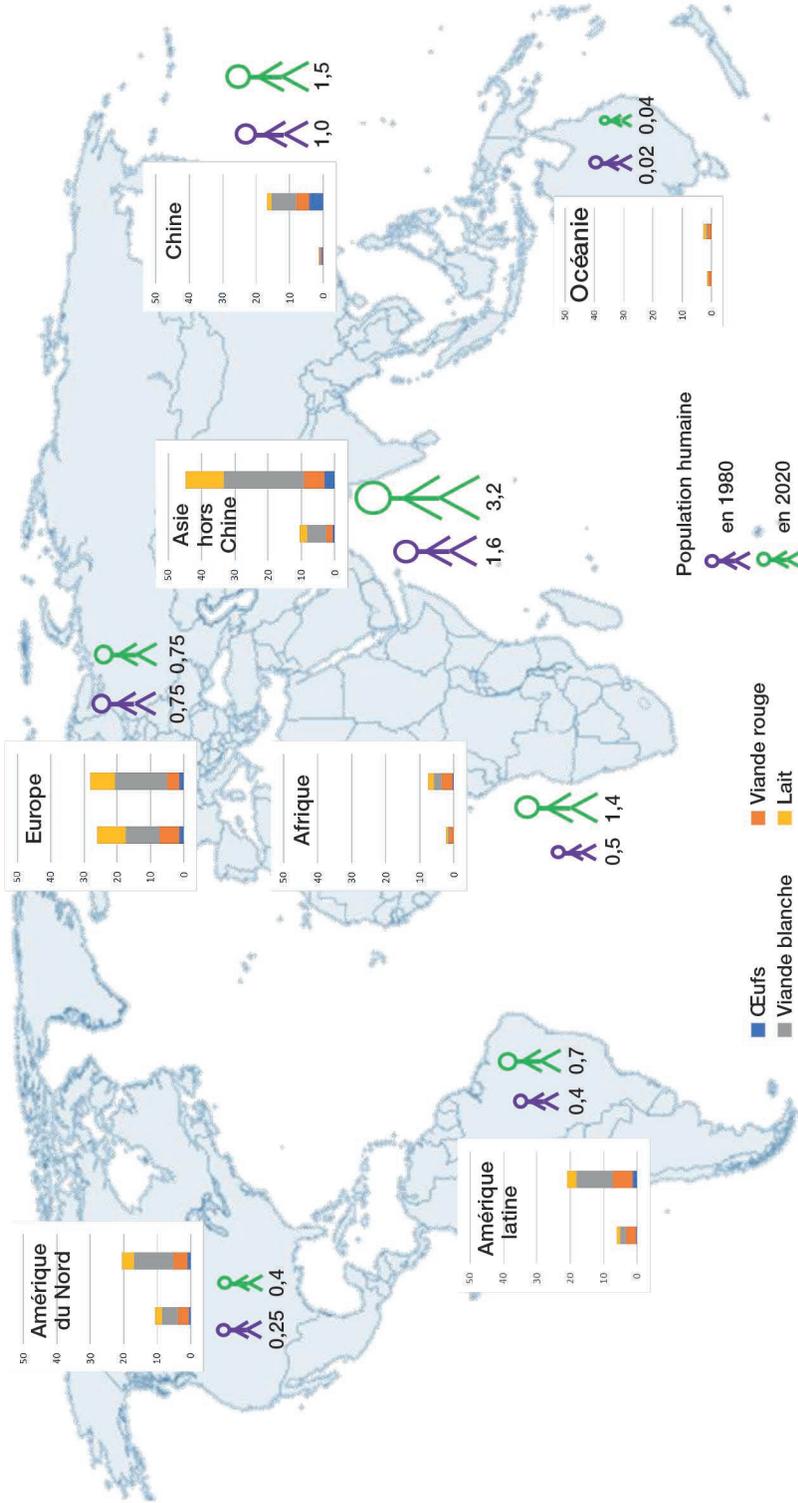


Figure 16.1. Évolution de la population mondiale (en milliards d'individus) et de la production en protéines animales de 1980 à 2020 (en millions de tonnes, Mt). Source : d'après FAOSTAT et nos calculs.

différentes pressions sociales et environnementales (végétarisme, animalisme, droit des animaux, etc.). *A contrario*, les pays aux grandes ambitions productivistes et exportatrices ont de fortes politiques nationales en matière d'élevage, mais les enjeux environnementaux sont peu, voire pas, évoqués. C'est le cas du Canada, des États-Unis, de la Chine, de la Russie, de l'Argentine, de l'Inde et du Brésil.

Ces évolutions — que ce soit en effectif ou en concentration — des filières d'élevage (bovins, buffles, ovins, caprins, porcs et poulets) font des productions animales un contributeur majeur des émissions globales de GES du secteur agricole (voir chapitre 10). Elles ont été évaluées² par la FAO pour l'année de référence 2015 (FAO, 2023) à 6,2 Gt eqCO₂/an), soit 12% de l'ensemble des émissions de GES anthropiques, ce qui représente plus de la moitié des émissions du secteur AFOLU (agriculture, foresterie et autres utilisations des terres). Plus précisément, 54% de toutes les émissions du secteur sont attribuées au méthane (CH₄), 31% au dioxyde de carbone (CO₂) et 15% à l'oxyde nitreux (N₂O). Au sujet des produits concernés, environ deux tiers des émissions mondiales sont imputables à la production de viande toutes espèces confondues et un tiers est lié à la production d'aliments pour animaux, y compris les engrais et les pesticides.

2. Les conséquences du changement climatique sur le secteur de l'élevage

Les évolutions importantes du secteur de l'élevage sont intervenues dans un contexte global très perturbé. Les impacts du changement climatique sur l'élevage sont nombreux et complexes, et ils se sont intensifiés depuis trente ans. Ils opèrent directement ou indirectement tant sur les ressources alimentaires que les systèmes d'élevage, sur l'évolution des vecteurs de maladie (Richard *et al.*, 2013) que sur des perturbations de l'organisation des marchés et des filières (voir chapitre 10). Les impacts mentionnés dans la littérature peuvent être listés en fonction des phénomènes bioclimatiques qui en sont à l'origine (tableau 16.1).

3. Les capacités d'adaptation des différents systèmes d'élevage

Les multiples fonctions que les activités d'élevage assurent sur l'ensemble de la planète, la diversité des situations et des évolutions au sein de ce secteur génèrent une gamme élargie de formes et de stratégies d'adaptation (tableau 16.2). L'élevage apparaît également comme un mécanisme d'adaptation en lui-même en particulier pour les populations vulnérables et pauvres face aux environnements de plus en plus variables et aux risques qui leur sont associés (Alary *et al.*, 2011; Vigne *et al.*, 2015).

Les systèmes mixtes associant culture et élevage apparaissent plus résilients aux impacts du changement climatique que les systèmes spécialisés en raison de la diversité de leurs activités (polyculture, ateliers d'élevage) et des ressources qu'ils mobilisent. Ces systèmes constituent par ailleurs les systèmes agricoles dominants dans le monde. Ils assurent la moitié de l'alimentation humaine, mobilisent 90% des

2. Approche d'évaluation du cycle de vie (ACV), en utilisant l'outil GLEAM de la FAO quantifiant les émissions associées à l'élevage des animaux et intégrant la fermentation entérique, les émissions indirectes des activités en amont, une partie des processus en aval, notamment le transport, la transformation et la commercialisation des produits bruts après l'exploitation.

surfaces cultivées, produisent 88,5% des productions bovines (viande et lait), 61% de la viande de porc et 26% des volailles, et emploient 84% de la population agricole pour l'Europe et l'Asie (Herrero *et al.*, 2010).

Tableau 16.1. Aperçu des différents effets du changement climatique et de ses impacts sur les systèmes d'élevage.

	Phénomènes	Impacts
Contraintes thermiques et hydriques	Sécheresses ou irrégularités des épisodes pluvieux combinés à l'augmentation des besoins en eau liés à l'élévation des températures.	Baisse de consommation alimentaire, donc de production. Hausse des mortalités hors système en conditions contrôlées. Pertes épisodiques en millions d'animaux en Afrique subsaharienne et dans la corne de l'Afrique surtout en zones arides et semi-arides (Blanfort <i>et al.</i> , 2015).
Dégradation des écosystèmes et des ressources fourragères	Dégradation des zones consacrées à l'élevage : végétation, sol et ressources qui leur sont associés (eau, nutriments). Les « anomalies » climatiques : facteurs ou cofacteurs des dégradations des zones de pâturage ou de production d'aliments.	Depuis 1945, dégradation significative des sols dans 20% des pâturages mondiaux, dont 70% dans les régions arides (PNUE, 1991 dans Steinfeld <i>et al.</i> , 2006) (voir chapitre 1). Réduction de la productivité et de la qualité des fourrages naturels et cultivés. Augmentation des plantes rustiques, moins consommables, voire invasives, au détriment des espèces fourragères. Zones tempérées : déplacements de plantes invasives vers des zones où elles n'étaient pas présentes.
Climat et Santé animale	Les conséquences du changement climatique sur la santé des animaux sont complexes, car résultant de nombreux effets.	Directs sur les animaux : fonctionnements physiologiques ou pathologiques. Indirects : modifications de leur exposition à des agents pathogènes, en particulier ceux transmis par des vecteurs (invertébrés ou faune sauvage), dont l'aire de répartition peut être modifiée (Richard <i>et al.</i> , 2013). Intensification des systèmes d'élevages : intensité des risques sanitaires dépendants de la complexité et des échelles des filières d'approvisionnement et de commerce au sein de la globalisation des échanges.

Tableau 16.2. Caractéristiques, leviers et contraintes d'adaptation des différents systèmes d'élevage (SE).

Type de SE	Caractéristiques d'adaptation	Leviers, contraintes, pistes
SE en milieu « difficiles » (zones sèches, les régions de relief)	Capacités des animaux à valoriser des formations végétales diverses. Mécanismes de gestion des réserves corporelles et de résistance aux facteurs abiotiques.	Zones sèches : aptitude à la mobilité rend l'élevage moins vulnérable que le stockage de céréales et de fourrages (Alary <i>et al.</i> , 2011).
Les systèmes mixtes associant culture et élevage	Diversité et complémentarité des productions animales et végétales : minimise les impacts des événements extrêmes. Souplesse, transformation sur la durée. Intégration des impacts négatifs comme des ressources pour d'autres composantes du système (Franzluebbbers, 2014). Petits ruminants se substituent aux bovins dans les conditions les plus arides. Troupeaux multiespèces favorisant les complémentarités (parfois substitution) dans l'utilisation des ressources et dans la gestion des revenus (Aboul-Naga <i>et al.</i> , 2014). Calendriers de pâturage face aux évolutions de la productivité des espaces pastoraux (Vall et Diallo, 2009).	Intégration cultures-élevage (augmenter les flux entre production végétale et animale et le recyclage des nutriments). Le sylvopastoralisme : les arbres dans les pâturages améliorent leur productivité (en retardant l'impact de la saison sèche) et la présence d'ombre. Au Maghreb : ajustements de conduite, mises en défens, réimplantations de couverts naturels (Huguenin, 2015).
Les systèmes herbagers des zones tempérées et tropicales humides	Choix d'espèces et de variétés en mélange pour un couvert végétal résilient allié à une bonne santé des sols. Systèmes de pâturages tournant avec ajustement de la densité animale à la ressource disponible.	Intensification écologique de l'élevage au pâturage : le pâturage tournant avec division des parcelles, l'implantation d'arbres, de légumineuses et des techniques simplifiées de travail du sol (en Amazonie ; Aubron <i>et al.</i> , 2022).
Les systèmes d'élevage intensifs de monogastriques et de ruminants	Effets directs du changement climatique comme des températures élevées. L'environnement sanitaire primordial dans les élevages à forte concentration.	Largement abordés sur les élevages à forte densité (Renaudeau <i>et al.</i> , 2004 <i>in</i> Richard <i>et al.</i> , 2013). Mise en place de systèmes d'alerte et d'intervention d'émergence de maladies.
Tous les SE	Mobilisation de la biodiversité animale s'appuie sur les caractéristiques génétiques spécifiques des espèces et des races d'animaux qui les rendent mieux adaptées (résistance aux températures chaudes, aux maladies et aux parasites, la flexibilité de l'alimentation).	Recours à des races rustiques moins productives, mais mieux adaptées aux conditions difficiles constitue dans de nombreux pays un compromis entre productivité et adaptation au changement climatique, tout en contribuant à la biodiversité ?

Les systèmes herbagers plus ou moins intensifiés des zones tempérées et tropicales humides sont des modes d'exploitation des ruminants basés sur l'exploitation de ressources fourragères implantées pâturées et/ou récoltées, qui sont très sensibles aux impacts du changement climatique.

Les systèmes d'élevage intensifs de monogastriques et de ruminants sont très dépendants de la disponibilité des ressources alimentaires produites localement et de celles achetées sur le marché mondial. Ce marché s'avère extrêmement sensible aux fluctuations climatiques et aux instabilités politiques. Une moindre dépendance de l'extérieur, c'est-à-dire une plus grande autonomie alimentaire des élevages, constitue une voie d'adaptation de ces systèmes à privilégier.

La mobilité constitue la caractéristique d'adaptation typique des élevages des zones sèches et des régions de relief à fortes contraintes. Cet atout essentiel se heurte désormais à de nouvelles contraintes climatiques en interaction avec celles d'ordre social et politique excluant les populations nomades, et conflictuelles avec les autres activités du territoire, notamment en Afrique (voir chapitre 12). Dans le cas de l'Afrique de l'Ouest, ces systèmes évoluent vers des systèmes agropastoraux pouvant intégrer des systèmes hors-sol qui permettent d'améliorer la productivité des animaux en maîtrisant les conditions d'élevage (exemple des systèmes laitiers périurbains au Mali et au Burkina Faso) (Vigne *et al.*, 2014 *in* Blanfort *et al.*, 2019).

Parmi les adaptations communes à l'ensemble de ces systèmes d'élevage, la mobilisation de la biodiversité végétale et animale a toujours fait partie intégrante de l'activité d'élevage. Sa préservation est essentielle pour maintenir un pool génétique précieux recensé par la FAO³, dont les efforts de conservation (Plan d'action mondial pour les ressources zoogénétiques) portent sur 7 745 races locales d'animaux, mais restent encore insuffisants (26% des races en danger d'extinction). Les grands projets de sélection animale concernent très peu les zones tropicales faute de connaissances suffisantes, par exemple sur les mécanismes d'adaptation concernant l'ingestion et la reproduction. En particulier, les capacités des races locales de chèvres et de moutons apparaissent encore mal connues malgré la croissance démographique très forte de ces troupeaux, notamment en Afrique et en Asie centrale. De même, les camélidés constituent des espèces à fort intérêt pour l'adaptation au changement climatique dans les régions arides et dans les régions d'altitude (Faye, 2020), mais les performances des différentes races d'élevage sont encore mal connues. En revanche, les capacités d'adaptation des races de zébu par rapport aux taurins (meilleure résistance à la chaleur et aux parasites) ont fait l'objet de travaux de recherche conséquents (Richard *et al.*, 2013). Les monogastriques ont aussi fait l'objet d'importantes recherches en génétique qui ont abouti à des solutions pour atténuer les impacts des climats chauds, notamment chez les volailles.

4. Vers des systèmes d'élevage respectueux du climat

L'état des lieux réalisé dans ce chapitre sur les filières animales montre que ces dernières sont confrontées à des défis majeurs et complexes notamment en regard du changement climatique. Le secteur est responsable d'une part significative des émissions de GES et il est difficile d'imaginer son développement sans une transition

3. FAO (2019) : <http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>.

vers des systèmes d'élevage à faibles émissions de carbone. Selon la FAO (2016), les émissions de GES issues de l'élevage pourraient être globalement diminuées de 30% avec de meilleures pratiques. Ce potentiel se décline de façon très diversifiée au Nord et au Sud, et au niveau régional (figure 16.2), sans oublier que les activités d'élevage doivent répondre dans le même temps aux problématiques économiques, sociales, environnementales et politiques spécifiques aux différentes régions du monde.

La recherche tient une place importante dans l'identification, la caractérisation et l'évaluation de ces solutions. Elle contribue à montrer et à préciser la capacité de certains types d'élevage à fournir des options d'atténuation variées à toutes les échelles : l'animal, l'exploitation, le territoire, les filières, le national, le régional et le global. Les leviers d'actions relèvent de plusieurs types : la réduction des émissions de GES, le transfert et le stockage de carbone de l'atmosphère vers des compartiments terrestres sous une forme stabilisée (voir chapitre 17), la recherche d'efficacité par des approches intégrées allant jusqu'à favoriser les synergies entre atténuation et adaptation, et le recyclage de ces produits, notamment le fumier ou le lisier. L'ensemble est régi par les réglementations et les soutiens des politiques publiques (voir chapitre 25) qu'il convient d'appuyer et d'améliorer. Les connaissances produites dans ce cadre vaste et complexe concernent (1) les mécanismes biotechniques, (2) les processus organisationnels, (3) l'environnement sociotechnique (cercle familial, acteurs de l'amont à l'aval des filières, politiques publiques).

Sans couvrir l'exhaustivité des voies de développement de l'élevage compatibles avec la lutte contre le changement climatique, ce chapitre cible des travaux de recherche montrant l'élevage comme porteur de solutions selon deux grandes voies : la réduction des émissions et la séquestration du carbone.

4.1. Modifier les pratiques d'élevage pour atténuer les émissions de GES

Les émissions de méthane (CH_4) sont considérées comme l'un des moteurs majeurs de la crise climatique (voir chapitres 1 et 24), avec des attentes pressantes pour les atténuer dans les secteurs clés comme celui de l'élevage. Récemment en Europe, des mesures radicales telles que la réduction du cheptel bovin en particulier font l'objet de polémiques dans le monde agricole : les importations qu'elles impliqueraient depuis des pays non autosuffisants en produits animaux remettraient en cause leur souveraineté alimentaire au profit de formes d'agriculture elles-mêmes génératrices d'impacts environnementaux (déforestation importée). La baisse de la consommation de viande bovine est une autre option mise en avant dans les pays à consommation de protéines animales jugée excessive. Au-delà de ces solutions assez réductrices, les institutions de recherche et d'appui à l'élevage du Nord ont mené des investigations sur une alimentation pour les ruminants générant moins de méthane entérique⁴, comme les concentrés et les sous-produits de culture (Gerber *et al.*, 2013; Doreau *et al.*, 2013). Mais l'apport de concentrés importés n'est pas transposable sur tous les systèmes (Corniaux *et al.*, 2012). Pour combler l'insuffisance des connaissances de ces domaines dans les Suds, des travaux sont en cours dans les systèmes agropastoraux d'Afrique subsaharienne (voir chapitre 24).

4. Il s'agit du méthane émis par le système digestif des ruminants (voir chapitre 10).

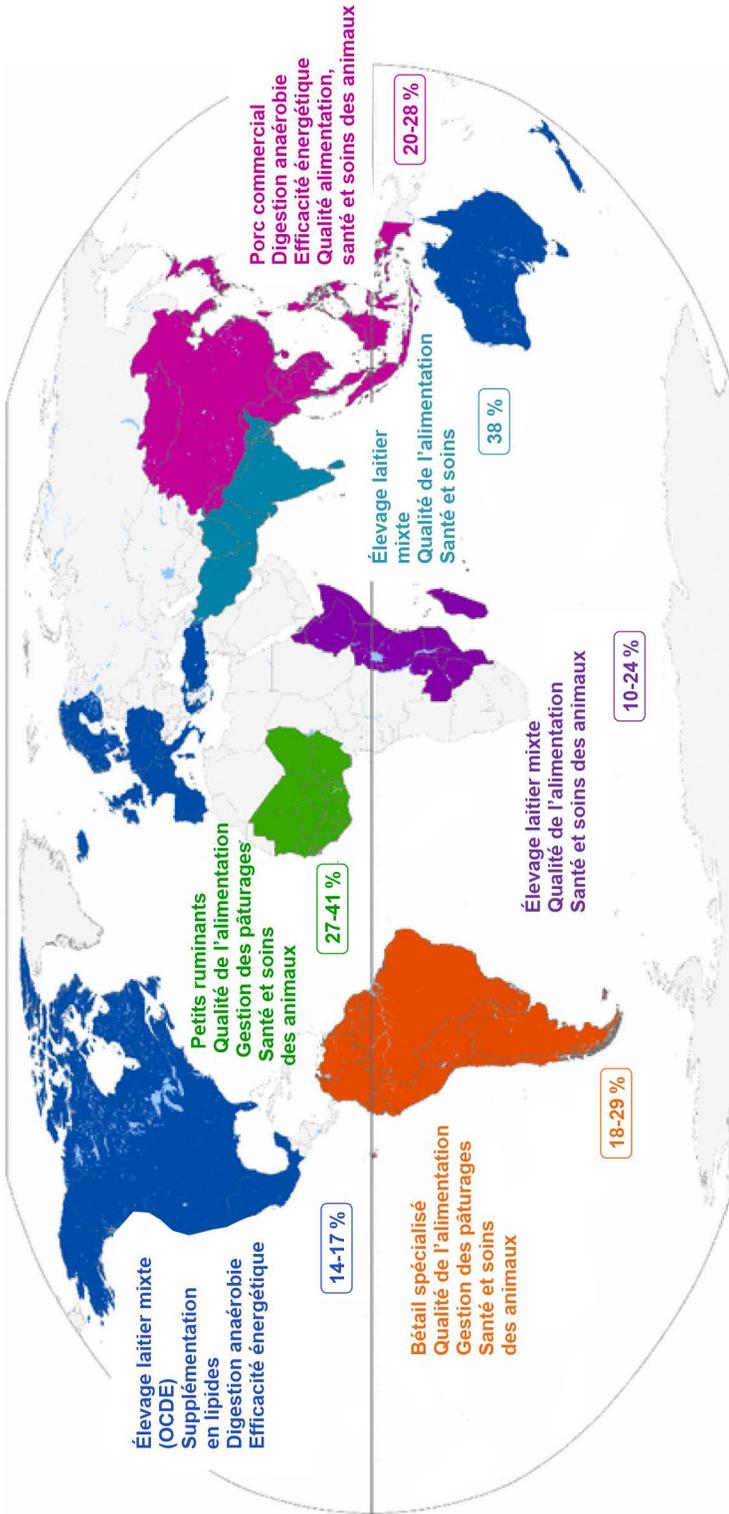


Figure 16.2. Possibilités d'action pour la réduction des émissions de GES dans les différentes régions du monde. Source : Gerber *et al.* (2013).

Les émissions de CO₂ et N₂O représentent quant à elles 45 % des émissions du secteur animal, dont un tiers est lié à la combustion d'énergie fossile directement pour la gestion du troupeau ou indirectement pour la production des intrants (Gerber *et al.*, 2013). La promotion de systèmes basés sur une meilleure efficacité énergétique est une voie d'amélioration prometteuse à travers le recyclage et la valorisation des effluents d'élevage. Cette meilleure intégration « agriculture-élevage » permet de contribuer à la diminution de la dépendance aux fertilisants minéraux d'origine industrielle, coûteux, très consommateurs de ressources énergétiques non renouvelables et émetteurs de GES (Vigne *et al.*, 2015 ; Bénagabou *et al.*, 2017).

4.2. La séquestration du carbone par les pâturages : un potentiel d'atténuation majeur

Dans le contexte de l'atténuation du changement climatique, la question du carbone (C) a d'abord été abordée par le domaine forestier, identifié comme le secteur qui stocke le plus de carbone dans la biomasse aérienne. Puis, lorsque le stockage du carbone dans le sol est devenu une option supplémentaire significative (voir chapitre 17), le secteur des cultures a intégré le thème en raison d'un historique significatif sur la gestion de la matière organique du sol (composé de 50 % de C). La gestion des sols est désormais un point clé du contrôle de ces flux de C dans la lutte contre le changement climatique. Selon Gerber *et al.* (2013), elle représente le potentiel de réduction des émissions le plus important en agriculture notamment dans les systèmes d'élevage mobilisant des ressources pâturées et récoltées. Le processus est ainsi de plus en plus intégré dans les stratégies de développement durable de ces filières. Cependant, les métriques et les méthodologies standards utilisées peuvent s'avérer inappropriées pour une évaluation correcte des écosystèmes pâturés, notamment dans les zones tropicales où le potentiel de séquestration global est élevé en considérant les surfaces impliquées (voir chapitre 17). Des travaux de recherche (encadré 16.1) ont déjà contribué à caractériser les processus de séquestration du carbone sur des terrains tropicaux (Assouma, 2016 ; Blanfort *et al.*, 2015 et 2022 ; Idrissou *et al.*, 2024).

Si la séquestration de carbone dans le sol constitue un potentiel d'atténuation avéré pour les systèmes d'élevage au pâturage, elle présente aussi des limites. Les stocks du sol sont en effet très fragiles et peuvent être altérés par le changement d'usage des terres, par l'augmentation de la température, par les pratiques de fertilisation et le travail du sol (Edouard-Rambaut *et al.*, 2022).

Encadré 16.1. La question des métriques et de l'évaluation des systèmes d'élevage

L'analyse par grande région du monde (Gerber *et al.*, 2013) montre que l'Afrique subsaharienne, compte tenu des effectifs et des faibles productivités, et l'Amérique latine et les Caraïbes, en raison de la conversion des forêts primaires en pâturage et en cultures destinées à l'alimentation animale, sont les régions les plus émettrices par kilogramme de carcasse produite (70 kg eqCO₂/kg). Cependant, les références sur la contribution spécifique des systèmes d'élevage (SE) des pays du Sud aux émissions de GES restent insuffisantes et cachent une diversité mise en évidence par des évaluations comme celles menées par le Cirad et ses partenaires.

Bilans carbone (C) neutres pour les systèmes d'élevage pastoraux sahéliens

L'élevage au Sahel est souvent considéré comme ayant les plus fortes intensités d'émissions de GES sur la base de calculs des émissions de GES par unité de produit (viande, lait, etc.), évaluation qui défavorise les systèmes d'élevage extensifs (pastoraux et agropastoraux) à productivité faible. Une approche écosystémique (Assouma, 2016; Assouma *et al.*, 2019; Blanfort *et al.*, 2022) intégrant les émissions des GES liées aux activités d'élevage et le stockage de C des écosystèmes pastoraux montre que les écosystèmes pastoraux sahéliens s'inscrivent dans une trajectoire de neutralité carbone (léger potentiel de séquestration de carbone de $40 \pm 6 \text{ kgC/ha/an}$) (Assouma, 2019). Ces recherches s'inscrivent dans le projet de recherche et développement Cassecs* (en soutien à l'innovation pour la résilience des élevages pastoraux et agropastoraux dans les pays sahéliens du CILSS; <https://www.cassecs.org/>). Il accompagne depuis 2020 ce changement de perspective (1) en produisant une évaluation fine des facteurs d'émission et des potentiels de stockage de C des écosystèmes sahéliens, (2) en accompagnant les politiques publiques des pays du CILSS et en consolidant leur CDN.

Restauration de paysages et services écosystémiques dans les bassins d'élevage en Amazonie

En Amazonie brésilienne, la plupart des éleveurs ont cessé de déforester dans la période 2008-2011. La déforestation reste depuis concentrée sur les fronts pionniers. Sur les autres territoires amazoniens, où les éleveurs ont stoppé toute déforestation, la recherche accompagne une trajectoire de développement bas-carbone (voir encadré 22.4). Les ressources renouvelables de ces régions (rayonnement solaire, précipitations, sol) peuvent être mobilisées de façon efficiente pour des systèmes herbagers productifs et capables de stocker du carbone comme le montrent les études réalisées en Amazonie française (projet Carpagg en Guyane, Blanfort *et al.*, 2023). Mobilisant ces références, l'outil ACCT-DOM Guyane (Dallaporta *et al.*, 2016) est une adaptation locale d'un outil européen ACCTools (AgriClimateChange) qui calcule le bilan énergétique et les émissions de GES d'une exploitation agricole sur l'année en prenant en compte le stockage de carbone**. Cette approche en cycle de vie a été mise en œuvre au Brésil ACCT-PARA (Da Cruz Corrêa *et al.*, soumis) et en Nouvelle-Calédonie.

* Cassecs : Séquestration de carbone et émissions de gaz à effet de serre dans les écosystèmes (agro)sylvopastoraux des états sahéliens. <https://www.cassecs.org/content/download/4790/37072/version/1/file/Policy+brief+COP28+CaSSECS.FR.pdf>.

** <https://www.terramaz.org/>. <https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/acctool-acct-simplified-version-acct-dom>.

5. Conclusion

Face au changement climatique, la transformation des systèmes d'élevage vers des systèmes plus résistants et ayant le moins d'impacts négatifs est devenue une priorité. De multiples adaptations de court terme se sont déjà produites. Elles portent à la fois sur les systèmes d'alimentation, sur la génétique animale, ou sur les pratiques et les conduites des animaux. Par exemple, certains systèmes tentent de réduire le recours aux importations de fourrage et d'aliments, ou d'améliorer le recyclage des produits et des coproduits par une meilleure interaction entre les activités d'élevage et les activités agricoles. Loin des tendances au développement de systèmes industriels de plus en

plus standardisés, ces adaptations impliquent le maintien d'une très grande diversité de systèmes en raison de la pluralité des contextes et des fonctions des élevages au sein des territoires. De fait de la diversité de ses fonctions, l'élevage a un rôle central dans le développement de systèmes alimentaires durables. Cette diversité des systèmes d'élevage est aussi une richesse sociale, culturelle et écologique qui nécessite d'être préservée (Alary *et al.*, 2024).

Jusqu'aujourd'hui, les rapports internationaux mettent généralement en garde contre les défis urgents posés par les systèmes d'élevage intensifs sur le réchauffement climatique, alors que seulement 3,7% des bovins sont élevés dans des parcs d'engraissement, fournissant seulement 5% des protéines fournies par les bovins (Ickowicz et Moulin, 2022). Certains indicateurs et métriques persistent au fil des décennies sans être réexaminés et continuent de formater les discours du secteur de l'élevage de façon tranchée. Pourtant, les travaux récents incluant le milieu et le contexte local apportent plus d'informations sur les contributions différentielles, voire positives, de l'élevage en fonction de la situation économique et environnementale (Alary et Gautier, 2023; Alary *et al.*, 2024).

La remise en question des métriques en lien avec la diversité des contextes et des multiples contributions de l'élevage devrait permettre d'apporter une vision moins partielle et plus nuancée du secteur de l'élevage dans les transformations agricoles. Les évolutions nécessaires supposent des améliorations en matière d'évaluation de l'impact carbone, et de solutions pour encourager l'atténuation. Parmi ces solutions, des politiques publiques (voir chapitre 25) et des investissements (voir chapitre 26) sont nécessaires pour encourager les systèmes d'élevage vers plus d'autonomie fourragère, moins de recours aux intrants chimiques, plus de production locale d'aliments et vers des modes de conduite moins coûteux en carbone. Il est également indispensable de renforcer le positionnement de l'élevage dans l'agenda climat international. Alors que l'agriculture a été intégrée dans ces instances internationales dans les années 2000, ce n'est qu'en 2011 que la question de l'élevage a été abordée. Au niveau national également, les contributions déterminées au niveau national (CDN) doivent pouvoir mieux inclure le potentiel d'atténuation de l'élevage dans l'action climatique. En 2022, seuls 54% des pays mentionnaient l'élevage dans leurs CDN, soit 88 pays sur 164 (Rose *et al.*, 2021).

6. Références bibliographiques

- Aboul-Naga A., Osman M.A., Alary V., Hassan F., Daoud I., Tourrand J.F., 2014. Raising goats as adaptation process to long drought incidence at the Coastal Zone of Western Desert in Egypt. *Small Ruminant Research*, 121(1), 106-110.
- Alary V., Duteurtre G., Faye B., 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. *INRAE Productions Animales*, 24(1), 145–156. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.1.3246>
- Alary V., Frija A., Rueda Garcia A., 2024. Importance of livestock for rural territories social development. *In: (forthcoming)*, Contribution of the livestock sector to food security and sustainable agrifood systems – benefits, constraints, synergies and trade-offs. Rome, FAO.
- Alary V., Gautier D., 2023. Évaluer la contribution de l'élevage au développement des régions sèches : indicateurs en vue de politiques publiques adaptées. *Perspective*, 60, 1-4. <https://doi.org/10.19182/perspective/37106>
- Assouma M.H., 2016. Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage. Paris, Montpellier, AgroParisTech, 230 p. Thèse de doctorat. <http://agritrop.cirad.fr/593394/>

- Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162: 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.013>
- Aubron C., Huguenin J., Nozières-Petit M.-O., Pocard-Chapuis R., 2022. Trajectoires d'adaptation des élevages dans les territoires : quelle place pour le pâturage ? Quels déterminants ? In : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds.), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*. Versailles, éditions Quæ, 73-80.
- Bénagabou O.I., Blanchard M., Bougouma Yaméogo V.M.C., Vayssières J., Vigne M., Vall E., *et al.*, 2017. Does crop-livestock integration improve energy-use efficiency, recycling and self-sufficiency of small-holder farming systems in Burkina Faso? *Rev. Elev. Med. Vet. Pays Trop.*, 70(2): 31-41, <https://doi.org/10.19182/remvt.31479>
- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.A., Vayssières J., Vigne M., 2022. L'effcience pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. In : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds.), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*. Versailles, éditions Quæ, 86-104.
- Blanfort V., Doreau M., Huguenin J., Lazard J., Porphyre V., Soussana J.F., Toutain B., 2011. Impacts et services environnementaux de l'élevage en régions chaudes. *INRA Productions Animales*, 24, 1, 89-112. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.1.3239>
- Blanfort V., Stahl C., (eds), 2013. Actes du séminaire « Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives ». Cayenne, Guyane française, Cirad, Montpellier, France, 76 p.
- Blanfort V., Vigne M., Vayssières J., Lasseur J., Ickowicz A., Lecomte P., 2015. Les rôles agronomiques de l'élevage dans la contribution à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique au Nord et au Sud. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 5, 1, 107-115.
- Corniaux C., Alary V., Gautier D., Duteurtre G., 2012. Producteur laitier en Afrique de l'Ouest : une modernité rêvée par les techniciens à l'épreuve du terrain. *Autre part*, 62, 17-36.
- Da Cruz Corrêa C., Pocard-Chapuis R., Blanfort V., Bochu J.L., Lescoat P. Impacts of cattle farming practices and associated livestock systems on energy balances and greenhouse gas emissions in the municipality of Paragominas - State of Pará - Amazonia. In: *The role of pastoral livestock and products in climate change. Pastoralism: Research, Policy and Practice*, soumis.
- Dallaporta D., Bochu J.L., Vigne M., Ouliac B., Zoogones L.J., Lecomte P., *et al.*, 2016. Taking into account carbon sequestration of pasture in carbon balance of cattle ranching systems established after deforestation in Amazonia. Proc. 10th Int. Rangeland Congress, Saskatoon, Canada, 6-22 July 2016, 399-400.
- Doreau M., Makkar H.P.S., Lecomte P., 2013. The contribution of animal production to agricultural sustainability. In: *Energy and protein metabolism and nutrition in sustainable animal production*. Springer, 134, 475-485.
- Edouard-Rambaut L.-A., Vayssières J., Versini A., Salgado P., Lecomte P., Tillard E., 2022. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. *Geoderma*, 425:116025. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116025>
- FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas missions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Faye B., 2020. How many large camelids in the world? A synthetic analysis of the world camel demographic changes, *Pastoralism*, 10, 25.
- Franzuebbers A., 2014. Climate change and integrated crop-livestock systems in temperate-humid regions of North and South America: mitigation and adaptation. In: Fuhrer J., Gregory P., *Climate change impact and adaptation in agricultural systems*, CAB International, 124-139.
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., *et al.*, 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO, Rome, 115 p.
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., *et al.*, 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, 327(5967):822-5. <https://doi.org/10.1126/science.1183725>

Huguenin J., Hammouda R.F., Jemaa T., Capron J.M., Julien L., 2015. Évolution des systèmes d'élevage steppiques au Maghreb : adaptation ou métamorphose?. In : *Espaces pastoraux, espaces socioéconomiques particuliers. Pastoralismes du monde*. Avignon, Ed. de la Cardère, 28-31.

Ickowicz A., Hubert B., Blanchard M., Blanfort V., Cesaro J.D., Diaw A., *et al.*, 2023. Multifonctionnalité et diversité des systèmes d'élevage pâturant au service de systèmes alimentaires durables dans le monde : Y a-t-il des leçons à retenir pour l'Europe? *Fourrages*, 253 : 31-46. <https://afpf-asso.fr/revue/les-prairies-au-coeur-des-systemes-alimentaires-circulaires-et-durables?a=2366>

Ickowicz A., Moulin C.-H., 2022. Les élevages familiaux de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales face aux enjeux du développement durable. In : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*, Versailles, éditions Quæ, 12-31.

Idrissou Y., Vall E., Blanfort V., Blanchard M., Alkoiret Traoré I., Lecomte P., 2024. Integrated crop-livestock effects on soil carbon sequestration in Benin, West Africa. *Heliyon*, 10 (7):e28748.

Richard D., Dourmad J.Y., Coulon J.B., Picon-Cochard C., 2013. Élevage et filières animales. In : Soussana J.-F. (ed), *S'adapter au changement climatique : agriculture, écosystèmes et territoires*, Versailles, éditions Quæ.

Rose S., Khatri-Chhetri A., Dittmer K., Stier M., Wilkes A., Shelton S., *et al.*, 2021. Livestock management ambition in the new and updated nationally determined contributions: 2020-2021: Analysis of agricultural sub-sectors in national climate change strategies. Updated October 2022. CCAFS Info Note. Wageningen, The Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture & Food Security (CCAFS).

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C. 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome, FAO, 414 p.

Teyssier d'Orfeuille, J., Berger Y., Lejeune H., 2015. Cartographie des initiatives d'influence en matière d'élevage au niveau international (Mission° 14098). Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER), ministère de l'Agriculture de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt. <https://agriculture.gouv.fr/cartographie-des-initiatives-dinfluence-en-matiere-delevage-au-niveau-international>

Vall E., Diallo M., 2009. Savoirs techniques locaux et pratiques : la conduite des troupeaux au pâturage (BF). *NSS*, 17 (2) : 122-135.

Vigne M., Blanfort V., Vayssières J., Lecomte P., Steinmetz P., 2015. Contraintes sur l'élevage dans les pays du Sud : les ruminants entre adaptation et atténuation. In : Torquebiau E. (ed.), *Changement climatique et agricultures du monde*. Versailles, éditions Quæ, 123-135.

Partie 3

Atténuer et adapter les systèmes
agricoles et alimentaires :
quelles solutions, quelles synergies ?

Chapitre 17

Séquestration du carbone dans le sol : une solution pour atténuer le changement climatique et s'y adapter ?

Julien Demenois, Damien Beillouin, David Berre, Vincent Blanford, Rémi Cardinael, Abigail Fallot, Frédéric Feder, Christophe Jourdan, Dominique Masse, Tom Wassenaar

Le sol est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, qui depuis le début de l'humanité nourrit les hommes. Aujourd'hui, 95 % des éléments nutritifs de notre alimentation en proviennent (FAO, 2022). Cependant, la capacité du sol à continuer de nourrir l'humanité est menacée par le changement climatique et elle est déjà altérée par divers types de dégradations : artificialisation, érosion, pollution, salinisation. La dégradation du sol et des formations végétales concerne au niveau mondial déjà 75 % des terres émergées et menace la subsistance de plus d'un milliard de personnes (Cherlet *et al.*, 2018). Cette dégradation inclut la perte de carbone organique du sol (COS), principal constituant des matières organiques du sol. Le COS assure de nombreuses fonctions environnementales et agricoles (fertilité, biodiversité, rétention de l'eau, etc.). De fait, le sol joue un rôle majeur dans le cycle du carbone et dans la régulation du climat.

Le stock de COS, hors pergélisol, est trois fois plus élevé que celui de l'atmosphère. Le sol est ainsi le plus grand réservoir de carbone terrestre : 2 400 GtC entre 0 et 2 m de profondeur à l'échelle du globe. Ce stock se trouve majoritairement dans le sol des forêts (30 %) et des prairies (30 % à 35 %), et dans une moindre mesure dans le sol des terres cultivées (15 %) (Lal *et al.*, 2012), où il est néanmoins plus sujet à variations. À cela s'ajoute le carbone du pergélisol (plus de 1 600 Gt entre 0 et 3 m de profondeur). La fonte du pergélisol liée à l'augmentation moyenne de la température à la surface du globe (+ 1,48 °C par rapport à la période 1850-1900) libère de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES), sans commune mesure avec les quantités de carbone susceptibles d'être absorbées par la photosynthèse et par la croissance de la végétation, aggravant de fait le changement climatique.

Les changements d'usage des terres sont une autre source majeure d'émissions nettes de GES. Au cours des dernières décennies (1960-2020), près d'un tiers de la surface terrestre mondiale a subi un changement d'affectation du sol (Winkler *et al.*, 2021). La conversion d'écosystèmes naturels en terres agricoles a ainsi entraîné une perte cumulée de 116 GtC dans les deux premiers mètres du sol (Sanderman *et al.*, 2017). Outre la conversion d'écosystèmes, les activités humaines ont un impact profond sur le COS, réduisant sa contribution aux services écosystémiques (Ma *et al.*, 2023).

La teneur en COS peut néanmoins être modulée, permettant au sol de séquestrer du carbone, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique en inversant ces

tendances de dégradation et de perte de COS. La séquestration du carbone dans les sols est définie comme le « processus de transfert du carbone de l'atmosphère dans le sol par l'intermédiaire des plantes ou d'autres organismes, qui est retenu sous forme de carbone organique dans le sol, ce qui entraîne une augmentation du stock mondial de carbone dans le sol » (Olson *et al.*, 2014).

En matière de régulation du climat, le COS représenterait 9 % du potentiel d'atténuation des forêts, et 47 % de celui de l'agriculture et des prairies selon Bossio *et al.* (2020). Le maintien ou l'augmentation du stock de COS constitue l'une des rares options identifiées par le Giec (IPCC, 2019) permettant de contribuer simultanément à l'atténuation du changement climatique, à la lutte contre la dégradation des terres et à la perte de biodiversité, tout en améliorant la sécurité alimentaire. Ces synergies sont à l'origine du lancement de l'Initiative internationale « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » lors de la COP21 sur le climat en 2015.

Le stock de COS dépend de nombreux facteurs à différentes échelles, du climat aux propriétés physico-chimiques du sol, en passant par l'usage des terres et les pratiques de gestion (Wiesmeier *et al.*, 2019). L'usage des terres et les pratiques de gestion façonnent les entrées et les sorties de carbone à l'échelle de la parcelle ainsi que la qualité des entrées de carbone, et peuvent modifier le renouvellement du stock de COS (Fujisaki *et al.*, 2018). Ces pratiques de gestion et ces choix d'usage des terres sont dépendants de facteurs socio-économiques et politiques, que ce soient par exemple leurs coûts de mise en œuvre ou encore le niveau de compétences qu'elles requièrent, davantage que de facteurs techniques (Amundson et Biarreau, 2018). De fait, le territoire, défini comme un socio-écosystème, est l'échelle focale où les questions d'aménagement du sol et des terres peuvent être discutées et leurs conséquences évaluées sur la séquestration du carbone dans le sol (Demenois *et al.*, 2020).

Dans une première partie, ce chapitre présente les impacts du changement climatique, du changement d'usage des terres et des pratiques agricoles sur le COS et identifie les solutions techniques pour préserver ou pour stocker davantage de carbone dans le sol. Dans une deuxième partie, les approches territoriales sont discutées à travers l'exemple de l'Afrique de l'Ouest semi-aride et subhumide, permettant d'illustrer l'importance des dimensions socio-économiques et politiques. Enfin, un regard critique est porté sur la séquestration du carbone dans le sol à travers le prisme des risques de maladaptation au changement climatique.

1. L'impact des activités humaines sur le carbone organique du sol et ses implications pour la régulation du climat

L'usage des terres et les pratiques de gestion sont des leviers majeurs de la séquestration du COS. La préservation et la restauration du COS représentent à elles seules jusqu'à 25 % du potentiel de l'ensemble des solutions fondées sur la nature (SFN) pour lutter contre le changement climatique (Bossio *et al.*, 2020). Le premier levier réside donc dans la préservation des écosystèmes riches en carbone tels que les tourbières, les forêts anciennes, les zones humides et les mangroves, qui détiennent ensemble au moins 10 % du stock mondial de carbone du sol (260 Gt) (Noon *et al.*, 2022). Ce stock ne peut se reconstituer à l'échelle d'une génération, leur préservation est donc essentielle.

De récents travaux (Beillouin *et al.*, 2023) ont montré que les effets du changement d'utilisation des terres sur le COS étaient de sept à dix fois supérieurs par unité de surface aux effets directs du changement climatique (comme l'augmentation de température, du CO₂). Par exemple, la conversion des forêts, des prairies ou des zones humides en terres agricoles entraîne une perte de COS de l'ordre de 25 %, 16 % et 25 % en moyenne, respectivement. Ces pertes, combinées à la conversion de vastes zones en terres agricoles au cours des dernières décennies (environ 1 million de kilomètres carrés au cours des soixante dernières années), ont ainsi contribué de manière substantielle à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. La conversion des milieux naturels en terres cultivées a des conséquences à long terme, car le COS perdu mettra des décennies, voire davantage, à revenir à son niveau initial, si des pratiques permettant de reconstituer le stock sont à nouveau et durablement adoptées (Dignac *et al.*, 2017). Par exemple, en Amazonie française (Guyane française), dans des prairies issues de déforestation sans utilisation du feu, Stahl *et al.* (2017) ont mis en évidence que le stock de COS sous prairie gérée en pâturage tournant et avec des légumineuses retrouve son niveau d'avant déforestation après 24 ans et continue à augmenter, notamment en profondeur (inférieure à 1 m) (Stahl *et al.*, 2016). L'augmentation de COS dans ces systèmes herbagers atteint potentiellement un niveau élevé ($1,27 \pm 0,37$ tC/ha/an), essentiellement dans le COS (Blanfort *et al.*, 2022). La perte de carbone de la biomasse forestière du fait de la déforestation est en revanche définitive. Cependant, l'effet du changement d'utilisation des terres sur le COS n'a que rarement fait l'objet d'études systématiques, que ce soit en Afrique du Nord, en Afrique centrale, au Proche-Orient ou en Asie centrale.

La restauration du stock de COS dans les écosystèmes cultivés est un second levier important pour séquestrer le carbone dans le sol (Cook-Patton *et al.*, 2021). De nombreuses pratiques agricoles permettent d'accroître localement le COS, telles que l'ajout de matière organique exogène ou la production *in situ* de matière organique. L'origine de la matière organique, les effets par unité de surface de ces pratiques sur le carbone et les surfaces disponibles pour leur mise en œuvre vont déterminer la séquestration globale du carbone. Des travaux récents tentent de quantifier plus précisément ces effets et d'identifier les pratiques les plus prometteuses.

L'agroforesterie est identifiée comme une des options les plus efficaces par augmentation *in situ* de la matière organique : les arbres augmentent d'en moyenne 20 % (Beillouin *et al.*, 2023) à 25 % (Cardinael *et al.*, 2018a) le COS dans les terres arables par rapport à des systèmes sans arbres (encadré 17.1). La superficie mondiale agricole en agroforesterie est estimée à 1,6 milliard d'hectares, avec environ 78 % dans les régions tropicales et 22 % dans les régions tempérées (Nair *et al.*, 2021), avec un fort potentiel pour encore augmenter les surfaces (Zomer *et al.*, 2022). Ainsi, les estimations mondiales du potentiel d'atténuation de l'agroforesterie varient de 0,12 GtC/an à 0,31 GtC/an, la plaçant ainsi comme une des principales solutions fondées sur la nature pour lutter contre le changement climatique (Terasaki Hart *et al.*, 2023).

D'autres pratiques de diversification des cultures peuvent aussi permettre d'augmenter le COS. Ainsi, l'intégration de plantes de couverture, le maintien des résidus de culture dans les parcelles ou le recours à des rotations culturales permettent d'augmenter le COS de 11,6 %, 13 % et 6,5 % par hectare en moyenne (Beillouin *et al.*, 2023). Certains auteurs estiment que jusqu'à 50 % des 800 Mha de terres cultivées sont propices au recours à des plantes de couverture (Bossio *et al.*, 2020), résultant en une séquestration approximative possible de carbone de 0,11 GtC/an.

Les apports de carbone exogène permettent aussi de fortes augmentations locales des stocks de COS dans les terres cultivables et les prairies (Beillouin *et al.*, 2023). Cependant, l'intérêt des apports de carbone exogène dans l'atténuation du changement climatique peut être limité en fonction de la provenance de ces matières organiques (Don *et al.*, 2023) et de la faisabilité technicoéconomique de leur production. Beillouin *et al.* (2023) relèvent que le biochar¹ conduit à la plus forte augmentation observée par unité de surface, avec un gain moyen de COS de 67 % dans les terres cultivables et de 32 % dans les prairies. L'application de biochar a donc un potentiel d'atténuation du changement climatique fort (Lehman *et al.*, 2021), mais variable en fonction du taux d'application et des propriétés physico-chimiques des biochars.

Encadré 17.1. Deux exemples de systèmes agroforestiers

De nombreux types d'agroforesteries sont efficaces pour augmenter les stocks de COS : l'intégration d'arbres dans les terres agricoles entraîne une augmentation moyenne du COS de 33 % pour les systèmes multistratifiés, de 32 % pour les parcs arborés, de 21 % pour l'agroforesterie intraparcellaire, de 19 % pour les jachères améliorées (pratiquées en régions tropicales) et de 17 % pour les haies (Beillouin *et al.*, 2023). La plantation d'arbres dans les prairies (c'est-à-dire le sylvopastoralisme) entraîne également une augmentation significative du COS de 26 %. À noter que l'agroforesterie peut aussi stocker des quantités importantes de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine des arbres (Cardinael *et al.*, 2018a). L'agroforesterie existe et peut être mise en œuvre dans les pays du Nord (voir ci-dessous un exemple dans le sud de la France) et dans les pays du Sud (voir ci-dessous un exemple au Sénégal). Les pays évoquent ainsi régulièrement l'agroforesterie pour l'atténuation du changement climatique. Par exemple, 40 % des 147 pays hors annexe I du protocole de Kyoto proposent l'agroforesterie comme option d'atténuation des émissions de GES dans leurs contributions déterminées au niveau national (Rosenstock *et al.*, 2019).

Le système agroforestier de Restinclières dans le sud de la France

Le domaine de Restinclières abrite depuis 1995 l'un des sites expérimentaux en agroforesterie intraparcellaire parmi les plus anciens de France, associant du noyer hybride à du blé dur (figure 17.1). Une parcelle agricole adjacente sans arbre sert de référence. Sur ce site, une centaine de carottes de sol ont été prélevées jusqu'à 2 m de profondeur dans chaque parcelle pour quantifier les stocks de COS. Les entrées de carbone organique (CO) au sol, aériennes (chute des feuilles) et souterraines (racines fines des arbres et des cultures), ont aussi été quantifiées. Une augmentation du stock de COS de 6,3 tC/ha a été observée en agroforesterie au bout de dix-huit ans. Cela correspond à un taux de stockage de 248 ± 31 kgC/ha/an dans les trente premiers centimètres du sol, et de 350 ± 41 kgC/ha/an dans le premier mètre (Cardinael *et al.*, 2015), soit une augmentation de 7 %/an. À cela s'ajoute une accumulation de carbone dans la biomasse des arbres de 770 ± 110 kgC/ha/an (Cardinael *et al.*, 2017). Ce stockage additionnel de COS est expliqué par une augmentation des entrées de CO au sol d'environ 40 % par rapport à la parcelle agricole (Cardinael *et al.*, 2018b). La végétation herbacée se développant sur la ligne d'arbres joue un rôle important. Une forte hétérogénéité spatiale existe, le COS étant majoritairement

1. Biochar : matériau carboné produit à partir de biomasses et dont l'utilisation permet que le carbone qu'il contient constitue un « puits de carbone » à long terme selon l'European Biochar Council. Le biochar est fabriqué par pyrolyse de la biomasse à températures élevées (entre 350 °C et 1 000 °C) en l'absence d'oxygène.

Encadré 17.1. (suite)

stocké sur les lignes d'arbres. La majorité du carbone additionnel est sous la forme de matières organiques particulières labiles, et donc sensibles à tout changement futur d'usage des terres (Cardinael *et al.*, 2015).



Figure 17.1. Site expérimental de Restinclières en agroforesterie intraparcélaire associant du noyer hybride à du blé dur. Crédit : photo de R. Cardinael.

Le parc agroforestier à *Faidherbia* de Niakhar (Sénégal) : cas de l'impact des systèmes racinaires de *Faidherbia albida* dans le cycle du carbone

L'impact des systèmes agro-sylvopastoraux du Sahel sur le cycle du carbone et les flux de GES est très peu documenté. Les apports de litière souterraine sont cruciaux, mais on sait peu de choses sur la distribution, la productivité et la contribution du système racinaire aux apports de carbone dans le sol. Pour augmenter le stockage du carbone dans les sols cultivés, il apparaît nécessaire de mieux comprendre la dynamique du carbone, en particulier en profondeur, là où la décomposition de la litière racinaire semble plus lente que dans la couche arable. Dans un parc agro-sylvopastoral du bassin arachidier au Sénégal, dominé par *Faidherbia albida* en culture intercalaire avec du mil et de l'arachide en rotation interannuelle, la variabilité temporelle et spatiale des flux de GES ainsi que la dynamique de l'apport de carbone issu des racines dans le sol ont été suivies sur plusieurs années.

De manière inattendue, la biomasse racinaire des arbres était plus élevée à plus de trente mètres du tronc que sous l'arbre dans la couche de sol de 30 à 100 cm, ce qui suggère une influence à longue distance des *Faidherbia* (Siegwart *et al.*, 2023). Jusqu'à 150 cm de profondeur, la contribution de la litière racinaire des arbres aux stocks de carbone du sol représente 6,5% des apports totaux de carbone du sol. Dans ce type de parc en zone semi-aride avec de faibles stocks de carbone dans le sol, l'augmentation de la densité des arbres ou la sélection de cultures à enracinement profond devraient être favorisées pour atténuer les émissions de CO₂.

L'application de biochar permet de stocker du carbone à plus long terme que l'application directe de la biomasse dont il est issu. Cela est vrai même en tenant compte des émissions de GES qui se produisent lors de sa production et de sa manipulation. Cependant, la rareté de la biomasse dans certaines régions ou sa concurrence avec l'alimentation du bétail, en particulier dans les pays d'Afrique subsaharienne, ne rend pas forcément possible ou souhaitable la production à grande échelle de biochar. Il convient aussi de tenir compte des éventuels effets néfastes du biochar sur les propriétés du sol (comme la toxicité des substances présentes dans le biochar qui peuvent être générées au cours du processus de pyrolyse) et sur la biodiversité (Brtnicky *et al.*, 2021). Les amendements organiques appliqués dans les terres cultivables, autres que le biochar, permettent quant à eux un gain moyen de COS de 29 %, et de 34 % dans les prairies. À La Réunion, Edouard-Rambaut *et al.* (2022) ont mis en évidence qu'un apport d'amendement organique pendant quinze ans dans des prairies fauchées continue à induire une augmentation du COS, notamment dans les horizons profonds du sol.

De nombreuses pratiques telles que le travail du sol, les différents modes de pâturage, la fertilisation minérale peuvent aussi avoir des impacts non négligeables sur le COS. Les effets des différentes pratiques sont variables en fonction des conditions pédoclimatiques et des pratiques agricoles. Elles peuvent être combinées entre elles, et apportent souvent d'autres cobénéfices, comme une préservation de la biodiversité ou de rendement. Les pratiques des agriculteurs ne sont pas à raisonner individuellement, mais en prenant aussi en compte les différents compartiments de l'écosystème (animaux, sol, végétation) et les différentes échelles spatiales (parcelle, ferme, territoire). Ainsi, des études à l'échelle du paysage montrent que les paysages pastoraux au Sahel peuvent avoir un potentiel inattendu pour l'atténuation du changement climatique. Par exemple, le bilan carbone d'un territoire sylvopastoral du Ferlo Nord (au Sénégal) apparaît à l'équilibre lorsque le COS est pris en compte dans ce bilan (Assouma *et al.*, 2019), alors que ces terres d'élevage sont classiquement considérées comme des sources de GES.

2. En Afrique de l'Ouest semi-aride et subhumide, les approches territoriales pour penser l'usage de la biomasse et les flux de nutriments

Les systèmes agro-sylvopastoraux d'Afrique de l'Ouest sont définis par l'intégration de l'agriculture avec des activités d'élevage et par un rôle central des arbres que ce soit à travers les savanes arborées, les jachères ou les parcs agroforestiers. L'organisation spatiale des territoires, associant étroitement la zone cultivée et la zone non cultivée, engendre d'importants transferts de fertilité des sols et influence fortement le statut organique des sols et les stocks de carbone dans les sols ainsi que la durabilité des systèmes de production agricoles.

Le Cirad et ses partenaires mènent de nombreux projets dans la zone semi-aride et subhumide d'Afrique de l'Ouest², où la question de la séquestration de carbone dans le sol est liée au maintien de la fertilité de celui-ci, avant d'être une préoccupation d'atténuation des effets du changement climatique. Dans cette région où les rendements agricoles sont fortement limités par l'accès aux intrants, une mécanisation limitée, des sols peu fertiles et par la faible pluviosité (Giller *et al.*, 2021), la séquestration de

2. <https://www.fair-sahel.org/>, <https://www.cassecs.org/>, <https://ur-aida.cirad.fr/nos-recherches/projets-et-expertises/3f2>.

carbone est contrainte par la faible quantité de carbone stockée par la photosynthèse. Dans ce contexte, la valorisation des résidus de culture apparaît donc comme une nécessité pour recycler le carbone, et deux voies s'opposent historiquement : restituer au sol les résidus de culture ou les utiliser pour alimenter le bétail, ce dernier pouvant fournir de la fumure organique utile au maintien de la fertilité des sols (Naudin *et al.*, 2015).

Dans ces systèmes agro-sylvopastoraux, il est difficile d'enclencher un cercle vertueux de gestion de la biomasse par l'intégration agriculture-élevage à l'échelle de la ferme. Le manque de biomasse conduit les animaux à quitter la ferme pour aller chercher les résidus dans les champs voisins ou même dans des régions plus humides lors de grandes transhumances. Dans ce contexte d'expansion des surfaces cultivées et de présence de vaines pâtures dans des paysages ouverts, les résidus sont récoltés par les producteurs pour subvenir aux besoins fourragers de leurs troupeaux. Toutefois, Zoungrana *et al.* (2023) ont montré que jusqu'à 60 % de ces résidus étaient laissés au champ ou brûlés par manque de ressources (travail, matériel). Ces zones de production sont marquées par une présence importante de la culture du coton (synonyme d'accès aux intrants pour les producteurs), dont les résidus sont peu digestes et donc difficilement valorisables par les ruminants. Dans un contexte plus aride dans le nord du Burkina, Assogba *et al.* (2023) ont également démontré que les résidus de récolte stockés ne permettent pas de couvrir les besoins des animaux (énergie et protéine) durant la saison sèche.

C'est alors à l'échelle régionale qu'il convient de réfléchir à l'optimisation des flux de nutriments entre les systèmes de culture et les systèmes de production animale, en interaction avec les autres unités paysagères. Les zones pastorales communes constituent une source de biomasse cruciale pour l'équilibre des écosystèmes, dans des zones parfois difficilement cultivables, que les troupeaux valorisent en paissant et fertilisent en y déposant les fèces. Il faut noter toutefois que dans certains cas les bouses de vaches déposées dans ces zones de pâture sont aussi récoltées et rapportées dans les zones de cultures, mettant en péril la fertilité de ces zones sur le long terme (Sattari *et al.*, 2016). Ce transfert de fertilité entre les zones de pâtures et les zones cultivées doit donc nécessairement se faire en respectant les équilibres de nutriments de chaque partie, sans quoi il ne pourra durablement permettre de compenser la faible productivité des systèmes de culture de la région.

Les conflits autour de ces zones pastorales, ou leur simple disparition progressive au profit des cultures, ont mis en danger d'autres espaces tels que les forêts protégées dans le sud du Burkina Faso (Koumbia). En réponse aux contraintes d'accès à des ressources fourragères cultivées ou à des zones de pâtures, les éleveurs de cette région viennent dans la forêt faire paître leurs animaux illégalement. Orounlatji *et al.* (2024) ont également démontré que les ressources communes (points d'eau, résidus de culture, zones de pâture) sont essentielles à la viabilité des systèmes agro-sylvopastoraux. L'analyse doit donc inclure les dimensions politique et territoriale.

Pour identifier les conditions de séquestration du carbone et préciser les pratiques correspondantes, il convient donc de s'interroger sur les possibilités à l'échelle d'un territoire d'optimiser les flux de nutriments. Pour quantifier ces flux, la modélisation est un outil pertinent permettant de spatialiser des résultats localisés et de caractériser les dynamiques temporelles de fertilité liée à ces flux. Berre *et al.* (2021) ont mobilisé la modélisation multiagent pour démontrer que le paillis à base de résidus de culture entraînait une baisse de la fertilité à l'échelle du territoire dans le sud du Burkina Faso.

Assogba *et al.* (2023) ont montré grâce à ce type de modèle que l'introduction des légumineuses améliore en effet la fertilité des sols, mais au détriment de la sécurité alimentaire des ménages. Celle-ci dépend largement des céréales et de la couverture des besoins fourragers des animaux. Les mêmes auteurs démontrent que ce sont les zones de pâtures extérieures au territoire qui permettent d'assurer la couverture des besoins fourragers et que l'apport d'azote exogène est indispensable pour maintenir la fertilité chimique des sols (Falconnier *et al.*, 2023).

Afin de saisir les processus en jeu et leurs conséquences à l'échelle du territoire, ces réflexions doivent intégrer les perceptions d'une diversité d'acteurs. Parmi les méthodes participatives innovantes, le développement de jeux sérieux a permis de fédérer les acteurs autour de problématiques à l'échelle du territoire (figure 17.2).



Figure 17.2. Mise en œuvre d'un jeu sérieux avec différents types d'acteurs pour mettre en discussion des flux de biomasse (gauche) ou des contraintes des éleveurs (points d'eau, zones de pâture) (droite). Crédit : photos de G. Assogba (photo de gauche) et de D. Dabire (photo de droite).

Ce descriptif montre l'importance d'une appréhension territoriale des questions liées à la dynamique locale des matières organiques du sol. Une partie des sols peut contribuer à produire de la biomasse et donc à capter du carbone alors que d'autres sols seront des réceptacles de matières organiques et de carbone. Tout comme raisonner la durabilité des systèmes et la sécurité alimentaire des populations, la séquestration du carbone dans le sol s'analyse en prenant en compte la complexité des systèmes de production agricole à l'échelle d'une unité territoriale. De même, l'histoire de ces systèmes agro-sylvopastoraux en région aride et semi-aride subsaharienne montre que les contraintes environnementales, sociales et économiques ne sont pas linéaires ou immuables. Cela nécessite de pouvoir estimer les risques sur le temps long des changements qui peuvent affecter cette complexité et *in fine* les processus de séquestration du carbone dans le sol, tout comme bien entendu la durabilité de ces agroécosystèmes.

La nécessité d'appréhender différentes échelles spatiales pour contribuer à l'atténuation du changement climatique, notamment *via* le sol, et d'innover en matière d'espace est également illustrée à travers l'exemple du projet TerrAmaz dans des territoires amazoniens du Brésil, de Colombie, d'Équateur et du Pérou (voir chapitre 22).

3. La séquestration du carbone dans le sol et le risque de maladaptation

Outre la contribution à l'atténuation, décrite précédemment, la séquestration du carbone dans le sol participe de l'adaptation au changement climatique, dans la mesure où elle améliore la capacité du sol à aider un territoire à faire face aux aléas

climatiques. Par exemple, si le COS augmente, on peut s'attendre à un sol en meilleure santé, avec une meilleure productivité, avec un cycle des nutriments plus efficient pouvant impliquer des usages moindres d'engrais minéraux, avec des plantes moins sujettes à des attaques d'agents pathogènes donc un usage moindre de pesticides, avec des activités biologiques et une biodiversité mieux conservées, etc. Tout cela contribue à une réduction de la vulnérabilité de l'agrosystème concerné face aux changements climatiques en cours ou futurs.

Penser l'adaptation amène à s'interroger plus largement sur les conditions et sur la portée d'actions menées pour séquestrer du carbone dans le sol. Quelle est la vulnérabilité du territoire concerné aux conséquences du changement climatique? Dans quelle mesure la séquestration du carbone dans le sol contribue-t-elle à réduire cette vulnérabilité? Quels sont les autres déterminants susceptibles de faire évoluer la vulnérabilité d'un territoire? En effet, comme toute mesure relevant de l'action climatique, la séquestration du carbone correspond à un objectif parmi une multiplicité d'objectifs, notamment socio-économiques, pour un même territoire. Il s'agit de prendre en compte ces différents processus faisant fonctionner et évoluer le socio-écosystème dans lequel on considère la séquestration du carbone.

Si, du fait de ces processus ou d'un événement inattendu, une action visant l'adaptation au changement climatique a des effets néfastes et contraires aux effets positifs attendus, l'adaptation devient maladaptation (Reckien *et al.*, 2023; IPCC, 2023). Tel peut être le cas d'une mesure de restauration du sol qui ne tient pas compte des besoins de base des populations locales en cultures vivrières et bois de chauffe, d'une mesure permettant l'augmentation des rendements agricoles mais qui réduit la biodiversité ou qui augmente indirectement les émissions de GES.

Au-delà de l'idée que les interventions sont « bonnes » ou « mauvaises », la mise en évidence d'un continuum entre l'adaptation et la maladaptation souligne comment les interventions peuvent, de manière complexe et changeante, avoir des résultats mitigés sur la base d'un certain nombre de critères d'évaluation. Ces critères incluent les conséquences pour les personnes (qui bénéficie, qui est affecté négativement?) et sur les inégalités (sont-elles réduites, exacerbées?), pour les services écosystémiques (lesquels sont améliorés ou préservés, lesquels sont dégradés ou mis en péril?), pour le bilan global des GES. Il est nécessaire de proposer un cadre d'évaluation qui prenne en compte ces différents critères. Ce cadre devra être construit avec l'ensemble des parties prenantes. En effet, une évaluation dépend du contexte local dans lequel une planification de transformation est mise en œuvre, des personnes qui mettent en œuvre ces changements, et de celles qui évaluent et décident de la pertinence d'une adaptation.

Dans ce cadre d'évaluation, la question du temps est majeure. Les processus d'adaptation ont des impacts parfois à très long terme. Cela est le cas pour la constitution d'un stock de matière organique significatif qui prend plusieurs années, voire plusieurs décennies. Les difficultés apparaissent alors pour pouvoir évaluer le potentiel de stockage dans le sol ainsi que le bilan des flux de GES qui permettront l'objectif à atteindre et la possibilité de le mesurer. De même, tout au long de ce processus, des contraintes environnementales peuvent survenir, modifiant les processus biophysiques engagés. Par exemple, des évolutions climatiques peuvent agir de façon rétroactive sur les dynamiques biologiques qui déterminent la constitution du compartiment organique du sol. Mais de façon plus prégnante, il existe des risques importants de changements des conditions socio-

économiques des acteurs concernés, les obligeant à modifier des pratiques, comme supprimer des arbres dans un système agroforestier ou devoir s'adapter à un manque de force de travail, etc. Tous ces facteurs sont difficiles à déterminer sur le temps long. Il est cependant possible d'établir, à partir des critères de différenciation entre adaptation et maladaptation, des points de vigilance qu'il sera nécessaire d'observer et qui permettront de mener des actions correctives ou de lancer un nouveau processus d'adaptation.

4. Conclusion

Ce chapitre a montré que la séquestration du carbone dans le sol est porteuse de solutions pour atténuer les effets du changement climatique, au Nord comme au Sud, sous réserve qu'elle se décline de manière contextualisée. Il est fondamental de considérer la dimension territoriale, le sol pouvant être vu comme un capital foncier, car elle est garante de la prise en compte des dimensions socio-économiques et politiques et des interactions spatiales. Enfin, l'analyse des risques de maladaptation liés à la séquestration du carbone dans le sol s'avère essentielle pour gérer les enjeux de court et de long terme et pour rechercher la justice sociale, la condition indispensable à l'action climatique. C'est sous ces conditions que la séquestration du carbone dans le sol sera une solution pour atténuer le changement climatique et pour s'y adapter.

5. Références bibliographiques

- Amundson R., Biardeau L., 2018. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*, 115: 11652-11656. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1815901115
- Assogba G.G.C., Berre D., Adam M., Descheemaeker K., 2023. Can low-input agriculture in semi-arid Burkina Faso feed its soil, livestock and people? *European Journal of Agronomy*, 151.
- Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.013>
- Beillouin D., Corbeels M., Demenois J., Berre D., Boyer A., Fallot A., *et al.*, 2023. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nature Communications*, 14(1), 3700.
- Berre D., Diarisso T., Andrieu N., Le Page C., Corbeels M., 2021. Biomass flows in an agro-pastoral village in West-Africa: who benefits from crop residue mulching? *Agric Syst*, 187:102981. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102981>
- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.A., Vayssières J., Vigne M., 2022. L'efficacité pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique. In : Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds), *Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux. Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses*, Versailles, éditions Quæ, 86-104.
- Bossio D.A., Cook-Patton S.C., Ellis P.W., Fargione J., Sanderman J., Smith P., *et al.*, 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 3(5), 391-398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., Gusiati Z.M., Kuceric J., *et al.*, 2021. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Sci. Total Environ.* 796, 148756.
- Cardinael R., Chevallier T., Barthès B.G., Saby N.P.A., Parent T., Dupraz C., *et al.*, 2015. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, (259-260), 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>
- Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Béral C., Barthès B.G., Dupraz C., *et al.*, 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>

- Cardinael R., Guenet B., Chevallier T., Dupraz C., Cozzi T., Chenu C., 2018b. High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system - Combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15, 297-317. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-125>
- Cardinael R., Umulisa V., Toudert A., Olivier A., Bockel L., Bernoux M., 2018a. Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environ. Res. Lett.* 13, 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaeb5f>
- Cherlet M., Hutchinson C., Reynolds J., Hill J., Sommer S., von Maltitz G. (Eds.), 2018. World Atlas of Desertification, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Cook-Patton S.C., Drever C.R., Griscom B.W., Hamrick K., Hardman H., Kroeger T., *et al.*, 2021. Protect, manage and then restore lands for climate mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 11, 1027-1034. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01198-0>
- Demenois J., Torquebiau E., Arnoult M.H., Eglin T., Masse D., Assouma M.H., *et al.*, 2020. Barriers and Strategies to Boost Soil Carbon Sequestration in Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(37), <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00037>
- Dignac M.-F., Derrien D., Barré P., Barot S., Cécillon L., Chenu C., *et al.*, 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>
- Don A., Seidel F., Leifeld J., Kätterer T., Martin M., Pellerin S., *et al.*, 2023. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation – Definitions and pitfalls. *Glob. Chang. Biol.* e16983. <https://doi.org/10.1111/gcb.16983>
- Edouard-Rambaut L.-A., Vayssières J., Versini A., Salgado P., Lecomte P., Tillard E., 2022. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. *Geoderma*, 425:116025. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116025>
- Falconnier G.N., Cardinael R., Corbeels M., Baudron F., Chivenge P., Couédel A., *et al.*, 2023. The input reduction principle of agroecology is wrong when it comes to mineral fertilizer use in sub-Saharan Africa. *Outlook on Agriculture*, 52,3, 311-326. <https://doi.org/10.1177/00307270231199795>
- FAO, 2022. Soils for nutrition: state of the art. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- Fujisaki K., Chevallier T., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Masse D., *et al.*, 2018. Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 259, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008>
- Giller K.E., Delaune T., Silva J.V., van Wijk M., Hammond J., Descheemaeker K., *et al.*, 2021. Small farms and development in sub-Saharan Africa: Farming for food, for income or for lack of better options? *Food Secur.* 1-24.
- IPCC, 2019. Summary for policymakers. *In: Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* Cambridge university press, 1-41.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J., 2012. Terrestrial Biosphere as a Source and Sink of Atmospheric Carbon Dioxide. *In: Lal R., Lorenz K., Hüttl R.F., Schneider B.U., von Braun J. (Eds.), Recarbonization of the biosphere: ecosystems and the global carbon cycle,* Dordrecht, Springer, 1-15.
- Lehmann J., Cowieg A., Masiello C.A., Kammann C., Woolf D., Amonetteg J.E., *et al.*, 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 14, 883-892.
- Ma Y., Woolf D., Fan M., Qiao L., Li R., Lehmann J., 2023. Global crop production increase by soil organic carbon. *Nat. Geosci.* 16, 1159-1165. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01302-3>
- Nair P.K.R., Kumar B.M., Nair V.D., 2021. Global Distribution of Agroforestry Systems. *In: An Introduction to Agroforestry.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0_4
- Naudin K., Bruelle G., Salgado P., Penot E., Scopel E., Lubbers M., *et al.*, 2015. Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agric. Syst.* 134, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.03.003>

- Noon M.L., Goldstein A., Ledezma J.C., Roehrdanz P.R., Cook-Patton S.C., Spawn-Lee S.A., *et al.*, 2022. Mapping the irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. *Nat. Sustain.* 5, 37-46. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00803-6>
- Olson K.R., Al-Kaisi M.M., Lal R., Lowery B., 2014. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 348-360. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.09.0412>
- Orounladji B.M., Sib O., Berre D., Assouma M.H., Dabire D., Sanogo S., Vall E., 2024. Cross-examination of agroecology and viability in agro-sylvo-pastoral systems in Western Burkina Faso. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(4), 581-609. <https://doi.org/10.1080/21683565.2024.2307902>
- Reckien D., Magnan A.K., Singh C., Lukas-Sithole M., Orlove B., Schipper E.L.F., *et al.*, 2023. Navigating the continuum between adaptation and maladaptation, *Nature Climate Change*, 13 (9): 907-918. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01774-6>
- Rosenstock T.S., Wilkes A., Jallo C., Namoi N., Bulusu M., Suber M., *et al.*, 2019. Making trees count: Measurement and reporting of agroforestry in UNFCCC national communications of non-Annex I countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 284, 106569.
- Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J., 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 9575-9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Sattari S.Z., Bouwman A.F., Martinez Rodriguez R., Beusen A.H.W., van Ittersum M.K., 2016. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. *Nature Communications*, 7, 10696. <https://doi.org/10.1038/ncomms10696>
- Siegwart L., Bertrand I., Rounsard O., Jourdan C., 2023. Contribution of tree and crop roots to soil carbon stocks in a Sub-Saharan agroforestry parkland in Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 352, 108524. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108524>
- Stahl C., Fontaine V., D ez cache C., Ponchant L., Freycon V., Picon-Cochard C., *et al.*, 2016. Soil carbon stocks after conversion of Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers. *Regional Environmental Change*, 16, 2059-2069. <https://www.doi.org/10.1007/s10113-016-0936-0>
- Stahl C., Fontaine V., Klumpp K., Picon-Cochard C., Freycon V., Grise M.M., *et al.*, 2017. Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. *Global Change Biology*, 23(8), 3382-3392. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13573/full>
- Terasaki Hart D., Yeo S., Almaraz M., Beillouin D., Cardinael R., Garcia E., *et al.*, 2023. Priority Science Can Accelerate Agroforestry as a Natural Climate Solution. *Nat. Clim. Chang.* 13, 1179-1190. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01810-5>
- Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., von L utzow M., Marin-Spiotta E., *et al.*, 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales, *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold M., 2021. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat. Commun.* 12, 2501.
- Zomer R.J., Bossio D.A., Trabucco A., Noordwijk M., Xu J., 2022. Global carbon sequestration potential of agroforestry and increased tree cover on agricultural land. *Circular Agricultural Systems*, 2:3. <https://doi.org/10.48130/CAS-2022-0003>
- Zougrana S.R., Ouedraogo S., Sib O., Bougouma-Yameogo V.M.C., Fayama T., Coulibaly K., *et al.*, 2023. Recycling crop and livestock co-products on agro-pastoral farms for the agroecological transition: more than 60% potentially recoverable in western Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Soci t  et Environnement*, 27(4) : 270-283. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.20537>

Chapitre 18

Quelles solutions pour la gestion de l'eau agricole face au changement climatique ?

*Caroline Lejars, Koladé Akakpo, Magalie Bourblanc,
Emeline Hassenforder, Pierre-Louis Mayaux*

La progression des besoins alimentaires, ajoutée à la demande d'autres utilisations concurrentielles, exerce une pression sans précédent sur de nombreux systèmes de production agricole partout dans le monde. Les systèmes de production actuels, définis comme des « systèmes au bord de la rupture » par la FAO (2021), font ainsi face à une concurrence accrue pour les ressources en terres et en eau, qui s'accroît avec le changement climatique (voir chapitre 7).

Dans ce contexte, l'adaptation au changement climatique, qu'il se traduise par des sécheresses ou d'autres événements extrêmes, s'avère extrêmement complexe. Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau sont mal connus à des échelles locales, le nombre d'études empiriques restant limité (Moore *et al.*, 2017). Le changement climatique affecte les ressources disponibles différemment : les eaux de surface, par exemple, sont affectées plus rapidement que les eaux souterraines qui servent souvent de « tampons » pour assurer les besoins des cultures irriguées lorsque la pluie vient à manquer. Les impacts de la baisse de disponibilité en eau varient également en fonction des usages locaux, des types et de la diversité des ressources disponibles ainsi que des périodes où la baisse de pluviométrie advient. Ils dépendent des besoins locaux qui sont variables : la demande en eau potable peut varier fortement et de manière saisonnière dans des villes touristiques, les besoins en hydroélectricité varient également en fonction des saisons, les besoins des plantes sont en général plus importants en été quand l'eau fait défaut. Plus généralement, l'eau se trouve à la jonction de plusieurs enjeux : l'énergie, l'alimentation, l'eau potable, les besoins industriels et la santé des écosystèmes. Lorsque l'eau vient à manquer, l'agriculture se retrouve en compétition avec d'autres secteurs et les difficultés sont variables en fonction du type d'agriculture et d'irrigation pratiquées.

Les mécanismes d'adaptation au changement climatique en agriculture sont donc très dépendants des contextes et des situations locales. Gérer les variations saisonnières, consommer moins d'eau ou de manière plus efficace, trouver de nouvelles ressources imposent de mettre en place des panels de solutions adaptées localement et pouvant reposer sur des solutions techniques, ainsi que des solutions de gestion et de gouvernance. Nous décrivons ici ces panels de solutions et les expériences prometteuses d'approches participatives qui permettraient de les mettre en cohérence.

1. Des solutions techniques et agroécologiques diversifiées, mais aux impacts mal évalués et parfois pervers

Ces dernières années, le constat de la raréfaction accrue de la ressource eau a incité les gouvernements à se tourner vers des solutions techniques et à réinvestir massivement dans de grandes infrastructures, particulièrement pour l'irrigation (voir chapitre 7). Les infrastructures mises en place pour faire face au manque d'eau recouvrent à la fois les ouvrages classiques de la « grande hydraulique » (grands barrages, transferts entre bassins, canaux d'adduction, réseaux de distribution), mais aussi des solutions présentées comme innovantes autour de la réutilisation des eaux usées ou du dessalement. Ces dernières, qui permettent localement d'accroître l'offre en eau, sont toutefois dans de nombreux cas (comme la réutilisation) de simples mécanismes de réallocation de l'eau et dans d'autres (comme le dessalement) des solutions très coûteuses en énergie et porteuses de certains effets dommageables sur les écosystèmes et sur la qualité des eaux de baignade (Williams *et al.*, 2023). Les investissements massifs dans l'irrigation, s'ils ont permis d'accroître la production alimentaire, se sont également faits aux dépens d'inégalités croissantes (Mayaux et Lejars, 2022). Au-delà des investissements dans de grandes infrastructures, des solutions techniques destinées à être développées au niveau des exploitations et de la parcelle ont également été promues et subventionnées dans un grand nombre de pays pour optimiser l'irrigation et répondre au mieux aux besoins des cultures. Le goutte-à-goutte, système d'irrigation localisé et économe en eau, en est un exemple emblématique. Développé et financé dans de nombreux pays, il permet théoriquement de réduire la quantité d'eau utilisée à l'échelle d'une parcelle. Il a toutefois conduit, en l'absence de contrôle sur les extensions de surfaces irriguées, à une augmentation globale de l'exploitation des ressources à l'échelle des territoires (Venot *et al.*, 2017).

En parallèle, la transition agroécologique est progressivement promue comme une solution pour ce qui est du modèle agricole. Le principe général est qu'une telle transition faciliterait la rétention et l'infiltration de l'eau sur les parcelles, et ralentirait son écoulement. Toutefois, la place de l'eau et de l'irrigation dans la transition agroécologique est encore peu étudiée. De nombreux auteurs mettent en avant l'intérêt de l'utilisation judicieuse de l'eau disponible pour l'agriculture grâce à des technologies de micro-irrigation et d'économie d'eau, grâce à la conservation et à l'agriculture intelligente face au climat (voir chapitre 3), grâce au développement de multiples cultivars et de biotypes de cultures tolérants au stress à l'aide d'outils biotechnologiques (voir chapitre 21), et grâce à la restauration des sols dégradés pour garantir une sécurité alimentaire et nutritionnelle durable (Jat *et al.*, 2016). L'agroforesterie, l'agriculture de conservation, la diversification des cultures, les services d'information climatique sont également mis en avant comme de nouvelles options agricoles intelligentes face au climat pour améliorer la productivité agricole, les moyens de subsistance ruraux et la capacité d'adaptation des agriculteurs et des systèmes de production (Zougmore *et al.*, 2018; Partey *et al.*, 2018). Même si ces pratiques permettent, en théorie, d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau (rapport entre la quantité d'eau apportée et celle réellement utilisée par la plante), il est difficile de quantifier les économies d'eau, que ce soit à l'échelle des parcelles ou à l'échelle de territoires. Par exemple, les économies d'eau réalisables en goutte-à-goutte ou à l'aide de pratiques comme la conservation des sols sont intrinsèquement liées aux stratégies d'irrigation des agriculteurs (doses apportées,

fréquence d'irrigation). Or ces pratiques ne sont pas toujours adaptées ou optimisées de manière effective sur les exploitations. De même, les interactions complexes entre les arbres et les cultures dans les systèmes agroforestiers par exemple rendent difficile l'évaluation précise de leur impact sur l'eau disponible.

Dans certaines régions, notamment en France et en Europe, l'accès à de nouvelles ressources en eau est de plus en plus conditionné au passage à des pratiques agro-écologiques telles que l'agriculture de conservation des sols, les cultures de couverture de légumineuses ou encore l'agriculture biologique, sans pour autant que l'on connaisse précisément l'impact de ces pratiques sur les usages de l'eau. Le développement de productions labellisées bio ou à faible teneur en intrants, actuellement promues par plusieurs pays, pourrait pourtant entraîner une augmentation des demandes d'irrigation, dans la mesure où la gestion des calendriers d'irrigation, en l'absence d'herbicides, peut devenir un moyen de gérer la croissance des mauvaises herbes. Il y a donc, en la matière, un besoin majeur de recherche pour fournir des solutions aux agriculteurs, tout en évaluant leur impact final sur l'eau à la parcelle ou à l'échelle des territoires (Torquebiau, 2018).

Quoi qu'il en soit, les liens étroits entre l'agroécologie et le changement climatique sont porteurs d'espoir et fournissent quelques exemples techniques réussis, au Nord comme au Sud. En Inde par exemple, l'agriculture naturelle communautaire de l'Andhra Pradesh (APCNF) — qui promeut un ensemble de pratiques agricoles conçues pour réduire considérablement les coûts directs des agriculteurs tout en augmentant les rendements et la santé des exploitations — est l'un des exemples majeurs de transition agroécologique à grande échelle dans le monde en nombre d'agriculteurs adhérents et d'institutions impliquées, et avec des impacts intéressants en matière d'économies d'eau à la parcelle (Bharucha *et al.*, 2020; Landy et Dorin, 2022). Malheureusement, l'agroécologie reste encore rarement mentionnée explicitement dans les contributions déterminées au niveau national (CDN) présentées par les pays lors de l'accord de Paris en 2015 (COP21) (voir chapitre 2) et certaines de ses composantes ne sont pas mentionnées explicitement, comme la gestion conservatoire de l'eau (Torquebiau *et al.*, 2019).

2. Des solutions de gouvernance autour du partage de l'eau qui s'avèrent de plus en plus inefficaces

2.1. Un bilan mitigé de la gestion intégrée des ressources en eau

Au cours des années 1990, la gestion intégrée des ressources en eau (Gire) est progressivement devenue une panacée dans le monde des ressources en eau (Mayaux et Lejars, 2022). Elle a accompagné la mise en place de tout un panel de programmes et d'outils institutionnels à travers le monde, comme la création d'agences de bassin, de plans de gestion locaux, de contrats d'aquifère. La participation en est un des concepts clés, avec l'objectif d'inclusion des parties prenantes concernées dans le processus décisionnel formel. La notion d'intégration y est multidimensionnelle. Outre l'intégration très générale entre la préservation de la ressource, l'efficacité économique et le bien-être social, celle-ci doit également être opérée (1) entre toutes les eaux, de surface et souterraines, et entre tous les milieux; (2) entre tous les acteurs et secteurs de l'action publique liés à l'eau, à savoir l'environnement, l'énergie, l'agriculture, l'aménagement, l'urbanisme, etc.; (3) d'un point de vue spatial, à l'échelle du bassin-versant.

En définitive, sa diffusion mondiale a cependant connu des résultats mitigés (Barone et Mayaux, 2019). Elle a indéniablement favorisé la production de connaissances, l'identification des problèmes et le renforcement de capacités institutionnelles. D'un autre côté, de nombreuses agences de bassin ont encore du mal à accéder aux ressources humaines, financières et logistiques nécessaires pour fonctionner correctement. En Afrique du Sud, et en Afrique plus généralement, de nombreux obstacles et limites en matière de capacités financières, de manque de compétences, de conflits institutionnels et de rigidité ont entravé la mise en place réussie d'agences de gestion de l'eau suivant les principes de décentralisation de la Gire. En France, les limites liées au mille-feuille institutionnel et aux capacités financières ont conduit la Cour des comptes à qualifier en 2022 la gouvernance de l'eau du pays d'« inefficace » (Cour des comptes, 2022).

Plus globalement, il existe dans le secteur de l'eau un décalage flagrant entre la complexité des enjeux et la faiblesse des moyens alloués à la gestion du secteur, notamment en ce qui concerne les effectifs de la police de l'eau (comme dans le cas de pays aussi différents que le Maroc, le Mexique, le Brésil ou la France). Outre le manque de ressources techniques et financières, les projets liés à la politique de l'eau relèguent souvent les questions environnementales au second plan, derrière les questions économiques et sociales. Les institutions de l'eau sont souvent marginalisées dans le système décisionnel. Enfin, l'efficacité des politiques de l'eau (sont-elles réellement mises en œuvre?) et leur efficience (atteignent-elles leurs objectifs?) sont rarement évaluées. De telles évaluations de l'impact des politiques pourraient renforcer la confiance entre les autorités et les citoyens.

2.2. Restrictions et outils réglementaires face aux sécheresses

Dans un contexte de changement climatique, les restrictions d'eau, particulièrement dans le monde agricole, sont de plus en plus utilisées comme des mesures réglementaires d'urgence pour éviter les ruptures d'approvisionnement en eau dans les territoires en tension, que ce soit au Nord ou au Sud. Si ces problématiques de gestion de la pénurie sont bien connues dans les Suds, elles se posent aujourd'hui avec une acuité nouvelle dans les pays du Nord, comme en témoigne par exemple l'épisode de sécheresse de l'été 2022 où près de 350 communes en France ont dû être ravitaillées en eau par camions-citernes. Il faut souligner, ici, toute l'importance de ne pas utiliser cet outil réglementaire de manière uniquement réactive, une fois que la crise est bien installée, mais de savoir anticiper la pénurie et mettre en place des restrictions d'usage suffisamment tôt. De fait, en France (comme dans d'autres pays), le déclenchement systématique des outils de crise dans de nombreux départements durant l'été, alors qu'ils ne devraient l'être en principe que deux années sur dix au maximum, témoigne des carences de la gestion ordinaire de l'eau (Barone et Mayaux, 2021). Le cas de l'Afrique du Sud illustre également bien comment des attermoissements dans la prise de décision concernant des mesures de restrictions peu populaires politiquement conduisent invariablement à des mesures plus drastiques *in fine* lorsque la crise est installée et à la promotion de nouveaux ouvrages hydrauliques pour y remédier (Bourblanc, 2022).

2.3. Prise en compte du changement climatique dans les instruments de gouvernance de l'eau

À partir du milieu des années 2000, de nombreux pays ou provinces ont commencé à adopter des stratégies d'adaptation au changement climatique (ACC) incluant

l'agriculture (par exemple la France, l'Espagne et le Sénégal en 2006, la Californie et la province du Cap-Occidental en Afrique du Sud en 2008). Quelques instruments innovants pour l'adaptation au changement climatique ont été mis en œuvre dans plusieurs pays. Beaucoup sont des instruments d'information, qui soutiennent la recherche et l'innovation, par le biais des systèmes d'information, favorisant la publication régulière de rapports à différents niveaux (national et infranational, par exemple par les pays de l'Union européenne) (voir chapitre 7). Les instruments réglementaires gagnent également de manière significative. Par exemple, une politique de quotas et de restrictions sur l'eau d'irrigation est mise en œuvre en France depuis plusieurs années (Loubier *et al.*, 2020). Ces politiques s'accompagnent parfois d'interventions publiques pour inciter de nouveaux modèles agricoles. Des incitations ont été conçues pour restructurer certaines zones de productions, comme les subventions à la restructuration des vignobles en Espagne et dans le sud de la France, mais le financement dédié reste jusqu'à présent limité. En Espagne par exemple, certains dispositifs, inclus dans les plans de développement rural et adoptés par les différentes provinces et largement financés par l'Union européenne, s'efforcent désormais de limiter la consommation d'eau dans une optique d'adaptation de long terme au changement climatique. En Andalousie, les communautés d'irrigants ne peuvent ainsi candidater à certaines aides que si elles démontrent que le projet qu'elles souhaitent financer diminuera d'au moins 5% la consommation d'eau totale par rapport à la situation actuelle. Cet engagement doit ensuite être régulièrement vérifié par l'administration agricole andalouse, pendant une durée d'au moins cinq ans. Si de nombreux contrôles ont été développés, aucun d'entre eux n'a cependant conduit à la moindre pénalité, en dépit de nombreux reportages d'engagements non atteints. Par ailleurs, les agriculteurs de la province se sont mobilisés avec succès contre un projet de mesure autrement plus ambitieux, celui d'une réduction permanente de leurs droits d'eau (Boutroue *et al.*, 2022).

Ainsi, l'innovation politique est jusqu'à présent restée limitée. Par exemple, de nombreux documents de planification (pour l'eau ou l'agriculture) ne considèrent pas encore les effets prévus du changement climatique. En outre, dans de nombreux cas, les instruments politiques traditionnels ont simplement été réétiquetés comme des instruments pour l'adaptation au changement climatique (Barone et Mayaux, 2019). C'est le cas de l'assurance-rendement des cultures contre les catastrophes naturelles, des subventions aux pratiques agroécologiques, de l'irrigation en goutte-à-goutte, ou encore des transferts interbassins en Espagne, au Brésil et en Afrique du Nord.

3. La nécessité de développer des approches territoriales concertées vers une transition agroécologique intégrant la question de l'eau

3.1. Développer des politiques intersectorielles et territorialisées plus cohérentes

Les défis de coordination entre des politiques sectorielles sont perçus comme plus complexes que jamais avec l'émergence du paradigme des liens WELF (*water, energy, land and food*). Les politiques en matière d'eau, d'alimentation, de foncier et d'énergie sont pour la plupart développées en silo, alors même que les interdépendances entre elles sont nombreuses et substantielles. Ces interdépendances s'avèrent (1) complexes

à comprendre, (2) très variables d'un territoire à l'autre et (3) souvent non reconnues dans l'élaboration des politiques. Certains cadres conceptuels récents mettent ces interdépendances au premier plan (par exemple, l'eau virtuelle¹, les services écosystémiques, etc.), mais ils sont encore peu opérationnels.

Plus d'une décennie après la Gire, la nécessité d'approches territoriales a donné naissance au nouveau paradigme rural (OCDE, 2006). L'OCDE a montré que les gouvernements sont de plus en plus conscients de la nécessité d'améliorer, voire parfois d'abandonner, les politiques sectorielles traditionnelles et de les remplacer par des instruments plus appropriés. Les gouvernements de l'OCDE ont manifesté un intérêt croissant pour les approches territoriales de politique rurale, permettant d'intégrer différentes politiques sectorielles et d'améliorer la cohérence et l'efficacité des dépenses publiques dans les zones rurales. Dans certains pays, l'implication du gouvernement central évolue ainsi d'une intervention directe vers une politique territorialisée. Par exemple, en France ou en Tunisie, de telles politiques ont créé des espaces permettant d'impliquer les communautés locales dans les décisions et l'élaboration des politiques (comme les commissions locales de l'eau, les comités de territoire, etc.). Les autorités locales de planification deviennent plus autonomes et peuvent promouvoir une approche territorialisée et participative. Ces expériences ont eu des résultats positifs, comme le montrent plusieurs expériences menées depuis une dizaine d'années (Hassenforder et Ferrand, 2024). D'importantes questions restent toutefois sans réponse concernant le niveau approprié d'intervention publique, sa légitimité et la capacité des autorités locales de planification à capter les ressources nécessaires et à mettre en œuvre des processus de planification adéquats.

3.2. Améliorer la participation et la concertation territoriale autour de l'eau

Les approches participatives de planification et d'utilisation intégrées des ressources naturelles ont été largement encouragées au cours des dernières décennies, que ce soit dans le cadre de la Gire, mais aussi des objectifs de développement durable (ODD) (la participation du public est la cible 16.7 entre autres). La participation du public est préconisée par les bailleurs internationaux, les gouvernements et les différentes parties prenantes elles-mêmes. Cela conditionne de plus en plus le financement des projets de développement par les donateurs. La dernière décennie a également été témoin de l'essor des technologies civiques et de la science citoyenne. Au Kenya, par exemple, les citoyens peuvent déposer des plaintes ou formuler des commentaires sur les services d'eau par le biais d'un site Web, MajiVoice. Les initiatives de science citoyenne sont des programmes de recherche engageant des individus — dont beaucoup ne sont pas des scientifiques qualifiés — dans la collecte, la catégorisation, la transcription ou l'analyse de données scientifiques. Ces tendances présentent à la fois des opportunités et des risques. D'un côté, elles permettent des approches plus participatives, avec des participants plus nombreux et diversifiés, ainsi qu'une plus grande transparence des politiques publiques et une plus grande responsabilisation des décideurs. Mais ces tendances présentent également des risques d'exclusion, de marginalisation et de corruption si la participation n'est pas mise en œuvre de manière efficiente.

1. Cette terminologie correspond à l'eau utilisée pour produire des biens exportables dans un endroit et consommée « virtuellement » dans un autre espace.

Même si les approches participatives ont tenu leurs promesses dans de nombreux cas, des obstacles subsistent, qui peuvent limiter leur mise en œuvre et leur impact.

– Les résultats issus des démarches participatives ne sont pas toujours pris en compte dans les décisions politiques : de nombreux décideurs accordent encore peu d'importance aux connaissances des agriculteurs et ne comprennent pas la valeur ajoutée de la participation du public.

– Les gouvernements ont rarement les moyens d'impliquer les personnes les plus marginales et défavorisées, et ce, particulièrement dans les zones rurales, car cela nécessite d'aller les voir individuellement et de mettre en place des méthodes participatives adaptées. Les gouvernements s'appuient donc souvent sur des associations ou des représentants des différentes catégories d'acteurs (mais dont les intérêts ne sont pas toujours alignés sur ceux des plus pauvres). Il y a aussi souvent un manque de volonté politique pour mettre en œuvre des approches participatives.

– L'évaluation des approches participatives est fondamentalement déficiente dans la plupart des pays. Si elle inclut parfois une évaluation procédurale (nombre de participants, représentativité, etc.), elle inclut rarement l'évaluation des impacts sociaux (apprentissage, changement de pratiques, etc.) ou de la performance environnementale. Par ailleurs, les évaluations cinq ou dix ans après la fin des processus sont anecdotiques, et nous manquons donc de recul sur l'impact de ces démarches.

– La participation à grande échelle, notamment en contexte rural, soulève des questions de stockage, d'agrégation et de partage des données (Bright et Margetts, 2016; Karim *et al.*, 2020; Tang et Liao, 2019)

– Il existe souvent un écart entre le processus participatif et les délais d'investissement. Un diagnostic participatif doit pouvoir se dérouler à son propre rythme, alors qu'il existe souvent des pressions pour dépenser rapidement un budget annuel ou un budget de projet.

– Il reste difficile d'intégrer la pluralité, les conflits et l'hybridité dans les approches de planification participative (Brown *et al.*, 2017; Murray *et al.*, 2004).

Pour surmonter ces obstacles, un ensemble de recommandations est proposé dans la littérature et permettrait de mettre en place des combinaisons de solutions, techniques et institutionnelles, cohérentes entre elles. Parmi ces pistes de recommandations, en voici quelques-unes.

– Mettre en place des approches participatives multiniveaux, c'est-à-dire des approches qui ne consistent pas uniquement à transférer des responsabilités au niveau local, mais qui renforcent et soutiennent également la participation du public aux prises de décision régionales et nationales, et qui créent des liens entre les différents niveaux (Daniell et Barreteau, 2014; Newig *et al.*, 2016). Certaines méthodes participatives — comme les jeux de rôle ou la planification stratégique — permettent de renforcer les interactions entre plusieurs niveaux de gouvernance (Hassenforder *et al.*, 2020), notamment en impliquant précocement les parties prenantes dans le processus. En Tunisie, le Programme d'adaptation au changement climatique pour les territoires vulnérables (2018-2022) a permis de renforcer la planification participative à plusieurs niveaux, grâce à la création de plateformes multipartites et au renforcement des capacités des facilitateurs territoriaux (Hassenforder *et al.*, 2024).

– Développer une culture de la participation, dans les gouvernements et les administrations, auprès des élus, des gestionnaires territoriaux et des techniciens. L'objectif est que les différents acteurs voient dans la participation une opportunité

de construire des politiques publiques plus transparentes, fondées sur des opinions plus diverses et plus proches des citoyens, des agriculteurs et des usagers. La participation doit s'adapter au contexte culturel, mais le contexte doit également s'adapter aux exigences de participation.

- Mettre en œuvre des chartes de participation qui contribuent à la transparence et à la responsabilisation des politiques publiques. De plus en plus, les processus participatifs sont conçus conjointement avec les participants eux-mêmes. Cela signifie que les participants décident qui participera, quand, avec quelles méthodes et avec quels rôles (Daniell *et al.*, 2010; Hassenforder *et al.*, 2020).

- Adopter des approches plus systémiques de la participation, tenant compte de la complexité du système socio-environnemental au sein duquel la participation se déroule (Chilvers *et al.*, 2018; Jager *et al.*, 2020), en particulier les incohérences temporelles, puisque des temporalités très distinctes (celle des dispositifs participatifs eux-mêmes, celle des décideurs politiques, des agriculteurs, des chercheurs et des bailleurs de fonds) sont souvent mal articulées.

- Mettre en place des systèmes significatifs de suivi, d'évaluation et d'aide à la décision, qui incluent des données qualitatives et quantitatives, qui évaluent les multiples impacts de la participation (apprentissage, changements institutionnels et relationnels, justice et équité, changement de comportement, etc.) et qui sont utilisés pour appuyer le pilotage des processus et la prise de décisions. Diverses approches ont été développées pour de tels systèmes (Blundo Canto *et al.*, 2018; Hassenforder *et al.*, 2024). Ces approches favorisent l'implication des différentes parties prenantes dans la conception du processus d'évaluation, dans la collecte et l'analyse des données et dans le partage des résultats.

L'objectif serait de passer d'une vision de l'évaluation comme outil de contrôle à une évaluation contribuant à l'impact de la démarche participative.

4. Conclusion

Pour faire face aux pressions et aux baisses de disponibilité de l'eau qui affectent nos systèmes agri-alimentaires, de nombreuses solutions techniques ou de gouvernance existent et ont été partiellement mises en place dans plusieurs pays, au Nord comme au Sud. Mais si ces solutions ne sont pas mises en cohérence entre elles, elles aboutissent souvent à des effets pervers ou à une forme d'inefficacité. Les gouvernements et le secteur privé, y compris les agriculteurs, pourraient embrasser une approche plus proactive et plus participative pour faire avancer l'adoption généralisée de pratiques durables et cohérentes de gestion des terres et des eaux. Ces solutions doivent être adaptées et discutées à l'échelle des territoires, et leurs impacts doivent être évalués. La mise en place de politiques foncières et hydriques durables, équitables et réduisant la pauvreté est possible, mais c'est un effort de longue haleine qui nécessite de fortes capacités de l'État et un engagement citoyen, en particulier à l'échelle des territoires. L'adaptation au changement climatique ne saurait, comme toute action publique, être parfaitement consensuelle : elle impliquera nécessairement des « perdants » relatifs, au moins sur le court terme, donc des tensions et des conflits. Ces tensions ne sont pas à déplorer : elles peuvent être fécondes et productives, à condition qu'elles puissent s'exprimer dans des espaces de débat et de décision inclusifs, relativement transparents et pouvant rendre des comptes.

5. Références bibliographiques

- Barone S., Mayaux P.-L., 2019. *Les politiques de l'eau*. LGDJ – Clefs/politique, 153 p.
- Bharucha Z.P., Mitjans S.B., Pretty J., 2020. Towards redesign at scale through zero budget natural farming in Andhra Pradesh, India, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 18:1, 1-20. <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1694465>
- Blundo Canto G., Barret D., Faure G., Hainzelain E., Monier C., Triomphe B., Vall E., 2018. ImpresS ex ante. An approach for building ex ante impact pathways. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/agritrop/00013>
- Bourblanc M., 2022. 'Water vs Wine': Irrigating at the urban-rural interface in the Western Cape Province (South Africa), Work Package 3 report on "Water Allocation and Restriction" policy instrument, TYPOCLIM research project (MUSE funding), 30 p.
- Boutroue B., Bourblanc M., Mayaux P.-L., Ghiotti S., Hrabanski M., 2022. The Politics of Defining Maladaptation: Enduring Contestations Over Three (Mal)adaptive Water Projects in France, Spain and South Africa, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20:5, 892-910. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.2015085>
- Bright J., Margetts H., 2016. Big Data and Public Policy: Can It Succeed Where E-Participation Has Failed? *Policy and Internet*, 8(3), 218-224.
- Brown G., Kangas K., Juutinen A., Tolvanen A., 2017. Identifying Environmental and Natural Resource Management Conflict Potential Using Participatory Mapping. *Society & Natural Resources*, 30(12), 1458–1475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/08941920.2017.1347977>
- Chilvers J., Pallett H., Hargreaves T., 2018. Ecologies of participation in socio-technical change: The case of energy system transitions. *Energy Research and Social Science*, 42, 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.020>
- Cour des comptes, 2022. La gestion quantitative de l'eau en période de changement climatique, Exercices 2016-2022, rapport de synthèse. <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/20230717-gestion-quantitative-de-l-eau.pdf>
- Daniell K.A., Barreteau O., 2014. Water governance across competing scales: Coupling land and water management. *Journal of Hydrology*, 519(C), 2367-2380. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.055>
- Daniell K.A., White I.M., Ferrand N., Ribarova L., Coad P., Rougier J.E., Burn S., 2010. Co-engineering participatory water management processes: Theory and insights from Australian and Bulgarian interventions. *Ecology and Society*, 15(4).
- FAO, 2021. L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde : Des systèmes au bord de la rupture, Rapport de synthèse. <https://www.fao.org/land-water/solaw2021/fr/>
- Hassenforder E., Ferrand N. (coord.), 2024. Transformative Participation for Socio-Ecological Sustainability. Around the CoOPLAGE pathways. Versailles, éditions Quæ, 270 p.
- Hassenforder E., Barreteau O., Daniell K.A., Ferrand N., Kabaseke C., Muhumusa M., Tibasiima T., 2020. The effects of public participation on multi-level water governance, lessons from Uganda. *Environmental Management*, 66, 770-784. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01348-8>
- Jager N.W., Newig J., Challies E., Kochskämper E., 2020. Pathways to Implementation: Evidence on How Participation in Environmental Governance Impacts on Environmental Outcomes. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 30(3), 383-399. <https://doi.org/10.1093/jopart/muz034>
- Jat M.L., Dagar J.C., Sapkota T.B., Yadvinder-Singh B., Govaerts S.L., Ridaura Y.S., *et al.*, 2016. Chapter Three - Climate Change and Agriculture: Adaptation Strategies and Mitigation Opportunities for Food Security in South Asia and Latin America. In: Sparks D.L., *Advances in Agronomy*, Academic Press, Volume 137, 127-235.
- Karim A., Siddiq A., Safdar Z., Razzaq M., Gillani S.A., Tahir H., *et al.*, 2020. Big data management in participatory sensing: Issues, trends and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 107, 942-955. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2017.10.007>
- Landy F., Dorin B., 2022. L'État au secours de la transition agroécologique? Le cas de l'Inde. *Mouvements*, 109: 94-106. <https://doi.org/10.3917/mouv.109.0094>

- Mayaux P.L., Lejars C., Farolfi S., Adamczewski-Hertzog A., Hassenforder E., Faysse N., Jamin J.Y., 2022. Enabling institutional environments conducive to livelihood improvement and adapted investments in sustainable land and water uses. Rome, FAO, 58 p. <https://doi.org/10.4060/cc0950en>
- Moore F.C., Baldos U.L.C., Hertel T., 2017. Economic impacts of climate change on agriculture: a comparison of processbased and statistical yield models, *Environmental Research Letters*, 12, 6, 065008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6eb2>
- Murray M., Shaffer R., Lovan W.R., 2004. Participatory Governance - Planning Conflict Mediation and Public Decision-Making in Civil Society. In: M. Murray, R. Shaffer, W.R. Lovan, Eds. Belfast: Ashgate Publishing.
- Newig J., Challies E., Jager N.W., Kochskaemper E., Adzersen A., 2017. The Environmental Performance of Participatory and Collaborative Governance: A Framework of Causal Mechanisms. *Policy Studies Journal*, 46(2), 269–297. <https://doi.org/10.1111/psj.12209>
- OECD, 2006. The New Rural Paradigm: Policies and Governance. OECD Rural Policy Reviews, Paris, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264023918-en>
- Partey S.T., Zougmore R.B., Ouédraogo M., Campbell B.M., 2018. Developing climate-smart agriculture to face climate variability in West Africa: Challenges and lessons learnt, *Journal of Cleaner Production*, 187, 285-295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.199>
- Tang M., Liao H., 2019. From conventional group decision making to large-scale group decision making: What are the challenges and how to meet them in big data era? A state-of-the-art survey. *Omega*, 100, 102141. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102141>
- Torquebiau E., Rosenzweig C., Chatrchyan A., Andrieu N., Khosla R., 2018. Les agricultures face au changement climatique. *Cah. Agric.* 27, 26001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018010>
- Torquebiau E., Roudier P., Demenois J., Saj S., Hainzelin É., Maraun F., 2019. Agroecology and climate change: close links which give cause for hope. In : Côte F.-X., Poirier-Magona E. Perret S., Roudier P., Rapidel B., Thirion M.-C. (eds.). *The agroecological transition of agricultural systems in the Global South*. Versailles, éditions Quæ, 239-249.
- Venot J.-P., Kuper M., Zwarteveen M., 2017. Drip irrigation for agriculture: untold stories of efficiency, innovation and development. Routledge, 358 p. <https://doi.org/10.4324/9781315537146>
- Williams J., Beveridge R., Mayaux P.L., 2023. Unconventional waters: A critical understanding of desalination and wastewater reuse, *Water Alternatives*, 17. <https://www.water-alternatives.org/index.php/tp1-2/1914-vol16/369-issue16-2>
- Zougmore R.B., Partey S.T., Ouédraogo M., Torquebiau E., Campbell B.M., 2018. Facing climate variability in sub-Saharan Africa: analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks. *Cah. Agric.* 27(3), 34001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018019>

Chapitre 19

La production d'énergie par l'agriculture pour faire face au changement climatique

*François Pinta, Antoine Ducastel, Patrice Dumas,
Marie Hrabanski, Grâce Chidikofan*

L'énergie est une composante majeure des moyens de production agricole. Historiquement, la révolution verte entamée à partir des années 1950 est le résultat d'une utilisation généralisée dans l'agriculture de carburants fossiles et d'électricité *via* l'usage massif de la mécanisation, des engrais, et des produits phytosanitaires; il s'agissait de répondre à la sécurité alimentaire mondiale. Ainsi les niveaux de production de l'agriculture et la satisfaction des besoins en alimentation des hommes dépendent étroitement de l'énergie. Lorsque l'énergie utilisée est d'origine fossile, elle génère de grandes quantités de gaz à effet de serre en lien avec des consommations d'énergie directes et indirectes. Les systèmes agri-alimentaires consomment actuellement environ 30% de l'énergie consommée dans le monde¹ et 70% de l'énergie consommée par les systèmes agri-alimentaires est utilisée dans les étapes de post-récolte : le transport, la transformation, l'emballage, l'expédition, le stockage, la commercialisation, etc.

L'agriculture est aussi une source d'énergie renouvelable qui peut produire beaucoup d'énergie. Ce chapitre analyse les enjeux liés à l'accroissement de la production d'énergie verte par l'agriculture. Une première partie analyse les enjeux de production d'énergie à partir de la biomasse (sous forme de combustibles solides, de biogaz et de biocarburants). La deuxième partie porte sur les enjeux liés aux unités de production d'électricité intégrées aux installations agricoles, notamment l'agrivoltaïsme.

1. Production d'énergie à partir de biomasses agricoles

L'agriculture assure désormais un rôle de producteur d'énergie qui se caractérise par différentes catégories de biomasses utilisables et d'énergie utiles, en interne dans l'agriculture ou en externe pour satisfaire d'autres besoins. Les trois formes d'énergie qui peuvent être produites à partir de biomasses d'origines agricoles sont des biomasses combustibles (produit à partir des déchets lignocellulosiques), du gaz biosourcé par la méthanisation, et des biocarburants.

Le tableau suivant (tableau 19.1) présente les principales formes d'énergie produites à partir de biomasses agricoles dans les exploitations ou en sites industriels des filières énergétiques concernées.

1. FAO, 2015 : <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1b142e0d-de8b-4043-9900-6d8b7c088726/content>.

Tableau 19.1. Principales formes d'énergie produites à partir de biomasses agricoles.

Ressource biomasse	Forme de l'énergie produite			
	Chaleur	Électricité	Biogaz	Biocarburant
Résidus secs de transformation de produits agricoles	+++	+		
Résidus lignocellulosiques de cultures (pailles, etc.)	+++	+		
Cultures énergétiques oléagineuses ou à glucides (palmier, maïs, colza, etc.)				+++
Résidus de bois (taille d'arbres, haies, entretien des bordures, etc.)	+++	+		
Biomasses humides : résidus d'élevages + Cive (culture intermédiaire à vocation énergétique)	+	+	++++	

1.1. Production de combustible ou d'énergie à partir des déchets lignocellulosiques

Cette partie traite des biomasses agricoles, y compris les bois de taille d'arbres des systèmes agroforestiers et en arboriculture (vergers de production fruitière), ainsi que l'utilisation du bois des petites parcelles boisées faisant partie des exploitations agricoles (encadré 19.1). Toutes ces biomasses constituent des sources importantes de biomasses ligneuses, appelées aussi « biomasse sèche ». Nous ne traitons pas ici des filières forestières (basées sur l'exploitation des forêts).

Encadré 19.1. Disponibilité des résidus agricoles pour produire de l'énergie : exemples en Afrique de l'Ouest (d'après BOAD, 2023)

Au Bénin, en Côte d'Ivoire et au Sénégal ont été recensés d'importants gisements de déchets agricoles et agro-alimentaires qui ont été évalués en 2023 à 5 Mt/an et par pays.

En effet, les grandes unités de transformation agro-alimentaires produisent des coques de coton, des balles de riz, de la bagasse de canne à sucre, des coques d'anacarde, etc., dont une faible proportion seulement est actuellement utilisée. À titre d'exemple, les usines de transformation des noix d'anacarde utilisent environ 15% de leurs coques pour alimenter leurs chaudières et 85% constituent un gisement lignocellulosique disponible pour d'autres usages comme celui de production énergétique.

Les biomasses lignocellulosiques du secteur agricole sont généralement trop dispersées sur le territoire, et d'un niveau de qualité technologique insuffisant pour être utilisées comme matériaux de construction. Il en est de même pour les pailles, les glumes (enveloppes entourant les grains de céréales, dont on peut citer les balles de riz par exemple), et les déchets de coques (noix, noisettes, coques d'anacardes, etc.). Ces ressources sont généralement valorisables comme combustibles pour la production de chaleur par combustion maîtrisée dans une chaudière adaptée : l'énergie thermique est généralement produite par combustion directe dans un foyer adapté au type de biomasse. S'il faut transporter la biomasse, celle-ci peut être avantageusement convertie en granulés de biomasses ou en briquettes compressées afin de faciliter la

logistique et de maîtriser les coûts de stockage et de transport. Pour ce qui est des applications, quand les conditions territoriales le permettent, grâce à des quantités disponibles abondantes et des infrastructures adaptées pour gérer la logistique, ces combustibles sont utilisables dans des centrales de production d'électricité (avec cogénération de chaleur, lorsque des besoins locaux existent) qui peuvent approvisionner le réseau local ou national, apportant ainsi de l'électricité à la population et aux acteurs économiques raccordés. Enfin, dans le cas de besoins en énergie thermique, par exemple pour le séchage des produits agricoles, ou pour le chauffage des serres agricoles, il est possible de remplacer le gaz d'origine fossile (propane, butane, gaz naturel) par du syngaz (gaz de synthèse) produit par gazéification de biomasses sèches à haute température (900-1 000°C), en réacteur de gazéification.

Les principaux enjeux portent sur la mobilisation des gisements de déchets de biomasses encore disponibles et la levée des verrous économiques, techniques ou organisationnels qui sont de diverses origines : forte dispersion des ressources de biomasses, coûts de mobilisation élevés, besoins en stockage lié au décalage temporel avec la périodicité du besoin en énergie pouvant être satisfait sur place ou sur le même territoire, besoins et coûts de logistique très élevés, etc. Au sujet du bilan d'émissions de GES, la combustion ou la gazéification des déchets lignocellulosiques permet de réduire à la fois les émissions de CO₂ et de CH₄ liées à la décomposition naturelle des biomasses qui sont abandonnées sans valorisation, même si les processus de décomposition de la lignocellulose peuvent prendre plusieurs années (durée très variable selon les conditions du milieu). Les besoins en infrastructures et en logistique peuvent être conséquents et il faut notamment veiller à limiter les distances de transport des biomasses ; cela respecté, le bilan des activités de valorisation de ces déchets établi par la méthode ACV (analyse du cycle de vie) est clairement positif grâce aux émissions évitées (pas de décomposition naturelle) d'une part, et à la substitution des émissions de carbone fossile pour satisfaire les besoins énergétiques, d'autre part.

1.2. Production de biogaz par digestion biologique de biomasses humides en réacteur de méthanisation

Le biogaz est constitué de méthane (CH₄) et de CO₂ produit par digestion biologique en milieu anaérobie. Le biogaz peut être utilisé tel quel, ou bien sous forme de biométhane (après séparation du CO₂), ce dernier pouvant être injecté dans les réseaux de gaz naturel. Tout comme le syngaz, le biogaz permet de produire de la chaleur et/ou de l'électricité selon la configuration des installations et les besoins. Le digestat (résidu) de méthanisation coproduit est généralement valorisé comme amendement organique afin d'assurer un retour au sol de matières organiques et de matières minérales fertilisantes.

La matière première peut être constituée de déchets ou de productions agricoles destinées à la production de biogaz. Il peut s'agir de cultures intermédiaires à vocations énergétiques (Cive) ou de cultures. Les déchets sont très divers : déjections animales, fumiers, déchets d'abattoirs, déchets de triage de céréales, déchets verts des déchetteries, etc. Chaque lot de biomasses est caractérisé par un pouvoir méthanogène spécifique qui dépend de ses caractéristiques propres et du procédé mis en œuvre. Le biogaz peut être utilisé sur place comme c'est le cas dans les systèmes de type agriculture familiale, surtout en Inde et en Chine, et dans une moindre mesure dans des

pays d'Afrique. Le biogaz est alors utilisé comme combustible domestique (pour la cuisson des aliments), en remplacement du bois de feu ou du gaz d'origine fossile. Dans plusieurs pays de l'Union européenne (UE), dont la France, le méthane est isolé du CO₂ puis injecté dans le réseau de gaz naturel. Cela facilite son transport vers des sites éloignés des unités de production ainsi que son stockage. L'UE est très positive sur la méthanisation et a défini une « feuille de route biogaz » pour aider les États à mettre en place une stratégie pour développer la filière. En Amérique latine, le Brésil est le pays où le secteur de la méthanisation s'intensifie le plus ces dernières années. Plusieurs pays d'Afrique connaissent un certain développement sous l'impulsion de divers programmes et initiatives, comme Biogas Africa lancé en 2005. L'Afrique du Sud, le Kenya et le Nigeria sont considérés comme les plus avancés dans le secteur.

Pour ce qui est du bilan d'émissions de GES, la méthanisation des déchets agricoles permet de réduire à la fois les émissions de CO₂, de méthane et de protoxyde d'azote liées à la dégradation naturelle des biomasses résiduaire humides. De ce fait et malgré les besoins en infrastructures et en logistique, le bilan des activités de méthanisation est en général très positif grâce à toutes les émissions évitées (Couturier *et al.*, 2019). Toutefois, les conflits d'usages et les polémiques existent pour la méthanisation : certains experts pointent que la durabilité des systèmes agricoles intégrant des Cive doit être davantage étudiée. Enfin, certains experts dénoncent un conflit d'usage des sols qui sont continuellement cultivés à cause du biogaz. Ainsi, il peut être utile de mettre en œuvre une étude territorialisée pour s'assurer de la pertinence des projets envisagés sur un terroir donné.

Encadré 19.2. De la nécessité de prendre en compte les GES de la végétation naturelle préexistante sur les sols cultivés pour établir les bilans de réduction d'émissions des GES (d'après Searchinger *et al.*, 2018)

En général, la végétation naturelle reprend la place des terres non utilisées sans qu'il n'y ait besoin d'intervention humaine. De plus, à demande alimentaire constante, une production alimentaire qui cesse d'être faite sur une terre devra être faite autre part, remplaçant la végétation naturelle. Toute utilisation de terre pour la bioénergie nécessite donc le remplacement de végétation naturelle quelque part dans le monde (ou, de façon équivalente, une moindre augmentation de végétation naturelle), que la bioénergie remplace de la végétation naturelle ou une culture alimentaire, et ce quelle que soit la date à laquelle la terre en question a été mise en culture pour la première fois.

Cela s'applique également à l'usage de produits associés à une culture, tels que l'huile végétale. Il est donc nécessaire de toujours prendre en compte dans le bilan des émissions de GES de la bioénergie tout le carbone potentiellement présent dans la végétation naturelle si la bioénergie remplace de la végétation naturelle. Il en est de même pour tout le carbone potentiellement présent dans la végétation naturelle présente à l'origine (avant utilisation pour l'agriculture), si les terres utilisées pour la bioénergie remplacent des productions alimentaires.

Il est à noter que la prise en compte de cette capacité à capter du carbone selon l'usage des terres nécessite (1) de mettre en équivalence des changements de stock de carbone, cela avec des dynamiques particulières, et (2) de dresser un bilan des émissions annuelles, incluant les émissions des productions agricoles concernées et la réduction de GES grâce à la substitution des combustibles fossiles par la biomasse énergie.

1.3. Production d'énergie sous forme de biocarburants

Il existe aujourd'hui différents modes de production de biocarburants, classés par génération, de la première à la troisième génération. Les biocarburants actuels sont majoritairement produits à partir de la transformation de produits agricoles (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, etc.) : on les appelle des biocarburants de première génération.

Le principal atout des biocarburants de première génération est leur niveau de maturité technologique : la production et les coûts de production sont très bien maîtrisés à grande échelle dans différentes régions du monde, comme dans l'UE, le Brésil et les États-Unis. Le bioéthanol est actuellement produit pour les deux tiers à partir de maïs et pour plus d'un quart avec de la canne à sucre. Il est utilisé en mélange avec de l'essence dans les moteurs à combustion interne des véhicules automobiles. À l'échelle mondiale, la production est proche de 100 millions de mètres cubes par an d'éthanol en 2022, ce qui représente de l'ordre de 5 % à 10 % du volume d'essence utilisé à travers le monde. Les États-Unis sont le premier producteur, suivi par le Brésil : à eux seuls, ils représentent 82 % du marché mondial. C'est néanmoins en Asie-Pacifique que le taux de croissance de production d'éthanol carburant a été le plus important avec plus de 10 % par an en 2022. L'Inde, la Chine et la Thaïlande sont de grands producteurs dans cette région du monde. Concernant le biodiesel, celui-ci est dérivé de différentes sources d'acides gras, notamment d'huiles de soja, de colza, de palme et d'autres huiles végétales. Les trois quarts de la production de biodiesels sont issus de la transformation d'huiles végétales, en particulier d'huile de colza.

Toutefois, l'origine agricole des biocarburants de première génération soulève des débats et des polémiques, l'utilisation d'une culture alimentaire constituant une concurrence à l'approvisionnement alimentaire. Ce mode de production peut entrer directement en concurrence avec la production alimentaire, car ils sont produits à partir des graines de céréales ou d'oléagineux, ou à partir du saccharose de betteraves ou de cannes à sucre. Leur production massive peut donc accroître les prix des denrées agricoles d'une part, et également gonfler l'usage de produits phytosanitaires de synthèse pour garantir la productivité des cultures, d'autre part. Pour ces raisons, l'UE a limité la part des biocarburants à un taux d'incorporation moyen de 7 % au maximum. Selon la Banque mondiale, entre 2002 et 2008, la demande en biocarburants a été responsable d'une hausse du prix des aliments de l'ordre de 75 %, et tenue responsable de la crise alimentaire pour les populations pauvres, en particulier dans des pays des régions chaudes.

Les biocarburants de deuxième génération sont produits à partir des parties non alimentaires des plantes. Ils sont issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), dans des plantes provenant de cultures réservées à cette utilisation (taillis à croissance rapide), ou de la valorisation des déchets industriels. Ces biocarburants évitent donc la concurrence d'usages avec les filières alimentaires. De plus, ces biocarburants s'appuient sur des ressources plus diversifiées, avec un coût de la biomasse plus faible et un meilleur bilan environnemental de production. Mais les solutions industrielles pour produire les biocarburants de deuxième génération sont encore au stade du déploiement des premières technologies, avec des coûts de production encore très élevés. La perspective de leur montée en puissance est cependant soutenue par l'UE, dont la réglementation

prévoit un objectif d'énergie renouvelable de 14% dans les carburants pour le transport en 2030, dont 50% de deuxième génération (directive 2018/2001 appelée EnR2, publiée le 21 décembre 2018).

Les biocarburants de troisième génération désignent les productions à partir de cultures d'algues en bassins hors-sol. Mais le niveau de maturité technologique est encore au stade de la recherche. En 2020, les biocarburants sont encore largement de première génération.

Enfin, il est important de signaler que certains experts dénoncent un conflit d'usage des sols cultivés pour la filière biogaz comme pour les filières biocarburants qui utilisent des cultures spécifiques. En effet, la prise en compte du remplacement de la végétation préexistante (sur les terres mobilisées pour produire de la biomasse-énergie) dans les bilans des émissions de gaz à effet de serre pointe un bilan négatif à court et moyen terme. Le bilan ne devient généralement positif qu'à long terme (Searchinger *et al.*, 2018).

2. Production d'énergie et conflits d'usage de l'agrivoltaïsme en zone agricole

La deuxième partie de ce chapitre traite de l'utilisation d'espaces agricoles sur lesquels ont été intégrés des panneaux photovoltaïques. Aujourd'hui, la décarbonation de l'énergie, dans le secteur agricole, se traduit dans les chiffres puisque, si en 2019 seuls 3% de la demande mondiale d'électricité étaient assurés par des panneaux photovoltaïques, en 2023 ce chiffre s'élève à 6,2%. Du reste, il devrait continuer d'augmenter fortement, soulignant ainsi l'explosion des installations de photovoltaïsme dans le monde, et tout particulièrement en Chine. Une part difficilement quantifiable de ces panneaux est installée sur des terres agricoles, mais le développement de ces énergies renouvelables (ENR) depuis la décennie 2010 a mis en lumière la question de la compétition des usages des terres, propices à la fois aux productions agricoles et à la production d'électricité par photovoltaïsme. Afin de réconcilier les deux objectifs de production agricole et d'énergie par ces filières, le terme d'agrivoltaïsme (*agrivoltaics* en anglais) s'est peu à peu imposé, à partir notamment d'une première publication scientifique en 2011 (Dupraz *et al.*, 2011).

L'un des objectifs affichés des systèmes agrivoltaïques étant de préserver les terres agricoles, il est généralement considéré que la production agricole de ces systèmes doit rester un objectif majeur même si l'énergie est plus rentable. Des panneaux solaires éventuellement inclinables, à des hauteurs variables, peuvent ainsi être installés sur des exploitations agricoles diverses : en horticulture, maraîchage, viticulture, prairie et également en grandes cultures. Les contraintes sur la production agricole varient d'un pays à l'autre selon le climat, les législations en vigueur, le type de culture et les objectifs du dispositif agrivoltaïque (optimisation du volume de production agricole, de la qualité des produits agricoles, de la production d'électricité, etc.). Par extension, des installations comme des serres agricoles équipées de panneaux solaires peuvent aussi être considérées comme des systèmes agrivoltaïques, notamment si elles permettent de renforcer la production agricole par une meilleure maîtrise des conditions climatiques et de la gestion de l'eau pour les cultures. L'agrivoltaïsme est dès lors présenté à la fois comme une technique permettant de répondre aux risques d'artificialisation des

sols causés par le photovoltaïsme et aussi comme une solution d'adaptation au changement climatique : les panneaux seraient des moyens de protection en cas de forte chaleur et/ou d'épisodes de grêle par exemple (Dinesh et Pearce, 2016). Pour ce qui est des rendements et des capacités énergétiques, les promoteurs de l'agrivoltaïsme soulignent qu'avec un hectare agrivoltaïque une voiture électrique peut parcourir une distance environ cent fois supérieure à ce que permet une culture de biocarburant sur un hectare (blé ou colza transformé en biocarburant) pour un véhicule à moteur thermique (Dupraz *et al.*, 2011). Des avantages sont également identifiés en matière de revenu (Al Mamun *et al.*, 2022), puisque souvent les propriétaires ou les exploitants de ces parcelles agricoles peuvent recevoir un loyer annuel, au risque d'ailleurs que ces derniers ne soient plus incités à poursuivre une activité agricole.

Le développement de l'agrivoltaïsme fait dès lors aussi émerger de nombreuses controverses ou renforce celles qui existaient déjà sur le photovoltaïque (Hrabanski *et al.*, 2024). Ce nouveau marché international de l'agrivoltaïsme est particulièrement développé en Asie, et sa croissance est également importante en Europe et en Amérique du Nord et du Sud. Le continent africain est pour l'instant encore peu concerné par cet engouement (figure 19.1).

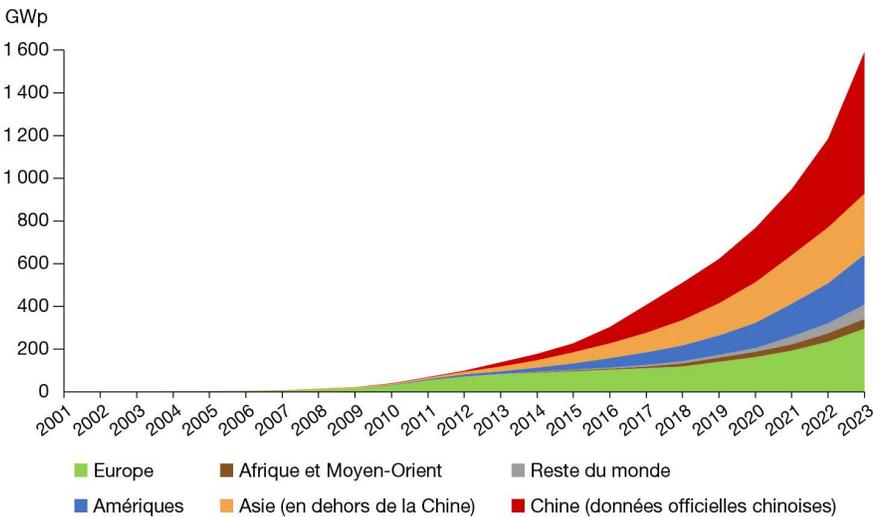


Figure 19.1. Évolution régionale des capacités de production des installations photovoltaïques entre 2001 et 2023 (en gigawatt) selon l'IEA. Source : IEA Photovoltaic Power Systems Programme².

Le potentiel de développement de la filière est énorme selon certains experts qui évaluent que 1 % des surfaces agricoles permettrait de satisfaire la production totale de l'électricité mondiale (Barron-Gafford *et al.*, 2019). La perspective offerte par ce potentiel interroge l'utilisation à venir de certaines terres agricoles. En effet, compte tenu des rendements économiques particulièrement importants des installations photovoltaïques, de nombreux acteurs du secteur agricole, des collectifs citoyens et

2. IEA Photovoltaic Power Systems Programme 2023 – Snapshot of Global PV Markets. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf.

certaines organisations environnementales redoutent que l'arbitrage entre la production agricole et la production énergétique se fasse en faveur de la deuxième. En Chine et en Inde, des auteurs estiment en effet que cet « extractivisme solaire » (Hu, 2023) ou encore ce capitalisme solaire bénéficient avant tout aux grands groupes industriels de l'énergie, qui acquièrent à grande échelle des terres agricoles au détriment des systèmes socio-écologiques locaux. Le changement climatique et le verdissement des agendas politiques viendraient légitimer dans ce cas un processus d'accaparement des terres particulièrement inquiétant pour la sécurité alimentaire mondiale et pour les droits des agriculteurs locaux (Singh, 2022; Hu, 2023).

3. Conclusion : une concurrence accrue entre production alimentaire et énergétique

Le changement climatique a mis à l'agenda la question de la réduction de la consommation énergétique de l'agriculture notamment dans les Nord. Dans les Suds, c'est davantage l'accès à l'énergie et l'électricité qui reste l'un des enjeux majeurs de l'amélioration des conditions de vie des populations. La FAO relève que chaque activité consommatrice d'énergie en agriculture regorge de capacités d'économie d'énergie consommée, grâce à une prise de conscience et à une mise en œuvre effective des moyens de la réduire : cela requiert que chacun des acteurs adopte un raisonnement poussé sur chaque activité énergivore afin d'économiser l'énergie sans que cela nuise aux productions agricoles. En se basant sur un critère d'efficacité énergétique, exprimée en kilowatt-heure d'énergie consommée par unité de production de denrées alimentaires « à l'assiette », des experts font remarquer à juste titre que la réduction des pertes de post-récolte de denrées agricoles et alimentaires est le moyen le plus puissant de réduction des besoins en énergie des chaînes agri-alimentaires (voir chapitre 23), cela tout en permettant également l'amélioration de la disponibilité en alimentation à l'échelle mondiale.

Le recours aux énergies renouvelables telles que l'utilisation des gisements de biomasses résiduelles encore disponibles en grande quantité, en particulier dans certains pays du Sud, doit permettre de réduire les émissions de GES du secteur, tout en améliorant la productivité (grâce à une meilleure disponibilité locale d'énergie) et réussir à nourrir la population en forte croissance, en particulier en Afrique subsaharienne.

La production d'énergie dans et par l'agriculture, que ce soit à travers l'utilisation de la biomasse lignocellulosique, de la méthanisation, de l'agrivoltaïsme et de l'éolien, peut engendrer une concurrence entre la production alimentaire et la production non alimentaire (énergie).

L'utilisation de la biomasse ou des terres agricoles à des fins énergétiques entre en concurrence avec d'autres enjeux tout aussi essentiels que la disponibilité de l'énergie (maintien des puits de carbone, préservation de la biodiversité, fertilisation durable des sols), et ce, dans un contexte où la disponibilité de la biomasse est de plus en plus remise en question : si cette ressource est renouvelable, elle n'est pas illimitée, d'autant que ses principaux gisements (forêts et agriculture) sont fragilisés par le réchauffement climatique. Quant aux installations agrivoltaïques, si elles permettent de tirer parti d'une ressource inépuisable de façon intéressante, elle modifie drastiquement l'accès au foncier agricole dans certaines régions du monde. Le développement des ENR a aussi d'importants effets redistributifs potentiels au sein du secteur agricole et risque d'accroître les inégalités socio-économiques existantes entre agriculteurs.

Enfin, ces ENR peuvent entraîner de nombreux conflits d'usage ou de modifications de la qualité des sols. Leur développement ne peut donc pas être laissé aux mains des groupes industriels qui sont davantage tournés vers la rentabilité financière sur le court terme que préoccupés par les enjeux de justice sociale et environnementale que le développement des ENR pose (Demenois *et al.*, 2022; Demenois, 2023).

Sur le plan géopolitique, le développement de la production d'énergie par l'agriculture renforce les enjeux autour de la maîtrise du foncier agricole. La montée en puissance de la Chine, en tant que principal pays producteur d'ENR, avec des besoins accrus d'accès à du foncier, ne peut que bouleverser les rapports de force existants entre les différentes régions du monde.

À l'échelle des territoires aussi, les projets agroénergétiques doivent aussi être pensés dans une logique d'aménagement du territoire : ces projets mobilisent des ressources territoriales telles que des terres agricoles, biomasses, coproduits, déchets, etc. et deviennent des moteurs du développement économique et social local.

Il est donc essentiel que dans les Nordes comme dans les Suds ces enjeux soient précisément encadrés et régulés pour limiter le risque de déstabiliser (1) la sécurité alimentaire, (2) les droits des paysans, et (3) les écosystèmes locaux.

4. Références bibliographiques

- Al Mamun M.A., Dargusch P., Wadley D., Zulkarnain N.A., Aziz A.A., 2022. A review of research on agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112351.
- Barron-Gafford G.A., Pavao-Zuckerman M.A., Minor R.L., Sutter L.F., Barnett-Moreno I., Blackett D.T., *et al.*, 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat Sustain*, 2, 848-855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- BOAD, 2023. Atelier de partage des conclusions/recommandations de l'étude sur la gestion durable des déchets ménagers industriels dans les Etats membres de l'UEMOA en vue de la production d'énergie. Lomé, le 30 juin 2023. Synthèse de l'étude, 6p.
- Couturier C., Jack A., Laboubee C., Meiffren I., 2019. La méthanisation rurale, outil des transitions énergétiques et agroécologiques. Note de positionnement. Solagro.
- Demenois J., 2023. Les sols sous les effets du changement climatique. Perspectives géopolitiques, options d'atténuation et d'adaptation. *Diplomatie. Les Grands Dossiers*, 76 : 20-23. <https://www.areion24.news/categorie-produit/numero-grands-dossiers-de-diplomatie/>
- Demenois J., Dayet A., Karsenty A., 2022. Surviving the jungle of soil organic carbon certification standards: an analytic and critical review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27:1, 17 p. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09980-3>
- Dinesh H., Pearce J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36(10), 2725-2732.
- Hrabanski M., Verdeil S., Ducastel A., 2024. Agrivoltaics in France: The multi-level and uncertain regulation of an energy decarbonisation policy. *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 1-27.
- Hu Z., 2023. Towards solar extractivism? A political ecology understanding of the solar energy and agriculture boom in rural China. *Energy Research & Social Science*, 98, 102988.
- Searchinger T.D., Wiersenus S., Beringer T., Dumas P., 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564, 249-253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z>
- Singh D., 2022. 'This is all waste': emptying, cleaning and clearing land for renewable energy disposition in borderland India. *Contemporary South Asia*, 30(3), 402-419.

Chapitre 20

Adaptation au changement climatique : quelles pratiques innovantes dans les systèmes de production tropicales ?

*Éric Justes, Benoit Bertrand, Hervé Etienne, Frédéric Gay,
Bruno Rapidel, Philippe Thaler, François-Xavier Côte*

Dès aujourd'hui, des systèmes de production agricole et sylvicole doivent être conçus dans le but de combiner : adaptation au changement et variabilité climatique, réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et sécurisation de la production alimentaire. Le changement climatique impose aux producteurs de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation allant au-delà des pratiques actuelles adaptées à la variabilité climatique saisonnière et interannuelle. Certaines cultures pourraient même devoir migrer vers des zones de culture plus appropriées, ce qui affectera probablement profondément les structures de production et les sociétés rurales, les filières et les marchés. Il est généralement admis que la plupart des options d'adaptation et d'atténuation devront être compatibles entre elles. Des arbitrages devront donc être faits, car il est crucial que les compromis permettent de maintenir la production agricole dans un contexte d'évolution de la démographie humaine et d'exigences de sécurité alimentaire.

La question de l'adaptation des cultures est une problématique générique aux diverses productions agricoles et sylvicoles en zone tropicale, mais elle n'implique pas les mêmes niveaux de risque dans les décisions selon que l'on cultive des plantes annuelles ou des plantes pérennes. En effet, pour les plantes annuelles, semées chaque année, il sera sans doute plus aisé de s'adapter étape par étape (adaptation incrémentale) sans remettre en cause la résilience de l'exploitation agricole, alors que pour les plantes pérennes la question du choix des espèces et des variétés est un point particulièrement crucial, dans la mesure où elles sont plantées pour des temps longs (y compris, pour certaines, sur plusieurs décennies) et qu'elles subiront les stress qui se cumulent année après année.

Les cultures tropicales subissent déjà depuis plusieurs années les impacts du changement climatique liés à la hausse des températures, aux changements des régimes de précipitations, aux événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents, et aux émergences de nouvelles maladies. Elles sont diverses dans leur nature et dans leur type d'organisation, mais elles reposent souvent sur des productions paysannes familiales (voir chapitre 5), qui sont particulièrement vulnérables économiquement et qui dépendent de la robustesse et de la durabilité des filières qui leur procurent un revenu vital. Si le producteur est le premier maillon de la chaîne de valeur qui doit adapter ses pratiques et son système de production au changement climatique, les autres acteurs des filières devront également changer leurs pratiques et leurs organisations pour faire face

aux irrégularités d'approvisionnement liées au changement climatique, aux surcoûts engendrés, aux déplacements de certaines zones de production et à des questionnements sociétaux sur l'empreinte environnementale des productions (en particulier des productions importées d'un continent ou d'une région à l'autre).

Dans ce chapitre, nous proposons une réflexion sur une typologie des adaptations des agricultures tropicales au changement climatique. La première partie décrit les éléments de classification possible des adaptations. La seconde partie illustre à travers deux cas d'étude sur des plantes pérennes (caféier et hévéa) les adaptations en cours dans ces deux filières ainsi que les défis de connaissances à relever pour accélérer ces processus d'adaptation. La classification que nous décrivons est basée sur une temporalité des actions à mettre en œuvre pour faire face aux changements climatiques (adaptation annuelle, pluriannuelle et de long terme qui nécessitera plus ou moins de reconception des systèmes de production). Les solutions envisagées se réfèrent principalement aux concepts d'agroécologie et d'agriculture climato-intelligente décrits dans le chapitre 3 de cet ouvrage.

1. L'adaptation au changement climatique des cultures tropicales

Une littérature abondante existe sur les concepts et sur les solutions envisageables concernant la problématique de l'adaptation au changement climatique des sociétés humaines dans toutes ses dimensions (Howden *et al.*, 2007). Moser et Ekstrom (2010) ont proposé de se concentrer principalement sur le processus d'adaptation intentionnel et planifié. Ce processus reste cependant difficile à imaginer sur le long terme compte tenu des incertitudes sur l'intensité des changements climatiques et de leurs conséquences en termes sociaux, économiques et politiques. Des reconceptions complètes des systèmes de production et de l'organisation des filières sont prévisibles.

Debaeke *et al.* (2017) proposent de réfléchir aux mesures et aux solutions pour l'adaptation au changement climatique des agricultures et pour l'adoption de mesures d'atténuation en prenant en compte explicitement la nature des changements, selon qu'il s'agisse : (1) de changements progressifs et de réponses autonomes des agriculteurs (par exemple le déplacement de la date de plantation, le changement de variétés de cultures), et (2) de changements planifiés et transformationnels, lesquels nécessitent des investissements substantiels (par exemple le développement de nouvelles variétés de cultures, l'expansion des infrastructures d'irrigation, l'introduction de l'agroforesterie, etc.). Les ajustements autonomes incluent les efforts des agriculteurs pour optimiser la production sans changements majeurs du système et sans l'implication d'autres secteurs (comme la politique publique, la recherche). Les adaptations transformationnelles sont celles qui sont adoptées à une échelle plus grande (territoire et région) et qui modifient l'usage des ressources, transforment ou déplacent les lieux de production (Kates *et al.*, 2012). Ce sont des changements structurels majeurs visant à surmonter l'adversité provoquée par le changement climatique.

Une catégorisation complémentaire à la précédente pour analyser les adaptations indispensables consiste à considérer les temporalités nécessaires à la mise en œuvre des changements. Les adaptations de court terme étant généralement mises en œuvre de façon indépendante par un acteur de la chaîne de valeur et les adaptations de moyen et long terme étant davantage organisées et planifiées par les différents acteurs de la filière et par les décideurs politiques au niveau territorial ou plus global.

1.1. Les différents types d'adaptations des itinéraires techniques et des systèmes de production

1.1.1. Adaptation à court terme

Concernant les stratégies à court terme d'adaptation des pratiques actuelles, les producteurs peuvent utiliser diverses options techniques qu'ils connaissent (*coping measures*). Ces solutions techniques peuvent être combinées pour réduire la vulnérabilité et pour adapter les systèmes de culture au changement climatique. Debaeke *et al.* (2017) résument les stratégies qui peuvent être mises en œuvre pour faire face aux stress hydriques et thermiques des cultures par leur objectif : l'esquive, l'évitement (par le rationnement végétatif), la tolérance, l'atténuation, la conservation des ressources, la résilience (récupération). Plusieurs types de leviers d'adaptation sont utilisables avec une diversité d'options techniques, comme le choix des cultures (espèces) et des variétés (cultivars, populations), le mode de gestion des cultures (itinéraire technique), la modification du système de culture lui-même.

Les adaptations choisies peuvent s'appuyer sur plusieurs options : (1) l'échappement au stress en décalant la date de semis pour échapper aux stress hydriques et thermiques, (2) l'évitement par le biais d'applications de nutriments (engrais minéraux ou organiques), de densités de plantation et de dispositions spatiales (par exemple sauter des rangs) adaptées aux régimes des précipitations et aux objectifs de rendement, (3) l'atténuation de l'effet grâce à l'utilisation d'irrigation, et (4) la conservation des ressources par le travail du sol et la gestion des résidus pour maximiser le stockage de l'eau du sol et pour réduire l'évaporation, le ruissellement et l'érosion.

L'adaptation du système de culture est parfois nécessaire face à des impacts forts du changement climatique. Dans ce cas, l'objectif sera de diversifier les cultures et d'accroître l'agrobiodiversité cultivée pour augmenter la résilience (rotation, organisation spatiale des cultures) (voir chapitre 21). Diverses stratégies sont alors possibles, comme les mélanges de variétés et les cultures associées (mélanges d'espèces), l'agroforesterie (culture-arbre ou arbre-arbre, avec ou sans gestion de couverts végétaux), les systèmes de culture flexibles avec l'adaptation de la culture en fonction des conditions climatiques, voire avec une mise en œuvre de culture double et en relais. Par ailleurs, le redéveloppement de systèmes d'agriculture couplée à l'élevage avec également des systèmes agro-sylvopastoraux pourrait constituer une forme d'adaptation, en permettant plus de résilience face aux impacts du changement climatique. Ces options basées sur de nouveaux systèmes, ou d'anciens systèmes revisités et optimisés, entraînent une complexité accrue de gestion et l'accès à de nouvelles connaissances, et nécessitent souvent un renforcement de capacités des producteurs, des services de conseil et de la recherche.

1.1.2. Adaptation à long terme

Compte tenu du changement progressif du climat dans le passé, les producteurs se sont adaptés de manière autonome par des ajustements techniques successifs aux changements et à la variabilité climatiques. Avec l'accélération du changement climatique et les effets majeurs qu'il induit, la place des agriculteurs dans le choix et dans la mise en œuvre des adaptations restera majeure, mais des changements concernant d'autres niveaux d'organisation sur le long terme, comme l'usage des terres et la productivité des cultures qui en résultent, devront être envisagés et planifiés (Bindi et Olesen, 2011 ; Kates *et al.*, 2012 ; Anwar *et al.*, 2013).

L'utilisation de nouvelles variétés, surtout chez les espèces pérennes, peut être rangée dans les changements de moyen et long terme. La mise au point de nouvelles variétés (voir chapitre 21) s'inscrit en effet sur des temps longs (même si les nouvelles techniques d'amélioration génétique pourraient écourter les cycles d'amélioration). Ces temps longs seront aussi liés à l'adaptation de la chaîne de valeur de la filière à ces nouvelles variétés, ainsi qu'à l'adéquation de l'offre avec les demandes des consommateurs ou des transformateurs. Il est probable que les solutions agronomiques devront également pour partie s'appuyer sur de nouvelles variétés. Les cultivars actuels ont en effet été sélectionnés pendant longtemps avec des objectifs liés à la productivité ou à la standardisation des produits, différents de ceux de l'adaptation au changement climatique (Boote *et al.*, 2011 ; Ziska *et al.*, 2012).

Un niveau d'adaptation transformative des systèmes pourra s'avérer nécessaire en cas d'inadéquation entre la production et les ressources disponibles déterminées par le « nouveau climat ». Cette situation nécessitera dans certains cas un changement de paradigme de la production agricole, par exemple la transformation d'un système irrigué en un système pluvial, ou la substitution de plantations de plein soleil par des cultures sous ombrages naturels ou artificiels.

Ce changement de paradigme est heuristique, subjectif et relatif, comme le soulignent Rickards et Hodwen (2012), qui indiquent aussi que les changements pour une adaptation transformative sont variables en intensité, en généralité, en échelle spatiale affectée, en effets induits ou non sur la globalité du système, en niveau de permanence du changement ou de réversion possible.

Cette transformation profonde va induire de nombreux impacts en cascade et il sera donc nécessaire de développer *ex ante* des outils de prédiction (modélisation) pour l'aide à la décision et, *in itinere*, de mettre en place des indicateurs de suivi-évaluation des changements pour le pilotage des transitions et le suivi de la durabilité des nouveaux systèmes. Une question centrale, au-delà des adaptations d'ordre technique discutées dans ce chapitre, est bien sûr celle du financement de ces transitions, en particulier pour les agricultures du Sud, les plus vulnérables socialement et économiquement.

1.1.3. Typologie pour caractériser le continuum de solutions d'adaptation et les défis à relever

Afin de répertorier les solutions d'adaptation, il est possible de résumer la nature et les formes de l'adaptation en agriculture selon un gradient d'adaptation intégrant les divers concepts synthétisant de façon pragmatique la diversité des travaux de recherche et des propositions d'actions dans la large bibliographie sur le sujet. Nous avons adapté diverses représentations proposées par différents auteurs (Debaeke *et al.*, 2017 ; Kates *et al.*, 2012) en un schéma organisé en un continuum de trois niveaux d'adaptation (figure 20.1) :

- incrémentale « pour faire face », avec une dimension plutôt annuelle (adaptation de dates de semis, d'utilisation de nouvelles variétés, de pratiques de gestion nouvelles, etc.) ;
- systémique « pour ajuster », avec une dimension pluriannuelle (solutions d'agro-écologie, d'agroforesterie en substitution des systèmes de culture, etc.) ;
- transformative « pour reconcevoir » (nouvelles productions et filières, autre usage des terres, migrations de zones de culture).

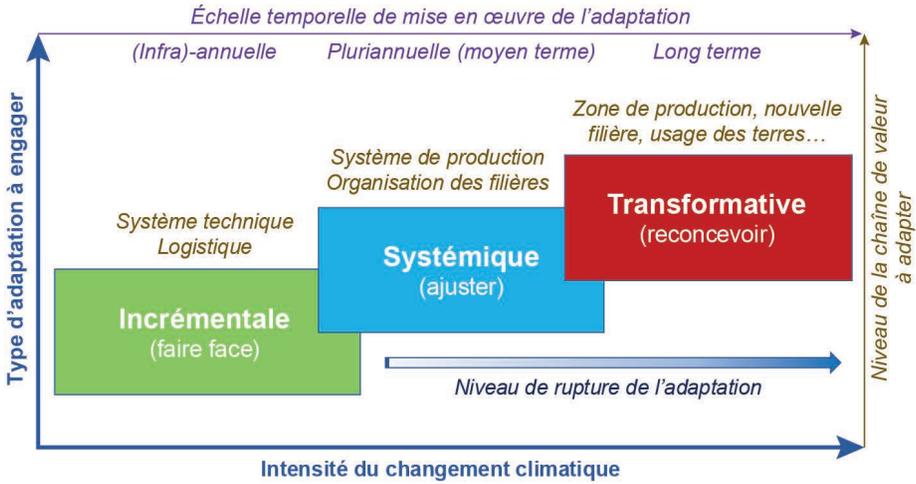


Figure 20.1. Illustration du continuum des formes d'adaptation en fonction de l'intensité du changement climatique. Lien avec l'échelle temporelle du changement à mettre en œuvre et avec le niveau de la chaîne de valeur qui devra se transformer.

Les processus impliqués dans ce gradient d'adaptation sont de nature différente (tableau 20.1), tant au niveau technique qu'organisationnel à l'échelle de l'exploitation agricole et de la chaîne de valeur. L'échelle temporelle du changement est également variable en fonction de la forme d'adaptation.

Tableau 20.1. Formes d'adaptation et nature des processus impliqués (les croix dans le tableau soulignent l'intensité de ces processus pour l'adaptation).

Formes et nature des options de l'adaptation au changement climatique		Formes d'adaptation		
		Adaptation « incémentale »	Adaptation « systémique »	Adaptation « transformative »
Processus impliqués	Adaptation de nature technique	+++	++	++
	Adaptation technique et organisationnelle de la chaîne de valeur existante		+++	+++
	Changement de chaîne de valeur et relocalisation			+++
Échelle temporelle du changement		Annuelle et infra-annuelle	Pluriannuelle	Décennie et plus

1.1.4. Compromis entre adaptation et atténuation

La plupart des options d'adaptation au changement climatique doivent aussi avoir des impacts positifs sur l'atténuation en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'azote (réduction des émissions de gaz à effet de serre) et le stockage du carbone dans le sol. Certaines mesures d'atténuation pourraient cependant demander des adaptations pour réellement contribuer à la capacité d'adaptation des systèmes agri-

coles. Considérons par exemple la contribution des légumineuses à la réduction des émissions de GES et à la limitation de l'utilisation des énergies fossiles, qui est une solution considérée pertinente (Jensen *et al.*, 2012). De nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux des légumineuses ont été rapportés (Voisin *et al.*, 2014), leur contribution à la fertilité des sols étant l'un des facteurs clés du maintien de la production céréalière dans les zones sèches des pays en développement et plus généralement dans les zones à faibles intrants. Cependant, le développement racinaire restreint de la plupart des espèces de légumineuses à graines peut limiter l'absorption d'eau et de nutriments, en particulier aux stades avancés de la croissance, lorsque les stress environnementaux sont fréquents. La fixation symbiotique de N₂, qui a lieu dans les couches supérieures du sol, est extrêmement sensible à la sécheresse (Liu *et al.*, 2011). Par conséquent, le rendement des légumineuses alimentaires cultivées dans les environnements arides à semi-arides est généralement variable ou faible en raison de la chaleur intense et des sécheresses de fin de cycle cultural qui caractérisent ces zones. Même dans des environnements plus humides, un déficit hydrique peut encore survenir sur une période de quelques semaines, entraînant une perte de rendement importante. Par conséquent, les légumineuses risquent d'être peu cultivées dans certaines régions en situation de changement climatique, et des efforts de sélection sont nécessaires pour améliorer le potentiel d'adaptation des cultures de légumineuses aux stress thermiques et hydriques concomitamment à des dates de semis plus précoces, au développement de types hivernaux et à des cultures associées (*intercropping*) avec des céréales (Cutforth *et al.*, 2007; Vadez *et al.*, 2012).

1.2. Les composantes de l'adaptation au niveau des filières

Il existe peu de données de la littérature scientifique qui proposent une typologie d'adaptation au changement climatique à l'échelle de l'ensemble de la chaîne de valeur (filiale). Au-delà des adaptations de type technique, deux autres processus clés

Tableau 20.2. Solutions d'adaptation des systèmes caféier à différents niveaux d'organisation.

	Adaptation incrémentale
Adaptation au niveau variétal (Côte <i>et al.</i> , 2019)	<ul style="list-style-type: none"> – Utilisation des variétés arabica et robusta tolérantes à la sécheresse (Sarzynski <i>et al.</i>, 2024) – Nouvelles variétés adaptées aux maladies émergentes (rouille du café, anthracnose des rameaux, scolyte) – Nouvelles variétés (1) adaptées à la sécheresse (système racinaire plus profond et plus ramifié; projet Bolero), (2) présentant une meilleure utilisation des ressources minérales (projet PEPR SVA, <i>flagship 4</i>), et (3) adaptées à des systèmes multiespèces (projet PRCC au Laos) – Techniques de propagation végétative et/ou sexuée pour le déploiement de variétés élites plus résilientes (Etienne <i>et al.</i>, 2018 et 2024; Georget <i>et al.</i>, 2017 et 2019)

d'adaptation pourraient être pris en compte pour classer les adaptations possibles à l'échelle des filières. Ces processus concernent d'une part les adaptations de type organisationnel et celles liées à la capacité de financement des investissements et de couverture des risques financiers pris par les agriculteurs pour la mise en place de la transition (processus de « solvabilisation »). Développer une stratégie d'adaptation doit associer, dans une approche concertée, ces trois composantes (technique, organisationnelle, économique). Le processus d'innovation organisationnelle vise la construction de démarches multiacteurs, capables de réunir un ensemble d'acteurs de la chaîne de valeur, qui de façon isolée ne pourrait que partiellement mettre en œuvre les solutions nécessaires à l'adaptation au changement climatique. Le processus de « solvabilisation », outre la prise en compte des coûts et des risques financiers pris par les agriculteurs et par d'autres acteurs qui s'engagent dans la transition, concerne également la reconnaissance par les marchés (création de valeur et création de nouveaux marchés) des acteurs qui s'adaptent au changement climatique et contribuent à son atténuation.

Dans la suite de ce chapitre, deux exemples de classification des adaptations au changement climatique ont été choisis pour illustrer les typologies présentées ici. Ces exemples concernent deux cultures pérennes, le café et l'hévéa, emblématiques de cultures tropicales et particulièrement affectées par le changement climatique.

2. Exemples d'adaptation au changement climatique de cultures pérennes tropicales

2.1. Caféiculture et adaptation au changement climatique

Des solutions d'adaptation des systèmes à différents niveaux d'organisation (plante, parcelle, paysage, filière) chez le caféier sont présentées dans le tableau 20.2.

Adaptation systémique	Adaptation transformative
<ul style="list-style-type: none"> – Variétés adaptées à l'agroforesterie, aux hautes altitudes, au plein soleil avec irrigation, aux hautes latitudes (Sarzynski <i>et al.</i>, 2023), aux plus fortes températures, à l'ombrage (Bertrand <i>et al.</i>, 2021 et 2025) – Sélection d'espèces d'arbres adaptées à l'agroforesterie (Meylan <i>et al.</i>, 2017; Rigal <i>et al.</i>, 2022; Breitler <i>et al.</i>, 2022) (projets européens Breedcafs et Bolero) – Variétés créées par l'utilisation de l'édition du génome – Recherche de gènes d'adaptation aux fortes températures et à la sécheresse (Alves <i>et al.</i>, 2017; Ferreira Torres <i>et al.</i>, 2019) – Développement de la technique d'édition du génome CRISPR-Cas9 (Breitler <i>et al.</i>, 2018; Casarin <i>et al.</i>, 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> – Migration des zones de production avec de nouvelles variétés, remplacement de la variété arabica par robusta dans les zones « basses » arabica – Remplacement de la variété robusta par des variétés hybrides « robusta x racemosa » résistantes à la sécheresse – Modification de la chaîne de valeur (filière) liée au déplacement des zones de production et aux changements variétaux (autres marchés)

Tableau 20.2. (suite)

Adaptation incrémentale	
Adaptation au niveau des itinéraires techniques, des systèmes de culture, et de l'organisation à l'échelle du paysage	<ul style="list-style-type: none"> – Synchronisation et sécurisation de la floraison par irrigation (Caar, 2001) – Prophylaxie pour adaptation aux maladies émergentes – Lutte contre l'érosion avec plantes de couverture et haies vives (Labrière <i>et al.</i>, 2015) – Irrigation optimisée (Rigal <i>et al.</i>, 2023) – Conception participative assistée par modèle pour la fertilisation fractionnée
Et contribution à l'atténuation	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction et fractionnement de la fertilisation azotée (Capa <i>et al.</i>, 2015) – Protection contre le vent
Adaptation au niveau de la filière	Support auprès des producteurs pour adoption des techniques d'adaptation (conseils techniques, accès à des variétés adaptées, etc.)

2.2. Hévéaculture et adaptation au changement climatique

Des solutions d'adaptation des systèmes à différents niveaux d'organisation (plante, parcelle, paysage, filière) chez l'hévéa sont présentées dans le tableau 20.3.

Tableau 20.3. Solutions d'adaptation des systèmes hévéicoles à différents niveaux d'organisation.

Adaptation incrémentale	
Adaptation au niveau variétal	– Nouveaux clones adaptés aux conditions pédoclimatiques et à la pression parasitaire (choix de clones en fonction de la prévalence de la maladie SALB en Amérique du Sud; Rivano <i>et al.</i> , 2015)
Adaptation au niveau des itinéraires techniques, des systèmes de culture, et de l'organisation à l'échelle du paysage	<ul style="list-style-type: none"> – Adaptation des systèmes de saignée aux contraintes climatiques : (1) excès de pluie (Zaw <i>et al.</i>, 2017); (2) saignée nocturne pour l'augmentation de température (Seneviratne <i>et al.</i>, 2021); (3) arrêt de saignée en saison sèche (Chantuma <i>et al.</i>, 2017) – Pratiques de stimulation à l'éthylène adaptées aux fréquences de saignée (Chambon <i>et al.</i>, 2014) – Irrigation si possible – Techniques de plantation adaptée aux conditions sèches – Pratiques de gestion de la couverture du sol pour optimiser la gestion de l'eau (Clermont-Dauphin <i>et al.</i>, 2018)

Adaptation systémique	Adaptation transformative
<ul style="list-style-type: none"> – Techniques d'agroécologie classiques pour la santé globale du sol et de la plante : utilisation de composts, de biochar, de bactéries fixatrices d'azote – Conservation des mosaïques et des continuités paysagères (paysages diversifiés) pour favoriser les régulations biologiques des bioagresseurs 	<ul style="list-style-type: none"> – Agriculture numérique agroécologique avec utilisation intensive de ressources, de capteurs et d'informations pour optimiser l'usage de toutes les ressources sans induire d'impacts sur la santé humaine et sur l'environnement (irrigation avec récupération des effluents, fertilisation minérale optimisée précisément et robotisation)
<ul style="list-style-type: none"> – Utilisation d'arbres (agroforesterie) pour augmenter la séquestration de carbone, pour maintenir l'humidité et réduire la température (Koutouleas <i>et al.</i>, 2022; Notaro <i>et al.</i>, 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> – Culture sous abri physique (filets) à très haute intensité et haute densité (réduction de la taille des arbres par greffage nanisant et/ou sélection de gènes de nanisme) – Recyclage des effluents
<ul style="list-style-type: none"> – Réorganisation des acteurs pour supporter les producteurs et favoriser l'adoption des techniques d'adaptation et la multiplication de nouvelles variétés pour donner accès aux producteurs – Adaptation organisationnelle des collecteurs de café – Développement de cahiers des charges et de certifications générant de la valeur ajoutée (Hrabanksi <i>et al.</i>, 2013) – Adaptation aux nouveaux marchés liés aux variations des cours, eux-mêmes liés au changement des zones de cultures 	<ul style="list-style-type: none"> – Migration des zones de production vers des régions plus élevées ou latitudes supérieures (avec culture sous abri) – Coordination territoriale entre producteurs et acteurs pour créer des paysages adaptés au changement climatique – Utilisation de nouvelles variétés générant de nouveaux marchés – Approche en « clusters agroforestiers » associant producteurs familiaux, financeurs de crédits, transformateurs, metteurs en marché et certificateurs (Meter <i>et al.</i>, 2023)
Adaptation systémique	Adaptation transformative
<ul style="list-style-type: none"> – Porte-greffes clonaux (Carron <i>et al.</i>, 2008; Carron <i>et al.</i>, 2009) 	<ul style="list-style-type: none"> – Développement d'autres espèces productrices de latex adaptées à des conditions chaudes et sèches (guayule)
<ul style="list-style-type: none"> – Systèmes plurispécifiques plus résilients au changement climatique – Associer l'hévéa avec des espèces modifiant le microclimat pour effet de <i>cooling</i> au niveau de la canopée (association avec autres espèces ligneuses hautes) ou sous la canopée (association avec espèces ligneuses ou herbacées basses) – Adaptation des pratiques de gestion des plantations (gestion des matières organiques) – Pratiques de replantation, renouvellement des hévéas préservent la santé des sols (Perron <i>et al.</i>, 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> – Paysages agricoles diversifiés plus résilients au changement climatique et favorisant les régulations biologiques

3. Conclusion

Face au changement climatique, des solutions d'adaptation sont déjà en cours, mais des transformations encore plus rapides et plus intenses des systèmes de production doivent dès maintenant être mises en place pour faire face à l'intensité des impacts négatifs du changement climatique sur ces systèmes de production. Ces modifications devront être de nature systémique et transformative, et le fruit de compromis permettant de renforcer le rôle multifonctionnel de l'agriculture et la prise en compte de la vulnérabilité des agricultures les plus fragiles du Sud. De plus, il est maintenant bien documenté et largement partagé que la mise en place de systèmes de production intelligents face au climat et résilients nécessite la mise en œuvre de stratégies intégrées, comprenant des ensembles pertinents de pratiques de gestion plutôt que la mise en œuvre de pratiques spécifiques, une par une. Dans certaines conditions, un changement de paradigme sera nécessaire pour reconcevoir des systèmes durables (adaptation transformative). Les adaptations à mettre en œuvre s'inscrivent dans un processus de transition associant des changements d'ordre technique, organisationnel, partenarial et financier. Dans ce contexte, deux grands défis apparaissent : (1) le défi de coordination des différentes adaptations nécessaires entre les niveaux territorial, national, global, et des filières; (2) le défi de la mobilisation au niveau des politiques publiques et des acteurs privés des moyens nécessaires aux transitions (monétaires, matérielles et en formation pour la montée en capacité des acteurs) et la répartition équitable des coûts associés à la mobilisation de ces moyens entre les différents acteurs.

4. Références bibliographiques

- Alves G.S.C., Ferreira Torres L., Déchamp E., Breitler J.-C., Joët T., Gatineau F., *et al.*, 2017. Differential fine-tuning of gene expression regulation in coffee leaves by CcDREB1D promoter haplotypes under water deficit. *J Exp Bot*, 68 (11): 3017-3031. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx166>
- Anwar M.R., Liu D.E., Macadam I., Kelly G., 2013. Adapting agriculture to climate change: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, 113: 225-245.
- Bertrand B., Davis A.P., Maraval I., Forestier N., Mieulet D., 2023. Potential beverage quality of three wild coffee species (*Coffea brevipes*, *C. congensis* and *C. stenophylla*) and consideration of their agro-economic use. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(7), 3602-3612.
- Bertrand B., Mieulet D., Breitler J.C., Leroy T., Montagnon C., 2025. Breeding of new coffee varieties as a key strategy to improve coffee sustainability in response to the climate change. *Advances in Botanical Research*, 114, 247-281. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2024.06.001>
- Bertrand B., Villegas Hincapie A.M., Marie L., Breitler J.C., 2021. Breeding for the main agricultural farming of arabica coffee. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 709901.
- Bindi M., Olesen J.E., 2011. The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, 11 (Suppl. 1): S151- S158.
- Boote K.J., Ibrahim A.M.H., Lafitte R., McCulley R., Messina C., Murray S.C., *et al.* 2011. Position statement on crop adaptation to climate change. *Crop Science*, 51: 2337-2343.
- Breitler J.C., Dechamp E., Campa C., Zebral Rodrigues L., Guyot R., Marraccini P., Etienne H., 2018. CRISPR/Cas9-mediated efficient targeted mutagenesis has the potential to accelerate the domestication of *Coffea canephora*. *Plant Cell Tiss Org Cult (PCTOC)*, <https://doi.org/10.1007/s11240-018-1429-2>.
- Breitler J.C., Etienne H., Léran S., Marie L., Bertrand B., 2022. Description of an Arabica coffee ideotype for agroforestry cropping systems: A guideline for breeding more resilient new varieties. *Plants*, 11(16), 2133.

- Capa D., Pérez-Esteban J., Masaguer A., 2015. Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N₂O emissions. *Agron Sustain Dev*, 1-9.
- Carr M.K.V., 2001. The water relations and irrigation requirements of coffee. *Exp Agr*, 37, 1-36.
- Carron M.P., Lardet L., Leconte A., Dea B.G., Keli J., Granet F., *et al.*, 2009. Field Trials Network Emphasizes the Improvement of Growth and Yield Through Micropropagation in Rubber Tree (*Hevea Brasiliensis*, Muell. Arg.). 3rd Int. Symp. on Acclimatization and Establishment of Micropropagated Plants, Faro, Portugal, 485-492.
- Carron M.P., Nurhaimi-Haris, Sumaryono, Sumarmadji S., Granet F., Kéli J., Montoro P., 2008. The rootstock clones in rubber tree: a new varietal type toward the rejuvenated bi-clone. *In*: Supriadi M., Suryaningtyas H., Siswanto, Haris N., Sumaryono (eds.). Proceedings Internatinonal Workshop on Rubber Planting Materials: Bogor, Indonesia, 28-29 October 2008, 89-95.
- Casarin T., Freitas N.C., Pinto R.T., *et al.*, 2022. Multiplex CRISPR/Cas9-mediated knockout of the phytoene desaturase gene in *Coffea canephora*. *Sci Rep*, 12, 17270 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21566-w>
- Chambon B., Anghthong S., Kongmanee C., Somboonsuke B., Mazon S., Puengcharoen A., *et al.*, 2014. A comparative analysis of smallholders' tapping practices in four rubber producing regions of Thailand. *Advanced Materials Research*, 844, 34-37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.844.34>
- Chantuma P., Lacote R., Sonnarth S., Gohet E., 2017. Effects of Different Tapping Rest Periods during Wintering and Summer Months on Dry Rubber Yield of *Hevea Brasiliensis* in Thailand. *Journal of Rubber Research*, 20, 261-272.
- Clermont-Dauphin C., Dissataporn C., Suvannang N., Pongwichian P., Maeght J.L., Hammecker C., Jourdan C., 2018. Intercrops improve the drought resistance of young rubber trees. *Agron Sustain Dev*, 38.
- Côte F.-X., Poirier-Magona E., Perret S., Rapidel B., Roudier P., Thirion M.-C. (eds), 2019. *The agroecological transition of agricultural systems in the Global South*, Agricultures et défis du monde collection, AFD, Cirad, éditions Quæ, 360p.
- Cutforth H.W., McGinn S.M., McPhee K.E., Miller P.R., 2007. Adaptation of pulse crops to the changing climate of the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 99:1684-1699.
- Debaeke P., Pellerin S., Scopel E., 2017. Climate-smart cropping systems for temperate and tropical agriculture: mitigation, adaptation and trade-offs. *Cah. Agric.*, 26: 34002.
- Etienne H., Breitler J.-C., Brossier J.-R., Awada R., Laflaquière L., Amara I., Georget F., 2024. Coffee somatic embryogenesis: Advances, limitations, and outlook for clonal mass propagation and genetic transformation, *Advances in Botanical Research*, 114, 349-388. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2024.04.008>
- Etienne H., Breton D., Breitler J.-C., Bertrand B., Déchamp E., Awada R., *et al.*, 2018. Coffee somatic embryogenesis: How have research, the experience gained and innovations benefited commercial propagation of elite clones in the two cultivated species? *Frontiers in Plant Science*, 9:1630. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01630>.
- Ferreira Torres L., Reichel T., Déchamp E., de Aquino S., Duarte K.E., Alves G., *et al.*, 2019. Expression of *DREB*-like genes in *Coffea canephora* and *C. arabica* subjected to various types of abiotic stress. *Tropical Plant Biology*, 12, 98-116. <https://doi.org/10.1007/s12042-019-09223-5>
- Georget F., Courtel P., Malo Garcia E., Hidalgo J.M., Alpizar E., Breitler J.C., *et al.*, 2017. Somatic embryogenesis-derived coffee plantlets can be efficiently propagated by horticultural rooted mini-cuttings: a booster for somatic embryogenesis. *Scientia Horticulturae*, 216: 177-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.017>
- Georget F., Marie L., Alpizar E., Courtel P., Bordeaux M., Hidalgo J.M., *et al.*, 2019. Starmaya: The First Arabica F1 Coffee Hybrid Produced Using Genetic Male Sterility. *Front. Plant Sci.* 10:1344. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01344>
- Howden S.M., Soussana J.F., Tubiello F.N., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H., 2007. Adapting agriculture to climate change. *PNAS*, 104(50): 19691-19696.

Hrabanski M., Bidaud C., Le Coq J.F., Meral P., 2013. Environmental NGOs, policy entrepreneurs of market-based instruments for ecosystem services? A comparison of Costa Rica, Madagascar and France. *Forest Policy Econ*, 37, 124-132.

Jensen E.S., Peoples M.B., Boddey R.M., Gresshoff P.M., Hauggaard-Nielsen H., Alves B.J.R., *et al.*, 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 329-364.

Kates R.W., Travis W.R., Wilbanks T.J., 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *PNAS*, 109(19): 7156-7161.

Koutouleas A., Sarzynski T., Bertrand B., Bordeaux M., Bosselmann A.S., Campa C., *et al.*, 2022. Shade effects on yield across different *Coffea arabica* cultivars – how much is too much? A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 42:55. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00788-2>

Labrière N., Locatelli B., Laumonier Y., Freycon V., Bernoux M., 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agr Ecosyst Environ*, 203, 127-139.

Liu Y., Wu L., Baddeley J.A., Watson C.A., 2011. Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31: 155-172.

Meter A., Penot E., Vaast P., Etienne H., Ponçon E., Bertrand B., 2023. « Coffee agroforestry business-driven clusters»: an innovative social and environmental organisational model for coffee farm renovation. *Open Res Eur*. 2:61. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.14570.2>

Meylan L., Gary C., Allinne C., Ortiz J., Jackson L., Rapidel B., 2017. Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. *Agriculture, ecosystems & environment*, 245, 32-42.

Moser S.C., Ekstrom J.A., 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *PNAS*, 107(51): 22026-22031.

Notaro M., Gary C., Le Coq J.-F., Metay A., Rapidel B., 2022. How to increase the joint provision of ecosystem services by agricultural systems. Evidence from coffee-based agroforestry systems. *Agr Syst*, 196, 103332.

Perron T., Kouakou A., Simon C., Mareschal L., Frédéric G., Soumahoro M., *et al.*, 2021. Logging residues promote rapid restoration of soil health after clear-cutting of rubber plantations at two sites with contrasting soils in Africa. *Science of The Total Environment*, 151526.

Rickards L., Howden S.M., 2012. Transformational Adaptation: Agriculture and Climate Change. *Crop and Pasture Science*, 63, 240-250. <https://doi.org/10.1071/CP11172>

Rigal C., Duong T., Vo C., Bon L.V., Hoang Q.T., Chau T.M.L., 2023. Transitioning from Monoculture to Mixed Cropping Systems: The Case of Coffee, Pepper, and Fruit Trees in Vietnam. *Ecological Economics*, 214, 107980.

Rivano F., Maldonado L., Simbaña B., Lucero R., Gohet E., Cevallos V., Yugcha T., 2015. Suitable rubber growing in Ecuador: An approach to South American leaf blight. *Industrial Crops and Products*, 66, 262-270.

Sarzynski T., Bertrand B., Rigal C., Marraccini P., Vaast P., Georget F., *et al.*, 2023. Genetic-environment interactions and climatic variables effect on bean physical characteristics and chemical composition of *Coffea arabica*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103:4692-4703. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12544>

Sarzynski T., Vaast P., Rigal C., Marraccini P., Delahaie B., Georget F., *et al.*, 2024. Contrasted agro-nomical and physiological responses of five *Coffea arabica* genotypes under soil water deficit in field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443900>

Seneviratne P., Nakandala S.A., Samarasekera R.K., Karunathilake P.K.W., 2021. A study of different tapping times on latex production in smallholder rubber fields in Moneragala District in Sri Lanka. *Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka*, 101, 65-75.

Vadez V., Berger J.D., Warkentin T., Asseng S., Ratnakumar P., Rao K.P.C., *et al.*, 2012. Adaptation of grain legumes to climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 31-44.

Voisin A.S., Gueguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.H., Magrini M.B., Meynard J.M., *et al.*, 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34: 361-380.

Zaw Z.N., Sdoodee S., Lacote R., 2017. Performances of low frequency rubber tapping system with rainguard in high rainfall area in Myanmar. *Australian Journal of Crop Science*, 1444-1450. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.11.pne593>

Ziska L.H., Bunce J.A., Shimono H., Gealy D.R., Baker J.T., Newton P.C.D., *et al.*, 2012. Food security and climate change: on the potential to adapt global crop production by active selection to rising atmospheric carbon dioxide. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1745): 4097-4105.

Chapitre 21

S'adapter et innover en matière d'espèces et de variétés cultivées : un rôle clé pour la diversité cultivée et naturelle ?

Sophie Lérant, Myriam Adam, Mathieu Gonin, Cécile Grenier, Pierre Marraccini, Fabienne Micheli, Maria Camila Rebolledo, Clément Rigal, Mohamed Lamine Tékété, Michel Vaksmann, Hervé Étienne, Delphine Luquet

La valorisation de l'agrobiodiversité apparaît comme une solution particulièrement intéressante à moyen et long terme pour adapter les systèmes de culture au changement climatique de façon durable et agroécologique. Par *agrobiodiversité*, on entend la diversité des organismes vivants reconnue comme ressource par les agriculteurs, et gérée consciemment par eux. Elle se décline en trois niveaux d'organisation qui interagissent entre eux : la diversité génétique, spécifique et agroécosystémique. La valorisation de l'agrobiodiversité comprend donc la mise en place ou l'utilisation de complémentarités intra ou interspécifiques, lesquelles permettent, entre autres, d'optimiser l'usage des ressources liées au changement climatique (eau, CO₂), d'atténuer par l'ombrage par exemple certaines contraintes climatiques telles que l'évapotranspiration ou les pics de chaleur au sein de la parcelle cultivée, ou encore d'augmenter la tolérance à ces contraintes par la création de variétés résistantes (Levard, 2023). Ces complémentarités, qu'elles soient physiologiques, biophysiques ou génétiques, peuvent se jouer à l'échelle de l'individu (mélanges variétaux, hybrides ou greffage entre variétés ou espèces, associations avec le microbiote du sol), ou à l'échelle de la parcelle (agroforesterie ou systèmes vergers-maraîchers).

L'agrobiodiversité est la base, depuis des siècles, de nombreuses pratiques culturelles dans le monde entier, telles que l'agroforesterie, les associations interspécifiques ou les mélanges variétaux, l'agro-sylvopastoralisme, principalement dans le contexte des agricultures familiales tropicales (Bravo-Peña et Yoder, 2024). Sa mobilisation à grande échelle pour adapter les systèmes de culture au changement climatique s'inscrit dans une logique de souveraineté alimentaire et de durabilité des territoires : réduction de l'usage des pesticides, de l'eau, maintien de la fertilité des sols, fixation du carbone. En cela, l'utilisation de l'agrobiodiversité est partie prenante de l'agroécologie telle que définie par la FAO : une approche intégrée qui applique concomitamment des notions et des principes écologiques et sociaux pour la conception et la gestion des systèmes agricoles et alimentaires. L'agroécologie cherche à optimiser les interactions entre les plantes, les animaux, les humains et leur environnement, tout en tenant compte des dimensions sociales nécessaires pour qu'un système alimentaire soit durable et équitable¹.

1. www.fao.org/agroecology/fr; agroecology@fao.org.

Toutefois, face à la variabilité des contraintes climatiques, cette mobilisation de l'agrobiodiversité comme levier d'adaptation durable n'est possible que si l'on comprend et maîtrise les mécanismes biologiques et biophysiques à la base des interactions entre le génotype et l'environnement ($G \times E$) et des performances agronomiques et écosystémiques des agrosystèmes (Nerva *et al.*, 2022).

Ce chapitre vise à illustrer les fronts scientifiques, mais aussi les activités de recherche menées de longue date qui sous-tendent la valorisation de l'agrobiodiversité pour l'adaptation des systèmes de culture au changement climatique. En outre, il met en avant le potentiel adaptatif contenu dans la diversité cultivée ou apparentée (sauvage), intra ou interspécifique, ainsi que l'enjeu de mobiliser des approches interdisciplinaires innovantes (agronomie, physiologie, génétique, sélection, IA, modélisation) et multiacteurs (science-agriculture, approches participatives). Au travers d'exemples sur des cultures annuelles et pérennes tropicales, les résultats sont discutés au regard de l'urgence climatique, des enjeux liés à la conservation, à la caractérisation et à la valorisation de la diversité cultivée, à la résilience des agrosystèmes les plus vulnérables, dans le cadre d'une réglementation internationale et européenne en rapide évolution. Les différents exemples de systèmes de culture présentés dans ce chapitre suggèrent que, malgré les avantages incontestables que procurent les mélanges intra et interspécifiques en matière de résilience face au changement climatique et de durabilité, ils ne détrônent malheureusement pas les systèmes de monoculture plus intensifs et plus productifs.

1. La diversification des systèmes de culture comme levier durable d'adaptation au changement climatique

Le potentiel qu'offrent les systèmes de culture interspécifiques en matière d'adaptation durable au changement climatique est aujourd'hui bien reconnu. Toutefois, les processus biologiques impliqués dans la résilience et dans la productivité de ces systèmes sont complexes et encore peu compris, ce qui limite leur généralisation et leur déploiement à grande échelle dans le contexte de la transition agroécologique (Benitez-Alfonso *et al.*, 2023).

Les systèmes agroforestiers (Saf) sont connus pour leur capacité adaptative aux contraintes climatiques (températures extrêmes, déficit en eau), pour leur capacité à favoriser la santé et la fertilité des écosystèmes, et pour leur participation au maintien de la biodiversité et à la séquestration du carbone (Rigal *et al.*, 2022). Les Saf à base de café par exemple varient de configurations simples avec une seule espèce d'arbre d'ombrage, aux plus rustiques, où les caféiers sont plantés en milieu forestier. Les arbres d'ombrage jouent un rôle crucial en tempérant le microclimat, permettant un maintien de la photosynthèse aux heures les plus chaudes. Les modèles climatiques montrent que l'expansion des Saf pourrait atténuer les effets du changement climatique dans les zones de basse altitude les plus chaudes (500-800 m), préservant ainsi des conditions favorables à la caféiculture (Rahn *et al.*, 2018). Pour le cacaoyer, les systèmes de plantation peuvent présenter une grande hétérogénéité, aussi bien en matière d'espèces végétales associées que d'ombrage (Saj *et al.*, 2023). Si au niveau mondial les Saf à base de cacaoyers sont progressivement remplacés par des monocultures non ombragées (Heming *et al.*, 2022), plusieurs études montrent pourtant que les Saf traditionnels (comme le système *cabruca* au Brésil) peuvent réduire les impacts négatifs du changement climatique, et que leur conservation devrait être un objectif important des politiques agricoles régionales.

Des travaux sont en cours pour comprendre et pour optimiser la réponse du cacaoyer à la sécheresse et à l'ombrage et pour assister la coconception de Saf plus performants et durables par la modélisation (Cacao4Future²).

L'adaptation des cultures vivrières au changement climatique est devenue une réalité quotidienne dans des régions où la sécurité alimentaire est une préoccupation majeure, comme c'est le cas en Afrique soudano-sahélienne. Les cultures pluviales (céréales et légumineuses) ainsi que certaines pratiques agroécologiques traditionnelles sont de plus en plus utilisées, garantissant une récolte par an, tout en offrant des services écosystémiques : régulation des ravageurs, fertilité des sols. Malgré leurs avantages, ces pratiques agroécologiques sont peu attrayantes, car en concurrence avec des méthodes intensives plus productives. L'association de cultures est pratiquée, entre autres, avec le modèle sorgho-niébé, qui utilise une grande diversité de variétés locales ou sélectionnées pour leur adaptation aux contextes pédoclimatiques locaux (Ganeme *et al.*, 2022) (projet Oracle³). Il a été montré que les rendements sont plus stables en association qu'en culture pure et qu'une association sorgho-niébé dans le même poquet améliore la productivité. Si cette association sorgho-niébé reste la plus pratiquée, la diversification des systèmes à base de sorgho pourrait passer par l'introduction d'autres espèces, comme le haricot mungo, très bien adapté aux conditions semi-arides du Burkina Faso (Raboin *et al.*, 2023).

2. L'agrobiodiversité comme ressource pour alimenter les programmes de sélection et d'amélioration des plantes face au changement climatique

2.1. Recours à la diversité intraspécifique pour adapter les programmes de sélection aux contextes agroforestiers et à la sécheresse : cas du caféier

La plupart des variétés utilisées aujourd'hui ont été sélectionnées pour la culture en plein soleil et présentent des baisses de rendements sévères (d'environ 40 %) lorsqu'elles sont cultivées sous ombrage (Haggar *et al.*, 2011). Il est donc important de prendre en compte les composantes environnementales des Saf dans les programmes de sélection actuels (faible luminosité, compétition pour les éléments nutritifs et pour l'eau du sol). Dans le cas du caféier arabica, les sélectionneurs font face à un obstacle majeur, à savoir la très faible diversité génétique disponible au sein des variétés cultivées (Steiger *et al.*, 2002). Pour contourner ce problème, une voie d'amélioration est la création d'hybrides intraspécifiques, issus de croisements entre des variétés cultivées (dites lignées américaines) avec des individus sauvages issus du centre d'origine (Éthiopie). Ces hybrides d'arabica adaptés à l'ombrage présentent une meilleure qualité organoleptique, une productivité de 30 % supérieure aux variétés homozygotes traditionnelles et parfois une tolérance accrue à la sécheresse (projet Breedcafs⁴) (Sarzynski *et al.*, 2024); ils sont actuellement disséminés dans de nombreux pays (Turreira-García, 2022).

Pour guider les programmes de sélection chez les espèces cultivées arabica et robusta dans le choix de variétés tolérantes au stress hydrique, différentes approches ont été mises en place telles que le développement d'une méthode de phénotypage rapide

2. <https://www.cocoa4future.org/>.

3. <https://www.fondationavril.org/projects/cirad-oracle/>.

4. <https://www.breedcafs.eu>.

pour évaluer la résistance au déficit hydrique d'un grand nombre de plantes (collaboration Nestlé-Cirad-Fondation Nicafrance⁵ au Nicaragua), ou encore l'identification de gènes clés et le décryptage des mécanismes physiologiques mis en jeu pour l'adaptation aux stress abiotiques (Alves *et al.*, 2017). Une redéfinition de l'idéotype du café arabica a été proposée, prenant en compte les problématiques du changement climatique et de la culture en Saf. Cet idéotype cible permet d'orienter au mieux les futurs programmes de sélection, afin d'augmenter la rentabilité et la compétitivité des Saf à base de caféiers face à des systèmes de culture intensifs plein soleil, peu durables mais actuellement plus rentables (Breitler *et al.*, 2022).

2.2. Combinaison de méthodes de sélection modernes avec les savoirs paysans pour l'adaptation au changement climatique : cas du sorgho

Le programme d'amélioration variétale du sorgho en Afrique de l'Ouest porte essentiellement sur l'obtention de variétés résistantes à la sécheresse, et utilise l'esquive, méthode efficace et peu coûteuse, consistant à assurer la maturité de la culture avant l'apparition d'un stress hydrique sévère. Les efforts initiaux se sont concentrés sur le développement de variétés précoces, adaptées à des saisons de pluie plus courtes (Pixley *et al.*, 2023). Cependant, l'adoption de ces nouvelles variétés a été très limitée du fait d'une grande variabilité spatio-temporelle des saisons. Il a donc été privilégié de valoriser l'expertise des agriculteurs soudano-sahéliens qui, au fil des générations, ont développé des variétés plus sensibles à la photopériode, lesquelles ajustent naturellement leur maturité par rapport à la date de fin de la saison des pluies (figure 21.1) (Clerget *et al.*, 2021).

Cette sensibilité à la photopériode ainsi que le phénotype dit *stay-green* lié à la tolérance à la sécheresse (Vadez *et al.*, 2011) ont pu être intégrés dans les programmes de sélection assistée par marqueurs (SAM), accélérant ainsi le gain génétique. La combinaison de la SAM avec la modélisation des cultures permet de tenir compte des fortes interactions $G \times E$, et ainsi de concevoir des variétés spécifiquement adaptées au changement climatique (Guitton *et al.*, 2018). Enfin, le développement des variétés directement dans l'environnement cible, avec la participation des agriculteurs, a permis de produire des variétés plus adaptées aux conditions locales (Vom Brocke *et al.*, 2020).

2.3. Vers des programmes de sélection valorisant la diversité génétique pour l'adaptation des plantes au changement climatique et à son atténuation : cas du riz

La culture du riz en conditions inondées, dites en anaérobie, est actuellement controversée en raison d'une gestion de l'eau peu durable et de l'émission de gaz à effet de serre (GES), notamment les émissions de méthane par le système racinaire des plantes (Rajendran *et al.*, 2024). Cependant, ces conditions d'anaérobie génèrent de meilleurs rendements que les conditions de culture en aérobie, et demeurent majoritaires malgré la controverse environnementale (Saito *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, la sélection de variétés adaptées aux conditions d'aérobie est un enjeu majeur (collaboration Cirad-Ciat⁶) (Châtel *et al.*, 2008). Toutefois, l'efficacité des programmes de sélection est limitée, car les caractères associés à l'adaptation aux conditions d'aérobie n'ont pas ou peu été sélectionnés jusqu'à présent. Les bases

5. <https://fundacionnicafrance.org>.

6. <https://alliancebioiversityciat.org/fr>.



Figure 21.1. Sorghos africains dits «photopériodiques», ajustant naturellement leur développement en fonction de la date de semis (semis de juin à gauche, de juillet au centre et d'août à droite). Crédit : photos de M. Vaksman.

physiologiques et génétiques de l'adaptation aux conditions d'aérobic et de sécheresse doivent alors être étudiées (Luquet *et al.*, 2016). Si des gènes ou QTL (*quantitative trait loci*) candidats pour la création de variétés adaptées à ces conditions ont déjà été mis en évidence, peu d'entre eux s'avèrent suffisamment effectifs pour la sélection assistée par marqueurs. La sélection génomique récurrente semble une option concluante (Grenier *et al.*, 2015).

L'élévation des températures est également préoccupante pour la culture du riz. Une évaluation agronomique multilocale d'un panel de cinquante lignées de riz a montré une diminution forte des rendements moyens (d'environ 40%) dans les environnements les plus chauds (Rebolledo *et al.*, 2023). Ces résultats justifient le déploiement de méthodes de criblage pour identifier des sources de tolérance au sein de la diversité intra et interspécifique des riz des espèces *japonica*, *indica* et *glaberrima* dans le cadre des programmes de sélection (collaboration Cirad-Ciat).

2.4. Le greffage interspécifique comme solution pour l'adaptation au changement climatique : cas des agrumes

Chez la plupart des arbres cultivés, caractérisés par leur cycle biologique long et des durées de sélection de plusieurs dizaines d'années, l'identification d'espèces plus résilientes au changement climatique et aux stress abiotiques, puis leur valorisation rapide grâce à l'hybridation interspécifique ou au greffage interspécifique doivent être privilégiées.

Les agrumes cultivés et commercialisés sont issus d'hybridations interspécifiques au sein du genre *Citrus*, à partir de quatre espèces ancestrales : *C. reticulata*, *C. maxima*, *C. medica* et *C. micrantha* (Wu *et al.*, 2018). Dans la citriculture actuelle, les arbres sont presque toujours propagés par greffage de la variété commerciale sur un porte-greffe sélectionné pour ses caractéristiques de vigueur, de résistance ou de tolérance aux stress biotiques et/ou abiotiques. Plus de vingt génotypes de porte-greffes du genre *Citrus*, de genres connexes (comme *Poncirus*), ou encore des hybrides interspécifiques ou intergénériques ont été recensés dans le monde, et leur utilisation dépend de la région de production, des pratiques locales et de leurs performances agronomiques (Bowman et Joubert, 2020).

Dans les régions où la culture pluviale est courante, comme en Amérique latine, l'efficacité d'utilisation de l'eau est devenue une cible prioritaire pour la sélection de nouveaux porte-greffes (Girardi *et al.*, 2021). Ainsi, l'analyse de la production d'oranges (*C. sinensis* [L.] Osbeck var. Valencia), greffées sur vingt-trois génotypes issus d'hybridations interspécifiques, intergénériques ou de la sélection d'hybrides sur une période de dix ans en culture pluviale au Brésil (climat de type savane tropicale), a permis de sélectionner de nouveaux porte-greffes résistants au déficit hydrique. D'autre part, l'étude de différentes combinaisons interspécifiques de greffons et porte-greffes (Santana-Vieira *et al.*, 2016) a montré qu'elles pouvaient présenter des comportements adaptatifs contrastés vis-à-vis du stress hydrique (évitement vs tolérance) et bénéfiques dans le cas de zones de culture présentant des sols durs, secs et de faible profondeur.

3. Conclusion et perspectives

Le changement climatique est global, mais ses effets génèrent de plus en plus de variabilité intra et interannuelle à l'échelle locale (rapport AR6, IPCC⁷) qu'il est important de caractériser en vue d'identifier des solutions d'adaptation des agro-systèmes à ces contextes divers, actuels et futurs. Les exemples donnés dans ce chapitre soutiennent que la mobilisation de l'agrobiodiversité est un levier incontournable pour la conception de solutions d'adaptation au changement climatique diversifiées et durables (figure 21.2). Toutefois, il met en avant la nécessité de combiner des approches permettant de meilleures caractérisation et prise en compte de la variabilité des contraintes (climatiques, agroécologiques et sociétales) et une mobilisation accrue de la diversité génétique et adaptative présente au sein et entre les espèces cultivées ou sauvages.

7. <https://report.ipcc.ch/ar6syr/index.html>.

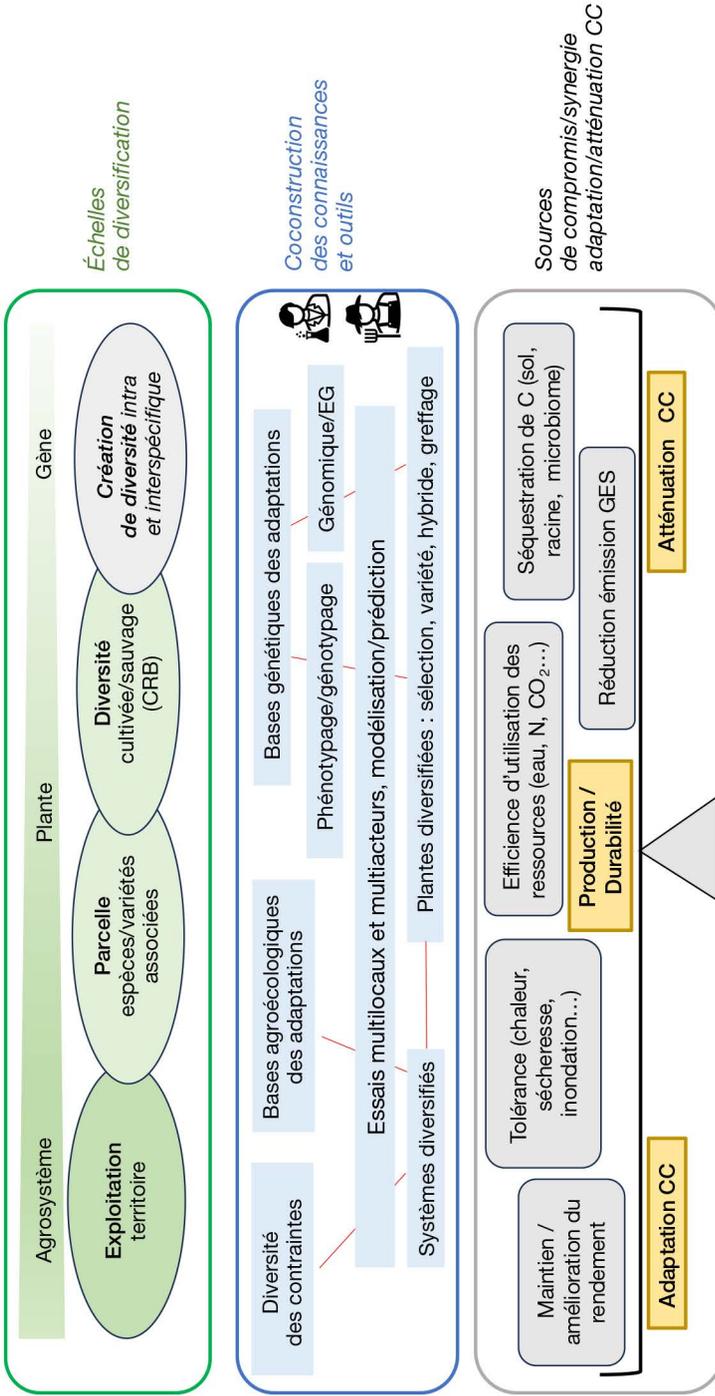


Figure 21.2. Valorisation de la biodiversité par des approches interdisciplinaires et multiacteurs, pour l'adaptation durable des systèmes de culture au changement climatique et pour son atténuation.
EG : édition du génome.

3.1. Privilégier des systèmes de culture mobilisant la diversité intra et interspécifique

Les travaux en cours pour accélérer la compréhension de ces systèmes et leur déploiement à plus grande échelle mettent en exergue le potentiel d'approches combinant les expérimentations multisites et multiacteurs, et la modélisation des systèmes de culture pour leur analyse et pour la prédiction de leurs performances (Gaudio *et al.*, 2022). En ce sens, les dispositifs *in situ* et à long terme du Cirad et de ses partenaires représentent une plus-value remarquable — comme le DP Agroforesta⁸, l'observatoire de Niakhar (Delaunay *et al.*, 2018). Elles doivent en complément s'appuyer sur des expérimentations en conditions plus contrôlées, permettant par exemple la compréhension écophysiological de l'adaptation aux changements climatiques — Abiophen⁹ et M3P (Welcker *et al.*, 2015). Un effort devra également être fourni pour mieux connaître la capacité des agrosystèmes à séquestrer le carbone et à maintenir la fertilité des sols (projet Bolero¹⁰), ainsi que le rôle des interactions plante-microbiome dans l'accès aux ressources du sol et à l'eau.

3.2. Des programmes de sélection basés sur des approches multicritères et multiacteurs

3.2.1. Vers des données de plus en plus massives et multiéchelles

Ce chapitre met en évidence que, afin de valoriser la diversité génétique des plantes cultivées ou sauvages apparentées pour l'adaptation au changement climatique, les programmes de sélection doivent générer et manipuler des jeux de données de plus en plus massifs et multiéchelles : depuis des données biologiques (physiologiques, génétiques et autres « omiques ») caractérisant des sources d'adaptation parmi des milliers d'individus composant la diversité génétique d'une espèce cible, jusqu'aux données agroclimatiques et sociétales (enquêtes) acquises dans des essais multiloaux représentatifs des jeux de contraintes auxquels il s'agit d'adapter les plantes cultivées. L'analyse intégrée de ces données représente un défi numérique dorénavant au cœur des programmes de sélection variétale et des recherches en amont qu'ils nécessitent (voir paragraphe 2.1). Des approches d'analyse de données et de modélisation (mécanistique statistique, apprentissage par les données) existent pour cela, mais doivent être optimisées et mieux mises en complémentarité pour : (1) comprendre les systèmes biologiques complexes à améliorer (Luquet *et al.*, 2016), (2) développer des « proxies » (par exemple l'utilisation de la NIRS, la spectroscopie dans l'infrarouge proche, ou de l'imagerie) permettant le phénotypage à haut débit de caractères physiologiques d'intérêt adaptatif plus compliqués à mesurer (Gano *et al.*, 2021), (3) prédire les interactions $G \times E$ et des idéotypes variétaux (prédiction génomique et phénomique) (Tong et Nikoloski, 2021), et (4) évaluer la valeur ajoutée dans des contextes agroclimatiques variés et futurs (Parent *et al.*, 2018). Le recours à l'intelligence artificielle devient incontournable dans ce contexte. Si ce type d'approche monte en puissance en soutien aux programmes de sélection pour des contextes de culture intensifiés, ce chapitre met en avant les efforts en cours pour en faire bénéficier les agrosystèmes diversifiés tropicaux.

8. <https://www.cirad.fr/dans-le-monde/dispositifs-en-partenariat/agroforesta>.

9. <https://www.cirad.fr/collaborer-avec-nous/science-ouverte/infrastructures-ouvertes-du-cirad/abiophen-et-serres-experimentales>.

10. <https://www.bolero-project.eu>.

3.2.2. Vers la prise en compte de nouveaux caractères d'intérêt pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique dans les programmes de sélection

Une part importante des interactions $G \times E$ expliquant l'adaptation des plantes aux conditions climatiques se joue au niveau du sol, entre le système racinaire, les ressources et le microbiome. Une petite fraction des microbes présents dans la rhizosphère peut être bénéfique pour la plante hôte, induisant des modifications morphologiques et physiologiques bénéfiques du système racinaire (Gonin *et al.*, 2023). Ces interactions entre les racines et le microbiote associé peuvent contribuer efficacement à une tolérance aux stress abiotiques (par exemple un enracinement plus profond, une meilleure absorption des nutriments ou de l'eau, etc.), notamment à la sécheresse, mais aussi à une augmentation de la séquestration de carbone dans le sol (De Vries *et al.*, 2020). Promouvoir la croissance de ces microbes bénéfiques grâce à des stratégies ciblées peut améliorer la santé et la productivité des cultures dans une approche biologique. Les travaux dans ce domaine sont rares et récents.

L'enjeu d'atténuer le changement climatique impose également de s'adresser à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et à la séquestration de carbone par les systèmes agricoles. Cet enjeu est global (voir paragraphe 2), mais concerne en particulier la riziculture inondée, à l'origine d'émissions importantes de méthane affectant l'environnement. La potentialité de mobiliser la diversité génétique du riz pour créer des variétés émettant moins de méthane en conditions inondées ou, surtout, à même de produire en condition d'aérobie à des niveaux de rendement se rapprochant des conditions inondées (Saito *et al.*, 2018) a été mise en avant dans ce chapitre. Au-delà de ces résultats, des travaux récents ont montré l'existence de diversité génétique chez le riz dans sa capacité à assimiler le CO_2 atmosphérique *via* la photosynthèse et à augmenter ainsi la production, mais aussi l'accumulation de carbone dans la plante, y compris au niveau racinaire. Ces résultats originaux ouvrent la voie à leur valorisation en sélection variétale, à la fois en matière d'adaptation et d'atténuation du changement climatique (Dingkuhn *et al.*, 2020).

3.2.3. Des nouveaux enjeux pour le greffage

Fort de l'expérience des agrumes, on peut imaginer l'utilisation d'espèces sauvages chez les plantes pérennes, combinée à la technique de greffage, comme solution rapide pour pallier les effets du changement climatique. Le genre *Coffea* ne compte pas moins de 130 espèces originaires d'Afrique de l'Ouest et centrale, dont une grande partie est conservée dans des jardins botaniques ou des centres de ressources biologiques (CRB à La Réunion, collection internationale du CATIE au Costa Rica, CRB en Guyane française). Cette diversité est actuellement explorée pour identifier des espèces plus tolérantes à la chaleur et à la sécheresse et pour les tester comme géniteurs d'hybrides ou comme porte-greffes pour maintenir la production d'arabica et de robusta (projet Bolero¹⁰).

3.3. Rôle des nouvelles biotechnologies

Bien qu'un grand nombre de gènes candidats pour améliorer l'adaptation à des stress biotiques et/ou abiotiques ait été identifié et séquencé grâce à une connaissance approfondie de la diversité génétique chez la plupart des espèces cultivées annuelles et pérennes, leur valorisation par édition du génome (avec l'outil CRISPR-Cas9 entre autres techniques) n'est encore qu'à son balbutiement. Les premières plantes éditées

proposées à la commercialisation sont modifiées pour des caractères simples, comme la qualité et la résistance aux stress biotiques (Pixley *et al.*, 2022). Chez le caféier, comme pour la plupart des arbres fruitiers tropicaux où les communautés scientifiques sont restreintes et où l'industrie semencière est absente, ces innovations destinées aux programmes de sélection se font essentiellement à l'occasion de projets rassemblant les centres de recherche, les universités, les partenaires industriels et les agriculteurs. C'est le cas de l'initiative Jardins du PEPR SVA¹¹ qui propose d'étudier la potentielle contribution de l'agrobiodiversité en zone tropicale et tempérée aux performances agronomiques, socio-économiques et écologiques des systèmes vergers-maraîchers. Ces systèmes, graduellement abandonnés au fil des siècles, demeurent toutefois bien présents dans les zones tropicales, mais sont délaissés par l'agriculture intensive. L'initiative Jardins mettra à profit les outils d'édition du génome pour la conception d'idéotypes variétaux adaptés à ces systèmes dans le contexte du changement climatique et mobilisant la diversité génétique au sein des espèces en interaction.

Chez les céréales, l'effort est plus important et continu, grâce à une grande communauté de chercheurs, une industrie semencière puissante et des centres internationaux consacrés à ces plantes (CGIAR¹²). Si l'on ajoute à cela le bénéfice d'un temps de génération court, on peut s'attendre dans les prochaines années à une arrivée sur le marché de variétés plus résilientes au changement climatique, génétiquement éditées. Des travaux de plus en plus nombreux mobilisant cette technique permettent déjà d'identifier de nouveaux gènes d'intérêt pour l'adaptation et l'atténuation, en vue de leur intégration dans les programmes de sélection (comme le projet Greener¹³ pour des gènes d'adaptation du riz aux conditions d'aérobie).

Si la montée en puissance des nouvelles technologies pour l'édition du génome est indéniable, sa mise en pratique reste moindre sur les plantes tropicales des agricultures des pays du Sud. Pour pallier cet écart, les partenaires de la recherche à Montpellier (Cirad, IRD, INRAE, université de Montpellier) mettent en place une infrastructure mutualisée spécialisée dans l'édition des génomes des plantes tropicales et méditerranéennes (Editrop, projet PEPR SVA).

3.4. Rôle des centres de ressources biologiques

Les CRB, notamment ceux consacrés aux plantes méditerranéennes et tropicales, ont et auront un rôle majeur à jouer dans le contexte du changement climatique. La diversité génétique qu'ils contiennent offre une source d'adaptation unique à la variabilité des contraintes agroclimatiques actuelles et futures. Il s'agit de la préserver et d'en accélérer la caractérisation pour sa valorisation dans les programmes de sélection. En ce sens, les CRB se doivent de jouer de plus en plus le rôle de plateformes d'interactions entre la recherche, la sélection variétale et les acteurs des filières agricoles au Nord comme au Sud. Dans ce contexte, les échanges de ressources génétiques se font dans le plus strict respect des accords de Nagoya (2010) destinés à mieux protéger les espèces et les écosystèmes de la planète et à en partager plus équitablement les bénéfices.

11. PEPR SVA : Sélection végétale avancée face au défi climatique. Les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) constituent le volet amont/recherche des stratégies de France 2030. <https://www.pepr-selection-vegetale.fr>.

12. CGIAR : Consultative Group on International Agricultural Research.

13. <https://umr-agap.cirad.fr/recherches/projets-de-recherche/greener>.

4. Références bibliographiques

- Alves G.S.C., Torres L.F., Déchamp E., Breidler J.-C., Joët T., Gatineau F., *et al.*, 2017. Differential fine-tuning of gene expression regulation in coffee leaves by CcDREB1D promoter haplotypes under water deficit. *J. Exp. Bot.* 68, 3017-3031. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx166>
- Benitez-Alfonso Y., Soanes B.K., Zimba S., Sinanaj B., German L., Sharma V., *et al.*, 2023. Enhancing climate change resilience in agricultural crops. *Curr. Biol.* 33, R1246-R1261. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.10.028>
- Bowman K.D., Joubert J., 2020. "Citrus Rootstocks," in *The Genus Citrus*, Elsevier, 105-127.
- Bravo-Peña F., Yoder L., 2024. Agrobiodiversity and smallholder resilience: A scoping review. *J. Environ. Manage.* 351, 119882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119882>
- Breitler J.-C., Etienne H., Lérant S., Marie L., Bertrand B., 2022. Description of an Arabica Coffee Ideotype for Agroforestry Cropping Systems: A Guideline for Breeding More Resilient New Varieties. *Plants*, 11, 2133. <https://doi.org/10.3390/plants11162133>
- Chatel M., Ospina Rey Y., Rodriguez F., Lozano V.H., Delgado H., 2008. Upland rice composite population breeding and selection of promising lines for Colombian savannah ecosystem. CGIAR database Resource.
- Clerget B., Sidibe M., Bueno C.S., Grenier C., Kawakata T., Domingo A.J., *et al.*, 2021. Crop photoperiodism model 2.0 for the flowering time of sorghum and rice that includes daily changes in sunrise and sunset times and temperature acclimation. *Ann. Bot.* 128, 97-113. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab048>
- Delaunay V., Desclaux A., Sokhna C. (éd.), 2018. Niakhar, mémoires et perspectives. Recherches pluridisciplinaires sur le changement en Afrique. Marseille et Dakar, Éditions de l'IRD et L'Harmattan Sénégal, 535 p.
- De Vries F.T., Griffiths R.I., Knight C.G., Nicolitch O., Williams A., 2020. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, 368, 270-274. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>
- Dingkuhn M., Luquet D., Fabre D., Muller B., Yin X., Paul M.J., 2020. The case for improving crop carbon sink strength or plasticity for a CO₂-rich future. *Curr. Opin. Plant Biol.* 56, 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.05.012>
- Ganeme A., Kondombo C.P., Raboin L.-M., Dusserre J., Kabore R., Adam M., *et al.*, 2022. Characterizing sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) varieties diversity to identify those with contrasting traits of interest for intercropping systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. *Plant Genet. Resour. Charact. Util.* 20, 87-97. <https://doi.org/10.1017/S1479262122000168>
- Gano B., Dembele J.S.B., Tovignan T.K., Sine B., Vadez V., Diouf D., *et al.*, 2021. Adaptation Responses to Early Drought Stress of West Africa Sorghum Varieties. *Agronomy*, 11, 443. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030443>
- Gaudio N., Louarn G., Barillot R., Meunier C., Vezy R., Launay M., 2022. Exploring complementarities between modelling approaches that enable upscaling from plant community functioning to ecosystem services as a way to support agroecological transition. *Silico Plants*, 4, diab037. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab037>
- Girardi E.A., Ayres A.J., Giroto L.F., Peña L., 2021. Tree Growth and Production of Rainfed Valencia Sweet Orange Grafted onto Trifoliolate Orange Hybrid Rootstocks under Aw Climate. *Agronomy*, 11, 2533. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122533>
- Gonin M., Salas-González I., Gopalchan D., Frene J.P., Roden S., Van De Poel B., *et al.*, 2023. Plant microbiota controls an alternative root branching regulatory mechanism in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 120, e2301054120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2301054120>
- Grenier C., Cao T.-V., Ospina Y., Quintero C., Châtel M.H., Tohme J., *et al.*, 2015. Accuracy of Genomic Selection in a Rice Synthetic Population Developed for Recurrent Selection Breeding. *PLOS ONE*, 10, e0136594. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136594>
- Guitton B., Théra K., Tékété M.L., Pot D., Kouressy M., Témé N., *et al.*, 2018. Integrating genetic analysis and crop modeling: A major QTL can finely adjust photoperiod-sensitive sorghum flowering. *Field Crops Res.* 221, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.007>

- Haggar J., Barrios M., Bolaños M., Merlo M., Moraga P., Munguia R., *et al.*, 2011. Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agrofor. Syst.* 82, 285-301. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9392-5>
- Heming N.M., Schroth G., Talora D.C., Faria D., 2022. Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00780-w>
- Levard L. (coord.), 2023. *Guide pour l'évaluation de l'agroécologie. Méthode pour apprécier ses effets et les conditions de son développement.* Éditions du Gret, éditions Quæ, 320 p.
- Luquet D., Rebolledo C., Rouan L., Soulie J.-C., Dingkuhn M., 2016. Heuristic Exploration of Theoretical Margins for Improving Adaptation of Rice through Crop-Model Assisted Phenotyping. In: Yin X., Struik P.C. (eds), *Crop Systems Biology*, Springer International Publishing, 105-127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20562-5_5
- Nerva L., Sandrini M., Moffa L., Velasco R., Balestrini R., Chitarra W., 2022. Breeding toward improved ecological plant-microbiome interactions. *Trends Plant Sci.* 27, 1134-1143. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.06.004>
- Parent B., Leclere M., Lacube S., Semenov M.A., Welcker C., Martre P., *et al.*, 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 10642-10647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>
- Pixley K.V., Cairns J.E., Lopez-Ridaura S., Ojiewo C.O., Dawud M.A., Drabo I., *et al.*, 2023. Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. *Mol. Plant*, 16, 1590-1611. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>
- Pixley K.V., Falck-Zepeda J.B., Paarlberg R.L., Phillips P.W.B., Slamet-Loedin I.H., Dhugga K.S., *et al.*, 2022. Genome-edited crops for improved food security of smallholder farmers. *Nat. Genet.* 54, 364-367. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01046-7>
- Raboin L.-M., Batiemo B.J., Gozé E., Douzet J.-M., Poda L., Koala W.A., *et al.*, 2023. Le haricot mungo, *Vigna radiata* (L.), une alternative à l'association sorgho-niébé pour la diversification des cultures en conditions soudano-sahéliennes? *Cah. Agric.* 32, 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2023019>
- Rahn E., Vaast P., Läderach P., van Asten P., Jassogne L., Ghazoul J., 2018. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>
- Rajendran S., Park H., Kim J., Park S.J., Shin D., Lee J.-H., *et al.*, 2024. Methane Emission from Rice Fields: Necessity for Molecular Approach for Mitigation. *Rice Sci.* 31, 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.10.003>
- Rebolledo M.C., Ranaivoson L., Falconnier G., Adam M., Ibrahim A., Mallikarjuna S., *et al.*, 2023. Global Rice Field laboratory to understand rice response to climate variability. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10399125>
- Rigal C., Wagner S., Nguyen M.P., Jassogne L., Vaast P., 2022. ShadeTreeAdvice methodology: Guiding tree-species selection using local knowledge. *People Nat.* 4, 1233-1248. <https://doi.org/10.1002/pan3.10374>
- Saito K., Asai H., Zhao D., Laborte A.G., Grenier C., 2018. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. *Plant Prod. Sci.* 21, 145-158. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1459751>
- Saj S., Jagoret P., Ngnogue H.T., Tixier P., 2023. Effect of neighbouring perennials on cocoa tree pod production in complex agroforestry systems in Cameroon. *Eur. J. Agron.* 146, 126810. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126810>
- Santana-Vieira D.D.S., Freschi L., Almeida L.A.D.H., Moraes D.H.S.D., Neves D.M., Santos L.M.D., *et al.*, 2016. Survival strategies of citrus rootstocks subjected to drought. *Sci. Rep.* 6, 38775. <https://doi.org/10.1038/srep38775>
- Sarzynski T., Vaast P., Rigal C., Marraccini P., Delahaie B., Georget F., *et al.*, 2024. Contrasted agronomical and physiological responses of five *Coffea arabica* genotypes under soil water deficit in field conditions. *Front. Plant Sci.* 15, 1443900. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443900>

Steiger L., Nagai C., Moore H., Morden W., Osgood V., Ming R., 2002. AFLP analysis of genetic diversity within and among *Coffea arabica* cultivars. *TAG Theor. Appl. Genet.* 105, 209-215. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0939-8>

Tong H., Nikoloski Z., 2021. Machine learning approaches for crop improvement: Leveraging phenotypic and genotypic big data. *J. Plant Physiol.* 257, 153354. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153354>

Turreira-García N., 2022. Farmers' perceptions and adoption of *Coffea arabica* F1 hybrids in Central America. *World Dev. Sustain.* 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2022.100007>

Vadez V., Deshpande S.P., Kholova J., Hammer G.L., Borrell A.K., Talwar H.S., *et al.*, 2011. Stay-green quantitative trait loci's effects on water extraction, transpiration efficiency and seed yield depend on recipient parent background. *Funct. Plant Biol.* 38, 553. <https://doi.org/10.1071/FP11073>

Vom Brocke K., Kondombo C.P., Guillet M., Kaboré R., Sidibé A., Temple L., *et al.*, 2020. Impact of participatory sorghum breeding in Burkina Faso. *Agric. Syst.* 180, 102775. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102775>

Welcker C., Cabrera Bosquet L., Grau A., Tardieu F., Negre V., *et al.*, 2015. M3P: The "Montpellier Plant Phenotyping Platforms". EPPN Plant Phenotyping Symposium, Barcelona, Spain.

Wu G.A., Terol J., Ibanez V., López-García A., Pérez-Román E., Borredá C., *et al.*, 2018. Genomics of the origin and evolution of Citrus. *Nature*, 554, 311-316. <https://doi.org/10.1038/nature25447>

Chapitre 22

Territorialiser la lutte contre le changement climatique

*Camille Jahel, Amandine Adamczewski, Jérémy Bourgoïn,
Guillaume Lestrelin, Ronan Mugelé, René Pocard Chapuis,
Fatma Rostom, Tiago Teixeira Da Silva Siqueira, Elodie Valette*

Le changement climatique est souvent présenté — notamment dans les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) — comme un « enjeu global » ou comme un « défi planétaire ». Certes, il affecte l'ensemble du système Terre et des sociétés du globe. Néanmoins, aux yeux de ces sociétés, les changements climatiques sont pluriels ; ils s'appréhendent avant tout, dans leurs causes autant que dans leurs conséquences, à travers les territoires dans lesquels elles évoluent. Le territoire peut être appréhendé comme un espace approprié (dans le sens de propriété et d'identité) et gouverné par un groupe humain organisé. L'approche territoriale du changement climatique permet d'insister sur le fait que les changements socio-environnementaux sont avant tout éprouvés par des sociétés qui vivent « ici et maintenant ». Elle consiste à ancrer et à décliner le changement global dans les espaces-temps qui sont ceux des sociétés, des Nords aux Suds, des villes aux campagnes, selon des contextes politiques, sociaux, écologiques, économiques différents (Le Treut, 2022).

Il est ainsi reconnu que les impacts du changement climatique sont très variables et variés d'un territoire à un autre, qu'il s'agisse des transformations biophysiques (par exemple les records pluviométriques ou les sécheresses) ce qui accroît l'exposition différenciée à des risques, ou des réponses des sociétés locales compte tenu de leur histoire, de leurs attentes, de leur savoir-faire ou de leurs luttes politiques. Autant de facteurs qui contribuent aussi à localiser ou à spécifier les manières de se rapporter à la problématique du changement climatique selon des considérations très diverses.

Parce que les territoires dessinent et rendent visibles les liens organiques entre les sociétés et les changements climatiques, ils sont des espaces clés pour réfléchir et pour implémenter les actions d'adaptation et d'atténuation pertinentes. Là encore, la variabilité est grande entre les territoires, en raison de la diversité des ressources dont ils disposent, l'histoire, le capital social, l'accès à l'information et les moyens d'action de leurs populations. À mi-chemin entre le « trop macro » pour intégrer les spécificités et le « trop local » aux impacts limités, les approches territoriales proposent un cadre pour collectivement penser, s'organiser et développer des solutions d'atténuation et d'adaptation contextualisées. L'objectif de ce chapitre est de montrer en quoi et comment le territoire, comme concept, comme lieu où s'éprouvent les changements biophysiques, comme entité sociale et arène, peut être mobilisé pour faire face au changement climatique.

1. Le territoire, arène de concertation et de négociation collective

En raison de leur envergure et de leur intensité croissantes, les inondations, les mégafeux, les ouragans, les tempêtes, les sécheresses rendent impuissantes les initiatives d'adaptation individuelles ou isolées. Ces événements d'origine climatique renvoient à des engagements collectifs d'ampleur. Cela implique la coordination et la collaboration d'une diversité d'acteurs, parfois aux intérêts divergents, en situation d'asymétrie de pouvoir et d'incomplétude de connaissances. L'entrée par le territoire favorise les coalitions d'acteurs, par le partage d'une identité commune, fruit de l'histoire, du vécu, des repères sur un même espace. Face au changement climatique, les habitants d'un territoire partagent aussi les mêmes menaces, les mêmes incertitudes, bien que leurs vulnérabilités et leurs capacités d'adaptation soient différentes. Penser le changement climatique par le territoire suppose de faire de cette menace le moteur d'une action collective, de la transformer en une aspiration commune, en évitant qu'au contraire elle ne vienne conforter les clivages et les replis claniques.

Les approches territoriales proposent ainsi un cadre opérationnel multiéchelle, à visée transformative, et fondé sur les principes d'équité, de participation, d'inclusion et de responsabilisation. Il s'agit de faire du territoire un espace de négociation, une arène de construction de compromis et d'idées pour s'adapter et pour atténuer le changement climatique. Les dispositifs territoriaux peuvent prendre des formes variées d'observatoires, de laboratoires vivants (encadré 22.1), de tiers-lieux, de plateformes de débat citoyen, etc. Il s'agit d'arènes dans lesquelles les acteurs du territoire se mobilisent pour faire émerger des actions d'adaptation et d'atténuation.

2. Vers des initiatives multisectorielles et basées sur les complémentarités spatiales

De cette intelligence territoriale doivent émerger des initiatives contextualisées pour l'adaptation et l'atténuation des effets locaux du changement climatique, comme des idées d'expérimentations, de nouvelles synergies, solidarités et formes de gouvernance. Du fait de la diversité de compétences et de savoirs réunis, les dispositifs territoriaux s'efforcent de sortir des approches en silo pour proposer une approche multisectorielle des problèmes. La spatialisation des problèmes et des solutions constitue l'un des éléments structurants de ces dispositifs : les liens entre réalités biophysiques et sociales sont ancrés dans l'espace géographique. Les actions d'adaptation ou d'atténuation climatique s'appuient ainsi sur une conception systémique du territoire, qui valorise les synergies et les interactions entre les différents composants du système territorial.

La gestion des risques d'inondation, accrus sous les effets du changement climatique, est intéressante à ce titre. L'inondation résulte certes d'un aléa météorologique, mais aussi d'une vulnérabilité construite au cours du temps au sein des territoires. En Amazonie orientale brésilienne, la plupart des bassins-versants sont affectés par la déforestation et par des pratiques agricoles qui protègent mal le sol contre l'érosion, depuis cinq à dix décennies. D'année en année, l'action des pluies érosives ensable le réseau de drainage hydrographique. Quand survient un épisode pluviométrique d'intensité exceptionnelle, comme lors des épisodes La Niña, les flux ne sont plus absorbés ni par la végétation forestière, qui a disparu, ni par les sols, imperméabilisés, ni par le lit des cours d'eau, ensablés. C'est donc une inondation qui se produit, et qui

Encadré 22.1. Retour d'expérience 1. Construction de living labs au Sénégal

Le concept de *living lab*, relativement nouveau, admet différentes définitions qui toutes convergent vers l'idée de dispositifs ancrés dans une dynamique sociale et locale particulière, où citoyens, habitants, usagers sont considérés comme des acteurs clés de processus de recherche et d'innovation. Cette approche est censée stimuler les collaborations entre des profils hétérogènes de personnes dans le but de développer des découvertes inattendues (Romero Herrera, 2017).

Autour du lac de Guiers au Sénégal, deux *living labs* ont récemment vu le jour. Ils s'inscrivent dans un contexte de raréfaction des ressources en terre et en eau accentuée par le changement climatique et engendrant des tensions sociales et spatiales entre différentes catégories d'acteurs. L'ambition des *living labs* est d'améliorer la santé des humains, des systèmes de production agricole et de l'environnement, puis d'affecter positivement les moyens d'existence des populations des territoires. Ancrés dans les dispositifs locaux de gestion territoriale (mairie), les deux *living labs* associent les acteurs locaux (agriculteurs, éleveurs, pêcheurs, élus, entrepreneurs) aux scientifiques qui accompagneront les expérimentations. Après une phase de diagnostic territorial, les acteurs ont choisi de donner la priorité à certaines expérimentations. Pour cela, deux forums, un par *living lab*, regroupant l'ensemble des usagers et des scientifiques, ont été constitués et pensés comme des arènes de dialogue permettant de valider collectivement les choix. Ensuite, les communautés d'acteurs, usagers et scientifiques, s'organisent autour de l'expérimentation. Ce processus de validation territoriale, à l'échelle du *living lab*, par le biais du forum, permet d'engager la communauté dans des actions préalablement mises au débat. Cet outil de gouvernance, basé sur le débat avec la diversité des usagers du territoire, permet de constituer des collectifs en mesure de s'organiser, valider, choisir et tester ensuite. Il s'agit d'anticiper les adaptations nécessaires que la communauté *living lab* devra être capable de mettre en place, au-delà du temps de projet.

peut être dramatique comme à Paragominas en 2018, cette ville étant construite au milieu d'une plaine alluviale. Cet événement a mobilisé les pouvoirs publics, et un plan de paiement pour services environnementaux a depuis été mis en place. Tous les agriculteurs du bassin-versant reçoivent un montant incitatif, prélevé sur les factures de chaque habitation connectée au réseau urbain d'adduction en eau potable. La condition pour l'agriculteur est qu'il suive le plan d'usage des sols défini par les pouvoirs publics, après une large concertation. Ce plan prévoit (1) des aménagements et des pratiques agricoles antiérosives dans les zones identifiées comme aptes à l'agriculture, (2) des pratiques de restauration forestière dans les zones identifiées comme cruciales pour le cycle de l'eau. L'ensemble repose donc sur une cartographie des aptitudes du sol, c'est-à-dire un zonage précis et sanctionné par une loi municipale définissant les règles d'usage pour chaque zone. Cette réorganisation des paysages mixtes, composés de forêts et de terrains agricoles, devrait permettre de désensabler les cours d'eau, réduire les risques d'inondations et améliorer la qualité des eaux du rio Uraim, diminuant ainsi les coûts de leur traitement pour approvisionner le réseau potable. Cette économie permettrait alors d'augmenter les incitations aux agriculteurs.

Un autre exemple illustratif d'initiatives territoriales d'adaptation au changement climatique est la transformation des systèmes agri-alimentaires territoriaux. Ces derniers sont définis comme « l'ensemble des acteurs, réseaux, dispositifs, qui à l'échelle du territoire contribuent à orienter la manière dont on produit et on consomme. Ils incluent

donc au-delà des maillons de la production, collecte, transformation, et distribution — qui correspondent au système agro-alimentaire dans sa définition économique — les consommateurs, la société civile, le conseil agricole ou développement rural, et les collectivités territoriales et institutions publiques » (Lamine *et al.*, 2022). Les systèmes agri-alimentaires ont un rôle pivot dans le changement climatique, en étant en même temps des émetteurs majeurs de gaz à effet de serre et particulièrement vulnérables, et avec un potentiel d'atténuation et d'adaptation important. Ainsi, une reconfiguration des systèmes agri-alimentaires à l'échelle des territoires peut permettre de repenser la production, la circulation des produits, les habitudes alimentaires et le traitement des déchets, constituant une rupture possible avec un modèle industriel mondialisé. La mise en place de circuits courts alimentaires, par exemple, peut contribuer à « reformuler les liens marchands dans le sens d'une coopération accrue non seulement entre producteurs, mais aussi entre producteurs et consommateurs, entre consommateurs, entre acteurs d'un même territoire ou d'une même région » (Chiffolleau et Prevost, 2012). L'encadré 22.2 présente un cas d'étude de reconfiguration d'une filière agricole pour s'adapter aux impacts du changement climatique en territoires méditerranéens.

Encadré 22.2. Retour d'expérience 2. Des initiatives territorialisées face au changement climatique en zone méditerranéenne : le cas de la pistache en Provence

Certaines productions agricoles des zones méditerranéennes sont fortement affectées par les sécheresses récurrentes et l'augmentation globale de la température (Ivits *et al.*, 2012). Des initiatives territorialisées appuyées sur une production agricole et des filières plus résilientes émergent pour faire face à ces impacts, comme pour la filière pistache dans le Vaucluse. Autrefois très présent dans la zone, le pistachier est redevenu à l'état sauvage. S'appuyant sur son importante rusticité (résistance aux sécheresses et aux températures extrêmes), son historique de présence et son adaptation au territoire méditerranéen, certaines filières de qualité semblent réémerger grâce à un travail collectif des acteurs locaux (Debolini et Siqueira, 2021).

Les premières réflexions et études ont démarré en 2016 par certains précurseurs locaux. Ils ont réalisé des voyages dans les zones productrices de pistaches et des études des archives départementales. Ces éléments ont permis d'asseoir les premières bases de la faisabilité d'une future filière. En 2018, des acteurs de la société civile, des agriculteurs et des transformateurs se sont réunis pour la création d'une association loi 1901, appelée Pistache en Provence. Puis, en parallèle, certains agriculteurs pionniers ont planté les premières plantes malgré le constat d'un manque de pépinières locales pour leur approvisionnement. À partir de 2018 et 2019, pour donner suite à la sollicitation de plusieurs agriculteurs locaux, la chambre d'agriculture du Vaucluse a commencé à réaliser des études techniques et agronomiques pour faciliter l'implantation de la plante localement. Elle a aussi proposé un accompagnement technique aux agriculteurs intéressés. Un premier projet Feader a permis de fédérer des acteurs locaux du conseil agricole, de la recherche technique et scientifique et des agriculteurs. En 2021, les agriculteurs se sont organisés autour d'un syndicat pour construire un projet de structuration de la filière avec des acteurs locaux de la transformation. Actuellement, plus de 400 ha ont été plantés, ils structurent une démarche de reconnaissance de la pistache de Provence sous un signe d'identification de la qualité et de l'origine — SIQO*.

* https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/chambres_d%27agriculture_294233.

Enfin, parce qu'elles impliquent une concertation multiacteur, les approches territoriales permettent aussi d'améliorer le succès de certaines initiatives de diminution des émissions de GES. C'est le cas par exemple des stratégies de transition énergétique vers des sources d'énergie moins émettrices, comme le solaire ou l'éolien. Il est montré que des projets déconnectés des contextes socio-économiques et environnementaux locaux peuvent générer des impacts non désirés par les acteurs locaux, que ce soit sur les paysages, les écosystèmes, la structure de l'emploi, l'accès à l'énergie mais aussi sur les problématiques foncières, menant à de vifs mouvements locaux d'opposition (Siamanta et Dunlap, 2019) (voir chapitre 19). L'acceptabilité de l'installation d'infrastructures d'énergies renouvelables ne dépend donc pas uniquement du syndrome *not in my backyard* (« surtout pas chez moi »), contesté empiriquement et réduisant péjorativement les arguments d'opposition à ces infrastructures. La manière dont les projets sont implémentés est un facteur crucial jouant sur cette acceptabilité, en particulier, la gouvernance et la participation financière de citoyens et de communautés locales à de tels projets (Mussal et Kuik, 2011). Or, il est montré que la participation dépend du niveau de confiance entre les citoyens et du partage d'une identité locale (Kalkbrenner et Rossen, 2015), deux leviers au cœur des approches territoriales.

3. Les approches territoriales pour une justice climatique

L'importance de l'acceptation des initiatives d'atténuation et d'adaptation au changement climatique par les habitants d'un territoire amène à interroger le concept de justice climatique. Les solutions d'atténuation et d'adaptation sont plus facilement acceptées et adoptées si elles sont justes (Newell *et al.*, 2021). Or, si la justice est de plus en plus mobilisée aux échelles nationales ou internationales (Gupta *et al.*, 2023), notamment sur les questions d'inégalités nord-sud face au changement climatique, l'application de ces notions reste rare à l'échelle locale (Tsayem Demaze et Philippe, 2022), au mieux, cantonnée à des territoires urbains (Bulkeley *et al.*, 2014).

La justice climatique fait référence à une approche éthique traduite en un cadre d'analyse juridique multidimensionnel qui vise à favoriser l'équité dans les réponses aux défis du changement climatique (Schlosberg et Collins, 2014). Pour ce faire, elle pose comme fondamentaux les principes suivants :

- équité sociale : s'assurer que les populations les plus vulnérables et marginalisées ne supportent pas de manière disproportionnée les conséquences du changement climatique et qu'elles bénéficient également des solutions ;
- équité environnementale : éviter la concentration des effets néfastes du changement climatique dans certaines régions et garantir un accès équitable des populations aux ressources naturelles ;
- responsabilité : reconnaître les responsabilités différenciées (des pays, des groupes sociaux, etc.) dans la contribution aux émissions de gaz à effet de serre, dans l'atténuation des impacts du changement climatique, et les stratégies d'adaptation développées ;
- participation et inclusion : impliquer une large diversité de parties prenantes dans les processus décisionnels liés au climat, en mettant l'accent sur la représentation des populations affectées ;
- solutions justes : développer des politiques et des mesures d'atténuation et d'adaptation qui prennent en compte les besoins et les réalités diverses des populations et qui tentent de réduire les inégalités existantes.

Au travers de ces enjeux distributifs, procéduraux et de reconnaissance, la justice climatique met l'accent sur les relations, institutions et structures sociales qui sont à la fois à la source du changement climatique et qui participent à façonner les réponses à ce changement. En adoptant une perspective plus transformative, ce sont de fait des questions d'inégalités et de rapports de pouvoir qui sont au cœur des enjeux de justice climatique (Newel *et al.*, 2021).

Les approches territoriales suggèrent que l'hétérogénéité, les synergies et les complémentarités spatiales puissent constituer un point d'entrée pertinent pour répondre aux défis posés par le changement climatique grâce à des processus de concertation, de prise de décision et d'action collective (voir paragraphe 1). De fait, elles posent comme base de travail la question des inégalités inter et intraterritoriales — des inégalités en matière de dotation et d'accès aux biens et ressources, mais aussi en matière d'exposition aux risques, de capacité à s'adapter, de contribution aux problématiques environnementales, etc. (Chaumel et La Branche, 2008). En suscitant des interactions et des collaborations entre acteurs, en favorisant la participation et l'inclusion des populations locales dans la conception, la planification et la mise en œuvre des politiques, en générant des apprentissages collectifs, et en établissant de nouveaux modes de gouvernance, elles peuvent donc aussi contribuer à réduire les inégalités et à modifier les rapports de pouvoir qui gouvernent les territoires, dans le sens d'une justice climatique consolidée, comme illustrée dans l'encadré 22.3. Ce cas d'étude montre aussi les limites des approches territoriales, qui parfois échouent à atteindre les changements souhaités, notamment lorsqu'elles se heurtent à des verrouillages institutionnels aux échelles régionales ou nationales, par exemple des normes rigides et incompatibles avec le changement ou des structures de pouvoir centralisées, justifiant l'importance de développer des approches territoriales capables d'articuler les différentes échelles d'action.

Encadré 22.3. Retour d'expérience 3. Plateformes territoriales pour une justice climatique en Tunisie

Depuis 2018, le Programme d'adaptation au changement climatique des territoires ruraux vulnérables (PACTE) de Tunisie pilote la mise en place et l'animation de plateformes de planification territoriale dans six régions rurales. Ce dispositif de concertation multiacteur a pour objectifs de :

- contribuer à réduire les inégalités inter et intraterritoriales par le biais de la coconception de plans de développement intégrés et de la mise en œuvre d'investissements publics d'adaptation au changement climatique ciblant des zones rurales très marginales, historiquement délaissées par les politiques d'aménagement du territoire;
- modifier les rapports de pouvoir existants en établissant des instances de gouvernance locale pour le diagnostic territorial, la planification et le suivi-évaluation des investissements publics. Ces instances sont composées de représentants élus des différentes communautés locales, d'acteurs institutionnels et de la société civile. Elles sont mobilisées dans un processus de concertation outillé pour traiter des inégalités territoriales au sein même des régions d'intervention.

Le dispositif a généré une participation massive à l'échelle locale avec notamment 4300 participants directs au diagnostic et à la définition des enjeux de

développement prioritaires et 11 500 propositions d'actions collectées auprès des citoyens (Braiki *et al.*, 2022). Sur ces bases, des plans de développement ont été élaborés, tenant compte de l'hétérogénéité spatiale (en matière d'accès aux ressources naturelles, de main-d'œuvre, de foncier, etc.) et visant à réduire les inégalités territoriales.

Depuis 2023, ces plans guident des investissements publics dans de nombreux secteurs. Si des réseaux et des structures sociales propices à l'émancipation et à l'autonomisation de l'action collective ont également émergé de façon spontanée, les résultats intermédiaires restent cependant nuancés. Des normes technico-administratives ont par exemple contrarié l'ambition du programme de bénéficier aux communautés les plus marginales. Des rapports de pouvoir préexistants, entre notables locaux et simples citoyens, ont aussi été partiellement reproduits dans les nouvelles instances, générant de nouvelles inégalités distributives.

4. Les approches territoriales à l'intersection des échelles d'action

L'ambition de certaines initiatives territoriales pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique peut se heurter à des politiques publiques nationales et régionales sectorielles, si elles n'ont pas été pensées de manière articulée. Par exemple, pour le cas de la transformation des systèmes agri-alimentaires territoriaux présenté plus haut, les circuits courts peuvent avoir des impacts négatifs s'ils ont été conçus sans coordination ni articulation d'échelles. Il n'est ainsi pas automatique de diminuer significativement l'empreinte carbone du transport par les circuits courts s'il n'y a pas de logistique adaptée (Ademe, 2017). Les systèmes agri-alimentaires territoriaux et les innovations territoriales associées nécessitent donc des politiques publiques locales (encadré 22.4) et nationales spécifiques, soulignant la pertinence d'approches territoriales articulées aux autres échelles. La conception de nouveaux mécanismes de gouvernance multiniveaux, intégrant les interdépendances entre les différentes échelles d'action, et de nouvelles pratiques institutionnelles est nécessaire pour envisager des approches territoriales intégrées.

Dans la pratique, les initiatives de développement territorial doivent souvent s'accommoder du cadre institutionnel en place, en plaidant pour une perméabilité accrue des frontières institutionnelles et sectorielles (Rhodes, 1996) dans le cadre des projets. À l'inverse, lorsqu'une expérience territoriale réussie a démontré la pertinence de remodeler le cadre institutionnel (encadré 22.4), il est parfois difficile que cette expérience concluante s'applique aux spécificités des autres territoires d'un pays. Il est peu probable que les « impacts à grande échelle » recherchés par les agences de développement pour relever les défis de l'agenda 2030 résultent de la réplique de réussites locales (Caron *et al.*, 2017). Les expériences réussies ici sont rarement reproductibles et extrapolables ailleurs, en raison de leurs spécificités, du volume de ressources à investir et de la nécessité d'agir à différentes échelles pour induire des changements. Le changement d'échelle implique un processus plus complexe que la simple diffusion ou propagation d'un produit ou d'un modèle (Moore *et al.*, 2015). La Tunisie nous donne un exemple de construction de cadre institutionnel à l'échelle nationale, qui tient compte des spécificités territoriales. Après plusieurs années d'expérimentations, le ministère tunisien de l'Agriculture a développé en 2016 une approche innovante pour la mise en œuvre de sa nouvelle stratégie de conservation des eaux et

Encadré 22.4. Retour d'expérience 4. Paragoclima, ou l'engagement d'un territoire amazonien dans une trajectoire de développement bas-carbone

L'Amazonie est gravement confrontée aux effets du changement climatique : incendies, sécheresses et inondations ravagent la région avec une inquiétante fréquence. Mais l'Amazonie est aussi internationalement responsabilisée, « climaticide » à cause des déforestations massives qui affectent le climat global. Ce double statut de victime et de bourreau du climat expose l'Amazonie à un risque territorial majeur, d'où la nécessité d'une réponse territorialisée.

Paragominas est connue comme la première commune amazonienne à avoir vaincu le spectre de la déforestation illégale, il y a quinze ans. Début 2023, elle a centré sa nouvelle stratégie de développement, appelée Paragoclima*, sur les vertus exceptionnelles du climat amazonien, pour transformer du carbone atmosphérique en biomasses d'intérêt agricole et forestier. Chaleur, pluviométrie et rayonnement solaire accélèrent naturellement le métabolisme des organismes végétaux et animaux qui, s'ils sont gérés dans un cadre de bonnes pratiques agricoles, restaurent la fertilité de sols, décuplent la productivité des plantations, pâturages, forêts et agroforêts. Ces bonnes pratiques sont économes en intrants, en investissements et en travail mécanisé, donc socialement inclusives. En outre, le nouveau code environnemental organise l'usage des sols en fonction de leurs aptitudes, et recompose ainsi des paysages mixtes composés de forêts, de pâturages et de terrains agricoles, capables de générer des revenus tout en régulant les cycles de l'eau et du carbone, dans un habitat favorable à la biodiversité. Suivie et certifiée par une batterie d'indicateurs territoriaux, cette stratégie de développement est rassurante pour les investisseurs et gagne l'adhésion des acteurs locaux, quel que soit leur groupe social, comme l'atteste l'adhésion massive à Paragoclima, formalisée par un pacte territorial en mai 2023 (65 institutions locales s'y sont engagées).

* Pour plus d'informations : <https://paragoclima.com.br> ; <https://www.terramaz.org>.

des sols, en proposant un nouveau cadre d'action, basé sur un processus de concertation entre les acteurs locaux et les experts des services régionaux et sur l'intégration d'approches sectorielles au niveau des bassins-versants (Chevrillon *et al.*, 2017).

Les approches ascendantes connaissent une forte implication de la recherche pour le développement. Il semble important que les approches descendantes ne soient pas délaissées pour autant et qu'un accompagnement de leurs pratiques soit développé en miroir. Souvent décrites comme exogènes, hors-sol et défailtantes en matière de transparence et de responsabilité, il est important d'investir le dialogue politique et de reconsidérer ces approches descendantes et institutionnelles en interconnexion avec celles ascendantes, afin d'y apporter un ancrage dans l'action publique et une promesse d'apprentissage pour toutes les parties impliquées dans une gouvernance multiniveau. L'encadré 22.5 développe ainsi un exemple d'allers-retours entre les territoires et le niveau national au Congo pour l'élaboration de politiques publiques.

Encadré 22.5. Retour d'expérience 5. Allers-retours entre politique publique et territoire au Congo

Le territoire forestier du Nord-Congo est principalement orienté vers la production de bois d'œuvre (7,7Mha, dix-neuf concessions) et le maintien d'une biodiversité exceptionnelle par le biais d'un réseau conséquent d'aires protégées (1,8Mha, six aires protégées). Les forêts du Nord-Congo ont un rôle central dans l'atténuation du changement climatique.

Ce territoire connaît une pression foncière résultant de l'accroissement démographique et de migrations en provenance des pays voisins, mais aussi de pratiques d'exploitations extractives le plus souvent informelles et extensives, à l'origine de la dégradation du couvert forestier ou de déforestation, voire de pollutions. L'extension des centres urbains est aussi associée au désenclavement progressif de ce territoire. Les populations indigènes et autochtones, majoritaires sur le territoire, sont peu représentées formellement dans les recensements et dans les plans d'affectation des terres.

Dans le cadre du projet Paysage forestier Nord Congo (PPFNC), le Cirad accompagne la mise en place d'une plateforme multisectorielle et multiacteur. Celle-ci est destinée à orienter les futurs choix politiques concernant l'aménagement du territoire à l'échelle du paysage forestier Nord-Congo. Une première phase de trois ateliers réalisés en 2023 a abouti à l'établissement d'un diagnostic du territoire partagé et concerté entre les secteurs et les acteurs. Dans le cadre de cette plateforme, huit administrations centrales, trois entreprises privées, deux ONG de conservation et six structures de la société civile ont développé une vision partagée du territoire. Sur une période de huit mois, et de manière itérative, les parties prenantes ont constitué un modèle de représentation du territoire à partir de visions sectorielles initiales, progressivement étayé par des données quantitatives et des retours de terrain. Ce partage a amené à faire émerger des postures et des intérêts divergents et à collectivement élaborer une feuille de route pour les futures activités de cette plateforme, entre prospective territoriale et plaidoyer multiacteur.

5. Conclusion

Souvent au second plan dans les débats sur l'adaptation et l'atténuation, les approches territoriales ont pourtant un rôle déterminant dans la lutte face au changement climatique. Ce chapitre a décliné les principes généraux sur lesquels ces approches se basent pour répondre aux enjeux climatiques — collaboration, inclusivité, confiance, justice, spatialisation des problèmes et des réponses, multisectorialité et multiscalarité —, tout en soulignant la diversité des formes qu'elles peuvent prendre en fonction des contextes et des spécificités. Les approches territoriales ne sont donc pas des outils clés en main, mais proposent des cadres pour penser et pour construire l'action collective, cadres qui doivent être réinventés et réadaptés à chaque territoire et à chaque problématique. Ces cadres ne se substituent pas aux approches plus globales ou plus locales, mais ont au contraire pour vocation de les compléter, de les articuler, de les renforcer et de contribuer à les remodeler. C'est là un enjeu majeur des approches territoriales, dont le développement peut être limité par leur temporalité parfois trop courte et par les cadres institutionnels souvent verrouillés dans lesquels elles s'inscrivent.

La focale mise sur le territoire, ses dynamiques internes, les impacts locaux du changement climatique, en lien avec les autres échelles d'action, ne doivent pas effacer la dimension interterritoriale des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Nous avons

montré comment les manifestations biophysiques du changement climatique et la vulnérabilité des populations varient d'un territoire à l'autre. Ces inégalités sont encore plus criantes entre des territoires du Nord et ceux du Sud, les Nordes étant pourtant historiquement aux origines du changement climatique et les pays du Sud les plus pauvres devant souvent faire face aux impacts et aux dégâts les plus sévères. Outre les questions essentielles de justice climatique interterritoire posées ici, ces inégalités font aussi écho à des enjeux de connaissance importants : les effets potentiels ou avérés du changement climatique sont plus ou moins documentés selon les territoires. C'est là un enjeu fondamental d'une recherche qui serait elle aussi plus inclusive et plus « juste », notamment entre certains territoires des pays du Sud rendus peu accessibles ou peu instrumentés et d'autres du Nord où les préoccupations communes au sujet du changement climatique sont perçues comme légitimes, mais peu audibles.

6. Références bibliographiques

- Ademe, 2017. Avis de l'Ademe - Alimentation - Les circuits courts de proximité. 8 p.
- Braiki H., Hassenforder E., Lestrelin G., Morardet S., Faysse N., Younsi S., *et al.*, 2022. Large-scale participation in policy design: citizen proposals for rural development in Tunisia. *EURO Journal on Decision Processes*, 10:100020. <https://doi.org/10.1016/j.ejdp.2022.100020>
- Bulkeley H., Edwards G.A.S., Fuller S., 2014. Contesting climate justice in the city: Examining politics and practice in urban climate change experiments. *Global Environmental Change*, 25: 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.009>
- Caron P., Valette É., Wassenaar T., Coppens D.E., Papazian V., 2017. *Living territories to transform the world*, Versailles, éditions Quæ, 274 p.
- Chamel M., La Branche S., 2008. Inégalités écologiques : vers quelle définition? *Espace populations sociétés*, 1, 101-110. <https://doi.org/10.4000/eps.2418>
- Chevillon A., Haha N.B., Burte J., 2017. Towards a territorialization of rural policies in Tunisia: the example of water and soil conservation policies. *Living territories to transform*, 167.
- Chiffolleau Y., Prevost B., 2012. Les circuits courts, des innovations sociales pour une alimentation durable dans les territoires. *Norois*, 7-20. <https://doi.org/10.4000/norois.4245>
- Debolini M., Siqueira T.T.S., 2021. Crop diversification as a strategy for adaptation to climate change: potential and limits on the case of pistachio in the French Mediterranean region, Landscape Conference – Diversity for sustainable and resilient agriculture, 109.
- Gupta J., Prodani K., Bai X., Gifford L., Lenton T.M., Otto I., *et al.*, 2023. Earth system boundaries and Earth system justice: sharing the ecospace. *Environmental Politics*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/09644016.2023.2234794>
- Ivits E., Cherlet M., Tóth G., Sommer S., Mehl W., Vogt J., Micale F., 2012. Combining satellite derived phenology with climate data for climate change impact assessment, *Global and Planetary Change*, (88-89): 85-97, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.03.010>
- Kalkbrenner B.J., Roosen J., 2016. Citizens' willingness to participate in local renewable energy projects: The role of community and trust in Germany. *Energy Research & Social Science*, 13, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.006>
- Lamine C., Dodet F., Demené C., Rotival D., Latré L., Sabot N., *et al.*, 2022. Transformations du système agri-alimentaire territorial en sud Ardèche : co-construire une périodisation du passé... qui fasse sens pour l'avenir. *Géocarrefour*, 96(96/3). <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.20864>
- Moore M.L., Riddell D., Vocisano D., 2015. Scaling out, scaling up, scaling deep: strategies of non-profits in advancing systemic social innovation. *Journal of Corporate Citizenship*, 58, 67-84.
- Newell P., Srivastava S., Naess L.O., Torres Contreras G.A., Price R., 2021. Toward transformative climate justice: An emerging research agenda. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(6), e733. <https://doi.org/10.1002/wcc.733>

- Rhodes R.A.W., 1996. The new governance: governing without government. *Political studies*, 44(4), 652-667.
- Romero Herrera N., 2017. The Emergence of Living Lab Methods. In: Keyson D.V., Guerra-Santin O., Lockton D. (eds.), *Living Labs: Design and Assessment of Sustainable Living*. Springer International Publishing, 9-22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8_2
- Schlosberg D., Collins L.B., 2014. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(3), 359-374. <https://doi.org/10.1002/wcc.275>
- Le Treut H., 2022. Les territoires; espaces de solutions concrètes, d'expérimentation et d'éducation, In: *Climat et civilisation*, Toulouse, Érès, 149-156.
- Tsayem Demaze M., Philippe C., 2022. Repères et caractéristiques épistémiques de la justice climatique. *Natures Sciences Sociétés*, 30, 14-30. <https://doi.org/10.1051/nss/2022016>

Chapitre 23

Systèmes alimentaires et changements climatiques : atténuation et adaptation dans les chaînes agri-alimentaires et dans la consommation

Marie Walser, Carine Barbier, Nicolas Bricas, Patrice Dumas

La littérature scientifique a largement documenté les voies d'atténuation et les stratégies d'adaptation aux changements climatiques à l'étape de la production agricole (voir par exemple chapitres 13, 14 et 15). En comparaison, les travaux s'intéressant aux étapes de postproduction (stockage, transformation, transport, distribution, restauration) et à la consommation sont moins nombreux. Pourtant, l'aval des systèmes alimentaires se trouve aussi aux prises avec les enjeux liés aux changements climatiques :

- d'une part, parce que ces changements menacent le bon fonctionnement des chaînes d'approvisionnement (ruptures d'approvisionnement liées aux mauvaises récoltes ou à la détérioration d'infrastructures, raréfaction de la ressource en eau, développement accru d'agents pathogènes, hausse de la variabilité des prix des matières premières, etc.), et donc la sécurité alimentaire ;
- d'autre part, parce que les étapes de postproduction contribuent elles-mêmes aux changements climatiques, étant responsables d'un tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) du système alimentaire à l'échelle globale (Crippa *et al.*, 2021). Il faut cependant distinguer le cas des pays industrialisés fournissant à leurs habitants une alimentation majoritairement transformée et largement carnée, mobilisant des transports domestiques et internationaux et des besoins de froid relativement élevés, de celui des pays peu industrialisés, dans lesquels la transformation alimentaire, les transports, la chaîne du froid et les réseaux de distribution alimentaire sont beaucoup moins développés. Un certain nombre de pistes d'atténuation exposées dans ce chapitre concernent ainsi en priorité les pays industrialisés, plus émetteurs.

Sans prétendre à l'exhaustivité ni aller jusqu'à quantifier les potentiels d'adaptation et d'atténuation présentés, ce chapitre cherche à mettre en avant les principaux leviers permettant de réduire et de répondre aux changements climatiques dans les étapes de postproduction. On s'intéressera d'abord aux mesures pouvant être prises par les acteurs économiques aux étapes de la transformation, du stockage, du transport et de la distribution, puis aux changements de pratiques des mangeurs à l'étape de la consommation. Ce chapitre donnera enfin une série de propositions d'ordre politique visant à créer des environnements favorables à une transformation des systèmes alimentaires face aux changements climatiques.

1. Atténuation et adaptation aux étapes de la transformation, du stockage, du transport et de la distribution

1.1. Atténuation dans les étapes de postproduction

Au niveau de la transformation alimentaire tout d'abord, les émissions de GES sont majoritairement liées aux procédés de fabrication, qui constituent l'un des principaux postes de consommation d'énergie. Certaines industries, comme celles du sucre, des produits laitiers ou amylacés, sont particulièrement énergivores et donc plus émettrices (HCC, 2024).

Les unités de transformation alimentaire peuvent activer plusieurs leviers pour réduire leurs émissions de GES :

- réaliser des diagnostics dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés (HCC, 2024) ;
- augmenter le recours à des énergies renouvelables, d'autant plus envisageable que les procédés de transformation nécessitent des températures de chauffe relativement basses (Crippa *et al.*, 2021). Dans les pays bénéficiant d'un ensoleillement important toute l'année, l'énergie solaire permet d'accroître la part du renouvelable dans le mix énergétique ;
- utiliser de la biomasse issue de coproduits des filières bois ou agricoles (bagasses, noyaux, épiluchures, coques, etc.) (voir chapitre 19), qui constitue une autre solution énergétique fiable, bon marché et durable, particulièrement adaptée aux besoins des unités de transformation de pays en développement, comme ceux d'Afrique de l'Ouest (Rivier, 2017 ; Graefe *et al.*, 2011) ;
- favoriser quand c'est possible les procédés de fermentation qui non seulement permettent de stabiliser et de conserver les aliments en consommant très peu d'énergie, mais qui présentent par ailleurs de nombreux intérêts nutritionnels (Rastogi *et al.*, 2022).

Bien que cela ne soit pas directement lié à une baisse de la consommation d'énergie dans la transformation, les entreprises agro-alimentaires peuvent indirectement contribuer à la réduction des émissions de GES en privilégiant l'achat de matières premières ou de produits issus de pratiques agricoles favorables pour le climat (HCC, 2024).

Une autre voie d'atténuation des GES réside dans les choix opérés en matière d'emballages. Leur production, leur usage et la gestion de leur fin de vie génèrent 5,4% des émissions totales de GES des systèmes alimentaires (Crippa *et al.*, 2021). La mesure d'atténuation la plus efficace est leur réduction à la source : évitement du suremballage, allègement des emballages, développement de l'achat en vrac, généralisation des grands formats (utilisant moins d'emballage par unité de volume) pour les produits non périssables, ou encore recours à des contenants réutilisables. Le type de matériau utilisé est aussi une variable importante à considérer. L'analyse du cycle de vie (ACV) mesurant l'impact d'un emballage sur toute la chaîne de valeur constitue un outil d'aide à la décision indispensable pour arbitrer entre plusieurs options. Ces analyses doivent intégrer les risques de pertes liés à une réduction des emballages, elles-mêmes responsables d'émissions de GES.

Le stockage est une autre étape émettrice, en particulier quand elle fait intervenir la chaîne du froid. Elle représente 43% de la consommation d'énergie du secteur de la distribution (Behfar *et al.*, 2018). La réfrigération est aussi responsable de fuites de puissants

GES tels que les hydrofluorocarbures (HFC) en cas de mauvaise gestion des appareils réfrigérants en fin de vie. Ces émissions proviennent aujourd'hui majoritairement des pays industrialisés, largement équipés en chaînes du froid (Crippa *et al.*, 2021), mais avec l'augmentation des niveaux de revenu et la hausse des températures liée au changement climatique, une hausse importante de la demande mondiale de réfrigération est anticipée (Unep, 2023). Certes, celle-ci permet une meilleure préservation des denrées et la limitation des pertes alimentaires. Mais là encore, une ACV intégrant la localisation des entreprises de transformation afin de minimiser les transports et les stockages frigorifiques devrait être plus systématique. Partout, le remplacement des actuels gaz réfrigérants par des gaz frigorigènes moins contributeurs à l'effet de serre est un impératif. Le commerce de réfrigérants illégaux et polluants doit également être endigué¹.

Parmi les étapes de postproduction, le transport constitue l'une des premières sources d'émissions de GES, de 4,8 % à 19,0 % des émissions totales des systèmes alimentaires selon les périmètres considérés (Crippa *et al.*, 2021 ; Li *et al.*, 2022). Elles sont 2,7 fois plus élevées dans les pays industrialisés (Amérique du Nord, Europe et Océanie) que dans les autres régions du monde (Li *et al.*, 2022), ce qui confirme le rôle majeur de ces pays dans l'atténuation des émissions du transport.

Avec la concentration des populations en zone urbaine partout dans le monde et le développement du commerce international, les chaînes d'approvisionnement alimentaire se sont fortement accrues. Une voie majeure d'atténuation réside dans une réduction des distances sur l'ensemble des chaînes alimentaires et dans l'abandon des filières de très longues distances. Trois leviers peuvent être utilisés :

- renchérir le coût du transport afin de limiter les échanges commerciaux ;
- relocaliser les productions à des échelles pertinentes. Les métropoles, même en considérant leur hinterland, sont très largement déficitaires. Favoriser des zones maraîchères en ceinture des villes est nécessaire mais insuffisant. Les filières qui exigent des surfaces agricoles importantes doivent être raisonnées à des échelles supérieures ;
- réduire la part carnée de l'alimentation limite les besoins de transport pour l'alimentation animale. Les tourteaux, souvent importés, peuvent peser pour un quart des trafics de produits agro-alimentaires (Barbier *et al.*, 2019).

Cependant, cette relocalisation des filières alimentaires, intuitivement perçue comme bénéfique pour l'environnement compte tenu de la réduction des distances parcourues, doit être évaluée. Si les modes de production sont différents, il faut vérifier que cela ne se traduit pas par une moindre performance environnementale. En effet, si l'on tient compte du déstockage de carbone lié à l'utilisation des terres, la production agricole reste l'étape la plus pénalisante pour le climat du fait des bilans d'émissions de GES qu'elle génère, même si les émissions de la postproduction tendent à prendre une part croissante. La distribution alimentaire peut être motrice dans l'intégration de plus en plus importante d'une offre locale dans ses assortiments en s'appuyant sur une optimisation de la chaîne logistique : création de hubs territoriaux, mutualisation et optimisation énergétique des transports par renouvellement des parcs, utilisation d'énergies bas-carbone, développement du fret ferroviaire ou fluvial (HCC, 2024).

1. À noter que les émissions de gaz fluorés sont encadrées par l'amendement de Kigali au protocole de Montréal entré en vigueur en 2019 et relatif à la protection de la couche d'ozone, et par l'accord de Paris sur le changement climatique (2015).

Toutes ces mesures doivent être mises en relation avec les évitements de pertes que permettent la transformation, la réfrigération et le conditionnement. Les pertes et les gaspillages alimentaires sont responsables de 9 % des émissions totales de GES du système alimentaire (Crippa *et al.*, 2021). Ils contribuent à l'effet de serre par les émissions liées à ces productions non utilisées, mais aussi par leurs fermentations dans les décharges (IPCC, 2021). Les pistes d'atténuation sont nombreuses et s'observent à toutes les étapes de la chaîne alimentaire (Hanson et Mitchell, 2017).

Les proportions des pertes aux différents stades de la chaîne alimentaire varient selon les pays. Dans les pays peu industrialisés, les pertes de post récolte sont principalement liées au déperissement des denrées à l'étape du stockage. Pour les réduire, Kitinoja (2013) préconise la mise en place de chaînes du frais (12 °C à 18 °C) particulièrement adaptées aux produits tropicaux ou subtropicaux (fruits, légumes, racines, tubercules). À la différence de la chaîne du froid (0 °C à 4 °C) dont elle est complémentaire, la chaîne du frais repose sur des technologies à bas coût, pour partie peu énergivores, construites à partir de matériaux locaux et faciles à gérer. Il s'agit par exemple de systèmes de refroidissement par évaporation ou de structures de stockage réfrigérées ventilées la nuit. La maîtrise des bonnes pratiques d'usage des équipements et de gestion de leur fin de vie par des techniciens formés constitue également un levier de réduction des pertes (Yahia, 2010). Dans les pays industrialisés, les pertes et les gaspillages sont particulièrement importants à l'aval du système alimentaire. Les leviers d'action sont nombreux et on ne donnera ici que quelques illustrations :

- les transformateurs et les distributeurs peuvent chercher à adapter leurs commandes au plus près de leurs besoins de production ou de leurs ventes. Si la redistribution d'inventus à des associations caritatives est souvent citée comme une double voie de lutte contre le gaspillage et l'insécurité alimentaire, on soulignera ici la limite de cette pratique, qui ne permet de résoudre aucun des deux problèmes, mais qui suppose leur coexistence (Bricas et Scherer, 2021) ;
- les acteurs de la distribution peuvent informer les acheteurs en magasin sur les différents types de date de péremption, pour éviter les confusions menant à du gaspillage au domicile ;
- les restaurateurs peuvent confectionner des portions plus petites, avec l'option de se resservir en payant ou non un supplément, permettant aux clients de commander un repas correspondant à leur appétit. La possibilité de ramener d'éventuels restes au domicile et de fournir des emballages à cet effet permet également d'éviter le gaspillage (Gunders, 2012).

1.2. Adaptation dans les étapes de postproduction

Si les changements climatiques affectent fortement la production agricole, ils peuvent aussi perturber l'aval des systèmes alimentaires. On présente ici quelques voies d'adaptation que devront emprunter les acteurs (de la transformation notamment) pour y faire face.

Le réchauffement climatique induit une tension sur la ressource en eau et peut contraindre son usage dans certaines régions du monde. Or, les unités de transformation alimentaire, industrielles ou non, dépendent fortement de cette ressource pour le lavage, la cuisson, le refroidissement, etc. Aussi, la constitution de stocks d'eau et l'optimisation de son usage constituent des enjeux de premier plan. Dans leurs

travaux, Valta *et al.* (2015) détaillent une grande diversité de mesures d'adaptation pour répondre au manque d'eau, parmi lesquelles la réalisation de diagnostics pour identifier des économies potentielles, l'optimisation des procédés pour réduire leur consommation d'eau ou le recyclage compatible avec les contraintes sanitaires.

Le réchauffement climatique tend également à favoriser le développement de micro-organismes dans les produits agricoles et alimentaires, générant un risque direct en matière de sûreté sanitaire et pouvant se traduire par une augmentation des pertes. Ce phénomène concerne les produits frais, comme les fruits et les légumes ou les produits animaux, mais aussi les grains et même certains produits transformés (Misiou et Koutsoumanis, 2022). Là encore, une meilleure maîtrise des conditions de stockage est nécessaire.

De manière générale, les changements climatiques rendent les approvisionnements en matières premières agricoles incertains. Or, depuis l'industrialisation de la transformation alimentaire au cours du xx^e siècle, les procédés de fabrication se sont automatisés, traitent de façon standardisée de grands volumes de produits et utilisent des matières premières elles-mêmes très standardisées (Bricas *et al.*, 2021). Alors que la diversification des productions agricoles et leur relocalisation constituent des leviers de résilience pour faire face à différentes crises, dont des crises climatiques, l'industrie va devoir s'adapter à l'offre et développer des procédés de transformation plus souples, capables de traiter une matière première non standardisée de qualité plus variable (HCC, 2024).

Les changements climatiques menacent enfin de créer ou de renforcer des pénuries d'eau et de nourriture dans certaines zones du globe (Roberts, 2008; Awuor *et al.*, 2008). Bien que les pratiques anciennes de stockage de matières premières se soient progressivement réduites au cours du temps (diversification des sources d'approvisionnement, coût, distorsion de marchés, etc.), la réhabilitation de stocks de sécurité à différentes échelles, du ménage à la nation, voire aux régions plus larges, se pose aujourd'hui pour limiter l'impact d'irrégularités accrues de production sur la sécurité alimentaire (IFPRI, 2023). À noter que la constitution de stocks suppose l'acheminement des denrées alimentaires jusqu'aux lieux de stockage, et donc l'entretien ou le développement d'infrastructures de transport.

2. Atténuation et adaptation aux changements climatiques dans la consommation

2.1. Atténuation par la consommation

À l'échelle domestique, les émissions de GES pourraient être réduites en combinant, dans une optique de sobriété énergétique, des changements de pratiques alimentaires. En matière d'approvisionnement, il s'agit de penser la décarbonation de la logistique du dernier kilomètre. Pour les ménages vivant dans des zones correctement pourvues en commerces alimentaires, l'usage de modes de transport peu émetteurs pour réaliser leurs achats (marche, vélo, transports en commun) doit être facilité. Dans les espaces moins dotés en commerces, il s'agit plutôt d'organiser une mutualisation des approvisionnements et le rapprochement d'une offre alimentaire de qualité des lieux de vie des mangeurs dans le cadre de politiques d'aménagement du territoire. L'usage de récipients réutilisables pour conditionner des achats en vrac participe aussi à la réduction des emballages.

Les émissions liées au froid domestique pourraient également être limitées grâce à la réduction du suréquipement, au recours à des équipements plus efficaces et à la sensibilisation sur un usage économe des équipements et sur l'importance de leur recyclage en fin de vie, pour limiter les fuites de gaz fluorés. Ces mesures ne concernent pas seulement les habitants des pays industrialisés, car les équipements de froid sont utilisés partout dans le monde, y compris dans certaines zones rurales sans électricité (réfrigérateurs à gaz).

L'étape de la préparation culinaire, et en particulier la cuisson des aliments, dispose aussi d'un potentiel de réduction des émissions de GES qui réside dans le choix de la méthode de cuisson et de la source d'énergie utilisée, dans le type de matériel et dans sa bonne utilisation (ZongYue *et al.*, 2015). Dans les pays peu industrialisés, la cuisson se fait encore beaucoup par combustion de biomasse (bois, charbon) avec des procédés relativement émetteurs tels que le feu de cuisson à trois pierres ou les réchauds à charbon. Dans leurs travaux, MacCarty *et al.* (2008) suggèrent le remplacement de ces modes de cuisson par des poêles « améliorés » entraînant moins d'émissions de GES. Dans les pays industrialisés, l'enjeu est plutôt de réduire la consommation énergétique associée aux opérations de cuisson. Parmi les leviers allant dans ce sens, on peut citer (Frankowska *et al.*, 2020) :

- l'augmentation du recours à des méthodes de cuisson à faibles émissions (micro-ondes, cuisson sous pression ou cuisson lente) ou l'utilisation d'énergies plus propres (biogaz par exemple) ;
- l'information des ménages sur les pratiques culinaires faiblement énergivores : utilisation systématique de couvercles, réglage des feux, etc. ;
- la pratique du batch cooking qui consiste à cuisiner des repas en plus grande quantité pour plusieurs jours, la consommation énergétique étant alors amortie sur une plus grande quantité d'aliments.

Selon le 6^e rapport du Giec (IPCC, 2023), un changement des régimes alimentaires figure parmi les potentiels les plus importants de réduction des émissions de GES à l'échelle mondiale. En effet, les étapes en amont du système alimentaire et les émissions de GES associées sont étroitement liées à cette demande alimentaire. Les atténuations envisageables au niveau des régimes alimentaires sont de trois ordres :

- l'abondance de l'offre alimentaire et les incitations à la consommation se traduisent à la fois par du gaspillage alimentaire et par une surconsommation calorique, notamment du fait de l'augmentation des teneurs en gras et en sucre des aliments et des régimes, et par une surconsommation de protéines, en particulier dans les pays industrialisés. La réduction de ces surconsommations est le premier moyen de réduire les émissions, mais aussi de réduire une obésité qui atteint des records à l'échelle mondiale (Micha *et al.*, 2022) ;
- là où s'observe une surconsommation de produits animaux, l'adoption de régimes alimentaires plus végétaux est aujourd'hui largement reconnue comme un moyen de réduire et les émissions de GES, et les pathologies liées à cette surconsommation (Moore Lappé, 1971 ; Poore et Nemecek, 2018 ; Searchinger *et al.*, 2019 ; Steinfeld *et al.*, 2006 ; Westhoek *et al.*, 2011) (voir chapitre 10). Fouillet *et al.* (2023) montrent que des régimes où la part des protéines végétales atteint 70 % à 80 % de l'apport total en protéines peuvent être tout à fait équilibrés du point de vue nutritionnel ;
- enfin, la réduction de la consommation de produits ultratransformés, plus émetteurs car associés à une surconsommation de calories (Hendrie *et al.*, 2016), au profit de produits locaux, de saison et issus de filières durables peut également contribuer à cette atténuation.

Qu'il s'agisse de s'orienter vers des régimes plus frugaux, plus végétalisés ou moins ultratransformés, il faut rappeler la forte hétérogénéité des situations selon les pays, au sein des pays (en particulier entre zones rurales et urbaines), et même, au sein de ces zones, entre populations. Ces différences tiennent à la fois à des situations géographiques qui déterminent des disponibilités alimentaires spécifiques, culturelles ou religieuses (différence entre la Chine et l'Inde en matière de consommation de viande par exemple) (Schönfeldt et Gibson Hall, 2012), de situations économiques et de situations historiques : là où la croissance économique est rapide, les régimes alimentaires et les corpulences, désirables en situation de relative pauvreté, restent prégnants. Les changements de régimes alimentaires doivent donc être envisagés différemment selon les territoires et viser surtout les populations en surconsommation. La promotion de modèles universels basés sur le calcul de régimes moyens acceptables du point de vue environnemental et sanitaire comporte ainsi le risque d'une faible acceptabilité si elle ne tient pas compte de ces spécificités locales.

2.2. Adaptation dans la consommation

Au niveau de la consommation, l'adaptation aux changements climatiques consiste principalement pour les ménages à augmenter leur résilience face à des pénuries temporaires ou à une variabilité accrue de la qualité ou de la quantité de denrées disponibles, et à une plus grande volatilité des prix. Dans certaines communautés rurales soumises aux aléas climatiques et où la sécurité alimentaire ne repose que partiellement sur le marché, les pratiques visant à prévenir les pénuries sont ancrées de longue date dans les pratiques locales. Elles articulent une diversité de stratégies d'adaptation qui diffèrent d'une communauté à l'autre : la diversification des aliments produits et l'usage de plantes peu sensibles à des aléas climatiques (par exemple le manioc), le stockage d'aliments et la constitution de capitaux mobilisables en cas de besoins (animaux, bijoux, etc.), les solidarités familiales ou sociales, le recours à la cueillette ou à la chasse dans des situations de fortes crises de production agricole, la migration temporaire, voire plus permanente, pour réduire la demande alimentaire, etc. Dans les zones plus connectées au marché et où l'autoproduction est réduite, mais qui peuvent subir de fortes fluctuations de prix, on trouve aussi des stratégies de diversification alimentaire, de stockage, de solidarité et de mutualisation des risques, de mobilité, voire de reprise d'activités d'autoproduction.

3. Accompagner les acteurs et les mangeurs : réponses politiques face aux changements climatiques

Les différentes mesures d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques présentées dans ce chapitre offrent un panorama des leviers pouvant être activés dans les étapes de postproduction pour répondre aux enjeux climatiques des systèmes alimentaires. Ces mesures gagnent à être combinées dans leur mise en œuvre, aux différentes étapes du système alimentaire et aux différentes échelles territoriales. Elles doivent aussi être soutenues par les pouvoirs publics. En effet, la transformation des systèmes alimentaires face aux enjeux climatiques ne peut pas uniquement reposer sur les démarches volontaires des acteurs économiques et sur un changement des comportements individuels. Nombre de travaux scientifiques ont, sur ce dernier point, montré les limites de la figure du consommateur « éclairé », dont la sensibilisation suffirait à faire changer les comportements (Lahlou, 2017).

La construction et l'adoption d'un nouveau contrat social alimentaire supposent plutôt la mise en place d'environnements favorables aux changements de pratiques, capables notamment d'encadrer les acteurs privés, en particulier ceux qui opèrent en situation d'oligopole et qui portent une large responsabilité dans les émissions de GES des systèmes alimentaires. On peut distinguer plusieurs types d'environnements :

- les environnements cognitifs : ils façonnent et influencent les préférences et les attitudes, c'est-à-dire les prédispositions à agir, de façon consciente (éducation, information, sensibilisation, conseils), mais aussi inconsciente (effets de la publicité, des rumeurs, de la répétition de messages). Pour les opérateurs économiques, ces environnements renvoient aux institutions de la formation, de l'information, du conseil, de la recherche, etc. Soutenir les institutions dont le mandat est d'accompagner les acteurs dans des changements de modèles de production est indispensable. Pour les consommateurs, outre par des campagnes de communication, agir sur ces environnements cognitifs peut prendre la forme d'une régulation de la publicité et des pratiques de marketing de la grande distribution ;

- les environnements matériels : ils facilitent ou contraignent l'accès et l'usage des aliments. Ils renvoient d'une part à l'environnement physique : proximité des lieux de vente, présence d'espaces de stockage, d'espaces et d'équipements de cuisine et de gestion des déchets, d'espaces et d'équipements de prise de repas, etc. L'urbanisme commercial, en prévoyant l'implantation de certains commerces alimentaires ou de marchés, en améliorant leur fonctionnalité et leur attrait, est un levier important pour faciliter l'accès à une alimentation de qualité, pour éviter les déserts ou les marécages alimentaires ou encore pour valoriser l'image de certains produits. Plusieurs villes africaines sont ainsi engagées dans l'amélioration des lieux et des conditions de transformation et de vente de produits artisanaux locaux, face au développement de la grande distribution privilégiant des produits industriels souvent problématiques du point de vue environnemental et sanitaire (voir le projet AfriFOODlinks²). Par ailleurs, en augmentant les exigences environnementales dans leurs accords commerciaux, les pays disposent d'un levier pour améliorer la qualité de l'offre alimentaire importée. D'autre part, on doit considérer les prix et les conditions de paiement de l'alimentation comme des éléments très importants des environnements matériels. Il s'agit de considérer le prix moins comme le signal d'un équilibre entre l'offre et la demande, mais comme un incitateur ou un limitateur de cette demande. À l'opposé d'une approche libérale qui s'interdit de subventionner ou de taxer, il est possible de jouer sur le prix pour inciter ou pour réduire certaines consommations. La réglementation, les soutiens publics, la fiscalité sont bien sûr également des moyens d'orienter les pratiques des acteurs. Les changements climatiques allant affecter la qualité et l'accessibilité de l'alimentation et éventuellement aggraver des inégalités d'accès préexistantes, il est nécessaire que les pouvoirs publics soient en mesure d'accompagner les ménages les plus fragiles pour les empêcher de tomber dans l'insécurité alimentaire (Fanzo *et al.*, 2018) ;

- les environnements sociaux : l'alimentation est une activité éminemment normée par des pratiques et des représentations sociales. Celles-ci sont à la fois héritées de la culture, de la transmission intergénérationnelle, mais aussi des contextes dans lesquels on vit, de son entourage. Réduire sa consommation de produits animaux ou limiter les quantités servies, par exemple à des invités, peut ainsi se heurter à des normes qui, au

2. <https://afrifoodlinks.org/>.

contraire, valorisent ces produits ou l'abondance. Jouer sur les normes sociales passe par les exemples de personnes ayant une influence sur les modes de vie : personnalités, chefs religieux, sportifs, influenceurs, etc., ou par la présentation de certaines pratiques dans des mises en scène (rôle des séries à la télévision).

La transformation des environnements cognitifs, matériels et sociaux de l'alimentation est indispensable pour répondre aux enjeux climatiques, et plus largement, aux enjeux de durabilité auxquels font face les systèmes alimentaires. Elle nécessite un rééquilibrage des rapports de force dans la gouvernance alimentaire en faveur des pouvoirs publics, et surtout, des citoyens, dans une perspective de démocratie alimentaire.

Alors que la participation citoyenne, directe ou par des élus ou des représentants, se joue aujourd'hui le plus souvent à des échelles très locales de quartiers, de villages ou de villes, les politiques incitatives doivent s'articuler à plusieurs échelles, du local au global.

4. Références bibliographiques

- Awuor C.B., Orindi V.A., Ochieng Adwera A., 2008. Climate change and coastal cities: the case of Mombasa, Kenya. *Environment and Urbanization*, 20(1), 231-242. <https://doi.org/10.1177/0956247808089158>
- Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J.-M., Sylvestre M., Pharabod I., *et al.*, 2019. L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France, CIRED, Paris, 24 p.
- Behfar A., Yuill D., Yu Y., 2018. Supermarket system characteristics and operating faults (RP-1615). *Science and Technology for the Built Environment*, 24(10), 1104-1113. <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1479614>
- Bricas N., Conaré D., Walser M., 2021. L'industrialisation de l'offre alimentaire, *In* : Bricas N., Conaré D., Walser M. (éd.), *Une écologie de l'alimentation*, éditions Quæ, Versailles, 81-93.
- Bricas N., Scherer P., 2021. Lutter contre la précarité par de l'aide alimentaire? *In* : Bricas N., Conaré D., Walser M. (éd.), *Une écologie de l'alimentation*, éditions Quæ, Versailles, 205-214.
- Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., *et al.*, 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat Food*, 2, 198-209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Fanzo J., Davis C., McLaren R., Choufani J., 2018. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security*, 18, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.06.001>
- Fouillet H., Dussiot A., Perraud E., *et al.*, 2023. Plant to animal protein ratio in the diet: nutrient adequacy, long-term health and environmental pressure. *Front Nutr*. 10: 1178121. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1178121>
- Frankowska A., Rivera X.S., Bridle S., *et al.*, 2020. Impacts of home cooking methods and appliances on the GHG emissions of food. *Nat Food*, 1, 787-791. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00200-w>
- Graefe S., Dufour D., Giraldo A., *et al.*, 2011. Energy and carbon footprints of ethanol production using banana and cooking banana discard: A case study from Costa Rica and Ecuador. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2640-2649. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.051>
- Gunders D., 2012. Wasted: How America Is Losing Up to 40 Percent of Its Food from Farm to Fork to Landfill, NRDC, 58 p. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/wasted-2017-report.pdf>
- Hanson C., Mitchell P., 2017. The Business Case for Reducing Food Loss and Waste. Champions 12.3, Washington, DC., 14 p. <https://champions123.org/sites/default/files/2020-08/business-case-for-reducing-food-loss-and-waste.pdf>
- HCC, 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste, 167 p. https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2024/01/2024_HCC_Alimentation_Agriculture_25_01_webc_vdef_c.pdf
- Hendrie G.A., Baird D., Ridoutt B., *et al.*, 2016. Overconsumption of Energy and Excessive Discretionary Food Intake Inflates Dietary Greenhouse Gas Emissions in Australia. *Nutrients*, 8(11): 690. <https://doi.org/10.3390/nu8110690>

- IFPRI, 2023. Global food policy report 2023: Rethinking food crisis responses. Washington, IFPRI, 140 p. <https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/a935566d-ddea-49cc-a2a7-a0c60743e6cf/download>
- IPCC, 2021. Climate change 2021: The physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC, 2023. Climate change 2023, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kitinoja L., 2013. Use of cold chains for reducing food losses in developing countries, PEF White Paper 13-03, 16 p.
- Lahlou S., 2017. *Installation Theory. The societal construction and regulation of behavior*, Cambridge University Press, Cambridge, 510 p.
- Li M., Jai N., Lenzen M., Malik A., *et al.*, 2022. Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions, *Nature Food*, 3, 445-453. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00531-w>
- MacCarty N., Ogle D., Still D., *et al.*, 2008. A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for Sustainable Development*, 12(2), 56-65. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60429-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60429-9)
- Micha R., Di Cesare M., Zanello G., 2022. Global Nutrition Report 2022, 140 p. <https://globalnutritionreport.org/reports/2022-global-nutrition-report/>
- Misiou O., Koutsoumanis K., 2022. Climate change and its implications for food safety and spoilage. *Trends in Food Science & Technology*, 126: 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.031>
- Moore Lappé E., 1971. *Diet for a small planet*, Ballantines Books, New York, 301 p.
- Poore J., Nemecek T., 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers, *Science*, 360, 987-992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Rastogi Y.R., Thakur R., Thakur P., *et al.*, 2022. Food fermentation – Significance to public health and sustainability challenges of modern diet and food systems. *International Journal of Food and Microbiology*, 371: 109666. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109666>
- Rivier M., 2017. Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest, Thèse de doctorat, Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier, 176 p.
- Roberts D., 2008. Thinking Globally, Acting Locally – Institutionalizing Climate Change at the Local Government Level in Durban, South Africa, *Environment and Urbanization*, 20(2): 521-537. <https://doi.org/10.1177/0956247808096126>
- Schönfeldt H.C., Gibson Hall N., 2012. Dietary protein quality and malnutrition in Africa. *British Journal of Nutrition*, 108(S2): S69-S76. <https://doi.org/10.1017/S0007114512002553>
- Searchinger T., Waite R., Hanson C., Ranganathan J., Dumas P., Matthews E., 2019. Creating a sustainable food future: a menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050 - synthesis report, World Resources Institute, 556 p.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C., 2006. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome, FAO, 414 p.
- UNEP, 2023. Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again), Nairobi, 80 p. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
- Valta K., Moustakas K., Sotiropoulos A., *et al.*, 2015. Adaptation measures for the food and beverage industry to the impact of climate change on water availability. *Desalination and Water Treatment*, 57(5): 2336-2343. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1049407>
- Westhoek H., Rood T., van den Berg M., *et al.*, 2011. *The protein puzzle: the consumption and production of meat, dairy and fish in the European Union*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 218 p.
- Yahia E., 2010. Cold chain development and challenges in the developing world. *Acta Horticulturae*, 877: 127-132. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.9>
- ZhongYue X., DaWen S., Zi Z., *et al.*, 2015. Research developments in methods to reduce carbon footprint of cooking operations: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 44(1): 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.03.004>

Chapitre 24

Le méthane agricole : un levier de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour respecter l'accord de Paris

Rémi Prudhomme, Myriam Adam, Mohamed Habibou Assouma

Les émissions de méthane sont la deuxième source d'émissions de gaz à effet de serre (GES) la plus influencée par l'homme et la plus forçante sur le climat après les émissions de dioxyde de carbone. Ces deux derniers siècles, les émissions de méthane (CH_4) ont presque doublé depuis 1900, majoritairement à cause des activités humaines (IPCC, 2022). Le méthane est responsable de 30% du réchauffement climatique depuis la période préindustrielle à nos jours. Il se distingue du CO_2 par sa courte durée de vie (11,8 ans) (IPCC, 2022), mais son fort potentiel de réchauffement global (PRG), c'est-à-dire sa capacité à piéger la chaleur dans l'atmosphère, est 28 fois plus réchauffant sur une période de cent ans. Le méthane a donc un effet direct important sur le réchauffement climatique, mais également à travers les réactions chimiques atmosphériques qui conduisent à la production de l'ozone (O_3) et de la vapeur d'eau, qui sont eux-mêmes des GES, s'ajoutant au forçage radiatif¹.

Les émissions de méthane peuvent être d'origine anthropique (359 Mt CH_4 /an sur la période 2008-2017, soit environ 60% des émissions de méthane) ou naturelle (217 Mt CH_4 /an, soit environ 40% des émissions) (Saunois *et al.*, 2020; résumé dans la figure 24.1). Parmi ces émissions anthropiques, les émissions de méthane proviennent de l'agriculture pour 40% (141 Mt CH_4 /an sur la période 2008-2017), de l'extraction de combustibles fossiles pour 33% (114-115 Mt CH_4 /an sur la période 2008-2017), de la gestion des déchets et des décharges pour 18% (64 Mt CH_4 /an sur la période 2008-2017) et de la combustion de la biomasse pour 9% (32 Mt CH_4 /an sur la période 2008-2017) (Saunois *et al.*, 2020; résumé dans la figure 24.1). Ces émissions totales de méthane sont en constante augmentation à un rythme soutenu (Tollefson, 2022). Le méthane agricole provient de la dégradation de la matière organique par des bactéries méthanogènes, dans un milieu pauvre en oxygène.

Bien que les émissions de méthane associées à la production d'hydrocarbure représentent une grosse partie des émissions de méthane d'origine anthropique et donc un levier de réduction des émissions de méthane important (une réduction de 30% des émissions anthropiques de méthane peut être permise par une réduction drastique de l'intensité des émissions associées aux activités pétrolières et gazières), nous nous concentrerons dans ce chapitre sur les émissions de méthane d'origine agricole, qui sont l'objet de cet ouvrage. Les émissions de méthane en agriculture peuvent provenir

1. Forçage radiatif : différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné.

de (1) la production de bétail qui est la plus large source d'émissions de méthane agricole (109MtCH₄/an en moyenne sur la période 2008-2017) issues en grande partie de la fermentation entérique² (90% de ce méthane sont issus des émissions directes

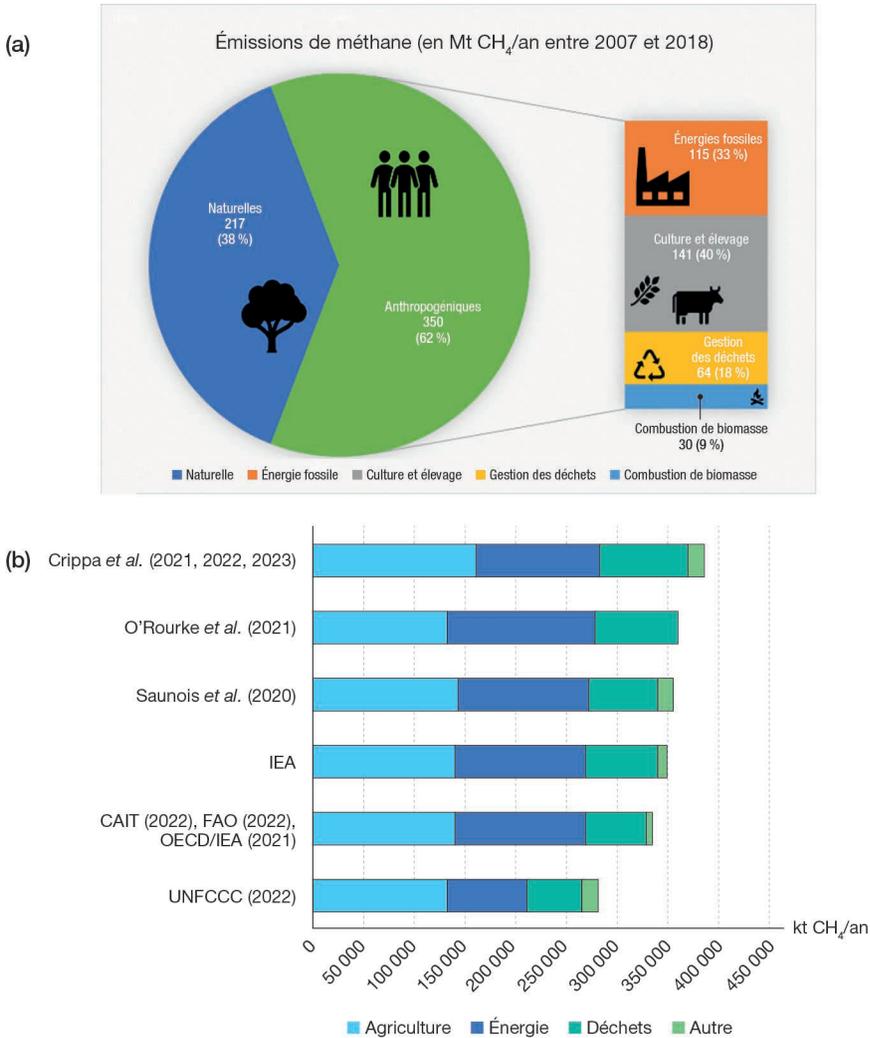


Figure 24.1. Répartition des émissions de méthane (a) entre les émissions de méthane d'origine naturelle et anthropique (sources d'émissions annuelles de méthane entre 2007 et 2018 en MtCH₄/an), et (b), parmi les émissions de méthane anthropiques, entre les sources d'émissions d'origine agricole, issues de l'extraction d'énergies fossiles, de la combustion de biomasse ou de la gestion des déchets (sources d'émissions anthropiques annuelles de méthane en 2023 en ktCH₄/an). Sources : Saunois *et al.*, 2020; International Energy Agency, 2023. Methane Tracker Database, IEA, Paris. License: Creative Commons Attribution CC BY 4.0. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/methane-tracker-data-explorer>.

2. Fermentation entérique : processus digestif par lequel des micro-organismes décomposent des substrats (notamment des glucides) en molécules plus simples, permettant leur absorption dans la circulation sanguine d'un animal.

des ruminants) et de la gestion des déjections animales pour le reste, et (2) des émissions issues de la culture du riz (31 MtCH₄/an en moyenne sur la période 2008-2017) (Saunois *et al.*, 2020, résumé dans la figure 24.1). L'agriculture a également une influence sur une partie des émissions de méthane provenant de la combustion de la biomasse ou de biocarburant (30 MtCH₄/an sur la période 2008-2017) par des pratiques comme la culture sur brûlis avec une prédominance des émissions observées dans les zones tropicales (environ 65 % des émissions sous des latitudes inférieures à 30° N) (Saunois *et al.*, 2020). Les incertitudes sur les estimations actuelles des émissions de méthane naturelles liées à la fonte du permafrost ou des émissions de méthane associées aux énergies fossiles suggèrent une sous-estimation évidente de ces émissions de méthane, ce qui contribue à mettre le méthane sur le devant de la scène.

La suite de ce chapitre aborde de manière générale les scénarios et les politiques de réduction des émissions de méthane à l'échelle internationale et nationale. Puis les émissions de méthane directement associées au secteur agricole, à savoir les émissions provenant du secteur de l'élevage et de la culture du riz, seront analysées notamment au regard des objectifs des politiques de réduction du méthane, et en proposant des solutions ou des options d'atténuation de ces émissions. Bien que les émissions de méthane d'origine naturelle (38 % des émissions de méthane provenant principalement des zones humides) et les émissions de méthane associées à l'extraction des énergies fossiles (33 % des émissions anthropiques) soient des sources importantes, nous ne les aborderons que très brièvement dans ce chapitre pour nous concentrer sur les émissions agricoles.

1. Politiques de réduction des émissions de méthane

1.1. Les objectifs politiques de réduction de méthane

Dans le protocole de Kyoto établi en 1997, le méthane a été inclus comme GES dans les politiques climatiques internationales de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), en tant que contributeur important au changement climatique. Mais cela n'avait conduit qu'à peu de mesures de réductions de méthane. Ce désintérêt pour les émissions de méthane s'est récemment transformé en un centre d'attention particulier, matérialisé par le lancement lors de la COP26 à Glasgow en 2021 d'un accord mondial sur le méthane (the Global Methane Pledge) par les États-Unis et l'Europe, et auquel se sont ralliés actuellement 150 pays représentant un peu plus de 50 % des émissions actuelles de méthane (Crippa *et al.*, 2023). Les pays signataires s'engagent à réduire collectivement de 30 % leurs émissions de méthane à l'horizon 2030 par rapport à 2020, en se concentrant sur une réduction dans le secteur de l'énergie et du secteur des déchets. Une mention est tout de même faite à une réduction de méthane dans le secteur agricole à partir d'innovations technologiques et de partenariats avec les agriculteurs.

Dans cet intérêt croissant de réduire les émissions de méthane, 476 mesures spécifiques de réduction de méthane sont présentes dans 168 contributions nationales déterminées (Malley *et al.*, 2023). Ces mesures d'atténuation (par exemple l'optimisation de la gestion de l'alimentation animale, la sélection génétique pour réduire les émissions de méthane entériques des ruminants ou l'implémentation d'aération intermittente dans l'inondation continue du riz) couvrent 40 % des émissions actuelles de méthane (par exemple les Contributions déterminées au niveau national,

ou CDN³, du Sénégal ; encadré 24.1) et, si elles étaient mises en œuvre au maximum de leur potentiel technique, elles permettraient de réduire les émissions de méthane de 31 %. Malgré un potentiel technique de réduction des émissions de méthane important dans le secteur agricole, ces réductions dans ce secteur restent cependant faibles dans ces engagements (Malley *et al.*, 2023). Si nous prenons l'exemple du Cambodge

Encadré 24.1. Mesures de réduction des émissions dans le secteur agricole dans la contribution déterminée au niveau national du Sénégal

Le Sénégal cherche actuellement à augmenter sa production agricole (arachide, riz paddy ou fruits et légumes) avec le déploiement de la deuxième phase du Programme de relance et d'accélération de la cadence de l'agriculture sénégalaise (Pracas2, 2019-2023), volet agricole du Plan Sénégal Émergent (PSE). Le Sénégal vise également à augmenter les productions animales par la modernisation des pratiques d'élevage et l'appui aux filières de la viande, de l'aviculture et du lait, conformément à la Lettre de politique de développement de l'élevage (2017-2021).

Les actions stratégiques de la CDN* sont :

- la conversion de 99 621 ha de terres agricoles sous pratique de régénération naturelle assistée (RNA) et 4 500 ha sous compost à l'horizon 2030, et la mise à disposition de la fumure organique et du compost amélioré avec la production du biogaz ;
- la conversion de 28 500 ha de riz irrigué à un système de riziculture intensif (SRI) réduisant à la fois les volumes d'eau utilisés et les quantités de méthane émises, et le passage à 498 105 ha pour la RNA et à 14 400 ha pour le compost.

* Contributions déterminées au niveau national au Sénégal (2020), <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/CDNSenegal%20approuv%C3%A9e-pdf.pdf>

Encadré 24.2. Contributions déterminées au niveau national au Cambodge (2020-2025)

Elle vise à réduire les émissions de GES de 41,7 % d'ici à 2030, par rapport au scénario *business as usual* (BAU) de 2016 pour les secteurs FOLU (Food and Land Use, soit agriculture, énergie, industrie et déchets). L'agriculture ne représente que 0,9 % du financement total alloué aux mesures d'atténuation, tandis que l'UTCF (Utilisation des terres, leurs changements et la forêt) représente 60 % du financement total de l'atténuation (sur un total de 5,7 milliards de dollars). En ce qui concerne les mesures d'adaptation, bien que l'agriculture soit le secteur où les actions prioritaires sont les plus nombreuses (17 actions), elle ne représente que 15 % du financement total de l'adaptation (sur un total de 2 milliards de dollars).

L'agriculture est mise en avant dans les actions prioritaires pour l'adaptation, et non pour l'atténuation, alors que c'est l'inverse pour le secteur FOLU. Les fonds nécessaires estimés sont substantiels pour le secteur FOLU dans ses actions d'atténuation, alors qu'ils sont moindres pour les actions d'adaptation de l'agriculture. La conservation des sols est bien prise en compte, notamment dans l'action d'adaptation visant à augmenter la durabilité et l'efficacité des techniques de gestion des terres agricoles par l'agriculture de conservation (objectif écrit : protéger les sols contre l'érosion ; augmenter le carbone organique des sols, etc. ; budget : environ 25 millions de dollars américains).

3. Contributions déterminées au niveau national ou CDN : engagements climatiques nationaux définis dans le cadre de l'accord de Paris par les États eux-mêmes, qui décrivent les mesures qu'ils vont prendre pour contribuer à l'objectif mondial de limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C.

(encadré 24.2), il est clair que les CDN visent essentiellement le secteur de la forêt ; bien que l'agriculture soit mentionnée, les financements destinés à la réduction des émissions de GES, incluant celles de méthane, restent faibles.

1.2. La place des émissions de méthane dans les scénarios climatiques

Afin d'évaluer le potentiel de réduction des émissions de méthane dans le futur, il est essentiel de le considérer dans le développement des scénarios climatiques. L'importance du méthane dans les scénarios climatiques de la littérature scientifique est croissante pour plusieurs raisons : (1) dans les scénarios climatiques ambitieux, les émissions autres que celles de CO₂, comme les émissions de méthane, jouent un rôle aussi important que le CO₂, et (2) l'effet à court terme d'une réduction des émissions de méthane présente des intérêts.

Dans les scénarios climatiques ambitieux de limitation du réchauffement climatique à +1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle, il est estimé une réduction des émissions de méthane biogénique⁴ de 34 % et de 42 % en 2050 par rapport à 2010 (IPCC, 2018). Ces scénarios ont en effet en commun d'atteindre l'objectif de « zéro émission nette » (tous gaz confondus) autour de 2050 et posent donc explicitement la question de la place des émissions autres que celles de CO₂ et en particulier du méthane dans les scénarios climatiques compatibles avec les engagements de l'accord de Paris. Cet objectif de zéro émission nette fait donc un lien direct entre l'objectif de réduction de méthane et l'objectif de réduction de dioxyde de carbone. Pour atteindre cet objectif (en sommant les émissions de GES et les puits de GES), l'ambition sur la réduction des émissions de méthane influence donc le budget carbone disponible (IPCC, 2018).

Mais le méthane a un rôle particulier dans les objectifs de zéro émission nette du fait de sa courte durée de vie de l'atmosphère : (1) la question de l'équivalence entre le méthane et un GES à longue durée de vie comme le CO₂ est particulièrement importante (encadré 24.3), (2) une réduction des émissions de méthane a un effet à court terme important sur la trajectoire de réchauffement climatique. Concernant ce deuxième aspect, dans les scénarios climatiques ambitieux de réduction d'émission avec un faible dépassement de la cible climatique au milieu du siècle, entre 30 % et 60 % de la réduction du réchauffement climatique des prochaines décennies (2030-2040) contiennent systématiquement des réductions des émissions de méthane (Ocko *et al.*, 2021). Cette réduction du réchauffement dans le court terme joue un rôle clé dans la stabilisation des températures à +1,5°C ou +2°C par rapport à l'ère préindustrielle, en évitant une forte augmentation de la température moyenne mondiale au milieu du siècle, qui perturberait à son tour le cycle du méthane en provoquant notamment les émissions naturelles de méthane depuis les zones humides (Peng *et al.*, 2022). Même si les émissions agricoles ne représentent qu'une partie des émissions totales de méthane (40 % des émissions anthropiques de méthane), elles représentent donc un levier important pour limiter les émissions de méthane naturelles et ainsi contribuer significativement à la lutte contre le réchauffement climatique. Cela se reflète notamment dans les débats scientifiques et politiques autour de l'utilisation des métriques d'équivalence entre le méthane et les GES à plus longue durée de vie comme le CO₂.

4. Émissions de méthane biogénique : émissions de méthane issues de la décomposition de la matière organique par des archées méthanogènes en milieu d'anaérobiose ayant principalement lieu en agriculture et dans la gestion des déchets.

Encadré 24.3. Les métriques d'équivalence du méthane

Les stratégies de réduction de GES peuvent être fixées avec un objectif commun de réduction d'émission ou avec des objectifs indépendants pour chaque gaz. Dans le cas d'un objectif commun, l'équivalent en dioxyde de carbone ou équivalent CO₂, abrégé en eqCO₂, est utilisé comme métrique d'équivalence pour comparer l'effet des émissions de divers GES sur la base de leur PRG, en convertissant les quantités d'autres gaz en une quantité équivalente de dioxyde de carbone ayant le même PRG sur une période donnée. Par exemple, le PRG100 (PRG sur 100 ans) du méthane est de 28 et celui de l'oxyde nitreux (N₂O) de 273. La particularité du méthane est sa courte durée de vie à l'opposé des autres GES comme le CO₂ et le N₂O. Le choix de la métrique d'équivalence est alors délicat, car la métrique usuellement utilisée dans les rapports du Giec (le PRG100) sous-estime l'importance du méthane à court terme. Le PRG* a été proposé pour pallier ce manque en proposant une métrique qui prend le flux et non le stock de méthane comme source de l'activité radiative du méthane, mais qui pose des questions notamment d'équité sur son utilisation (Prudhomme *et al.*, 2021). Dans ce cadre, ce n'est plus une accumulation des GES dans l'atmosphère qui provoque le réchauffement, mais le flux d'émission. Un effet neutre sur le climat n'est donc plus obtenu par une réduction des émissions à zéro (comme c'est le cas pour le CO₂), mais par une stabilisation, voire une légère diminution, en prenant en compte l'effet réchauffant du méthane sur le long terme. Pour éviter d'exacerber les débats associés aux problèmes d'équités notamment entre pays du Nord et pays du Sud avec l'utilisation de l'indicateur PRG, certains auteurs proposent de construire des cibles de réduction de méthane explicites, en plus des cibles de CO₂ et d'éviter de convertir en eqCO₂ les émissions de méthane (Prudhomme *et al.*, 2021).

2. Technologies de réduction de méthane en agriculture

2.1. Production de riz

Les systèmes de culture du riz (voir chapitre 13) stockent jusqu'à 108 t/ha de carbone organique dans le sol sur un mètre de profondeur (environ 10% plus que les sols mondiaux en général) (Liu *et al.*, 2021) et contribuent à la sécurité alimentaire à l'échelle locale et mondiale. Cependant, environ 30% du méthane (CH₄) et 11% de l'oxyde nitreux (N₂O) agricoles mondiaux sont émis par les rizières (Gupta *et al.*, 2021). En effet, ces dernières sont souvent gérées de manière intensive (c'est-à-dire qu'elles utilisent beaucoup d'intrants synthétiques : engrais, pesticides), et environ 50% des 180 Mha de riz cultivés dans le monde le sont dans des conditions d'inondation pendant au moins une partie de l'année (Bouman *et al.*, 2006). Il en résulte des conditions anoxiques et réductrices du sol, dans lesquelles la décomposition de la matière organique contribue au processus actif du cycle du carbone et de l'azote (N), entraînant des émissions de GES, en particulier de CH₄.

Récemment, Quian *et al.* (2023) ont examiné l'effet des pratiques de gestion (inondation continue, ajout de matière organique) et ont montré que les stratégies de gestion ont un potentiel d'atténuation des émissions de GES. Le passage de systèmes de riziculture intensive avec deux à trois cycles de riz par an à des systèmes de riziculture de plaine plus diversifiés se traduira par une meilleure gestion de l'eau et des nutriments et, potentiellement, par une réduction des émissions de GES. Des options telles que l'intégration de cultures pluviales autres que le riz dans le schéma de culture ou l'alternance de périodes

humides et sèches pour le riz grâce à l'irrigation sont connues pour réduire les émissions de CH_4 , mais les émissions de N_2O peuvent également augmenter considérablement, car les conditions d'aérobie sont plus adaptées à la formation de grandes quantités de N_2O . Ces pratiques agroécologiques (voir chapitre 21) permettent de produire une biomasse plus diversifiée et donc d'induire potentiellement un apport plus important de matière organique dans les systèmes de culture (Shumba *et al.*, 2023). Cependant, contrairement aux conditions pluviales, la dynamique interne du carbone (C) et de l'azote (N) du sol induit par les pratiques agroenvironnementales dans le cadre de régimes de gestion de l'eau (divers) n'est pas bien comprise, avec de nombreuses boucles de rétroaction entre le cycle du carbone et le cycle de l'azote. Dans les systèmes rizicoles, généralement caractérisés par une maîtrise partielle de l'eau dans de nombreuses régions du monde, le stockage du carbone dans le sol est souvent contrebalancé par l'augmentation des émissions de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O) (Liu *et al.*, 2021).

Une autre stratégie pour la réduction des GES est le développement de riz pluvial. L'inondation qui favorise la présence de bactéries méthanogènes n'est pas strictement nécessaire pour la croissance du riz. Ce type de riz peut être cultivé en conditions pluviales strictes sur des terres exondées à l'abri des submersions temporaires (comme pour du blé). Ainsi, un riz pluvial performant pourrait permettre de diversifier les assolements pour réduire la pression sur la ressource en eau douce et pour contribuer à réduire les émissions de méthane (voir le chapitre 5 pour une explication sur le potentiel de développement de variétés de riz qui pourraient être cultivées en conditions pluviales).

Enfin, l'alternance d'inondations et de sécheresse (AIS) est une technique bien connue qui permet de réduire de 30 % la consommation d'eau dans la production de riz : cela offre aux agriculteurs la possibilité d'abaisser leurs coûts de production sans perte de rendement, tout en diminuant les GES. L'AIS consiste à drainer périodiquement le champ jusqu'à un certain seuil, et à l'inonder à nouveau. Il a été prouvé que la technologie AIS permettait de réduire de 30 % à 70 % les émissions de GES, en particulier de méthane (CH_4), liées à la production de riz, sans entraîner de baisse de rendement. Pendant les phases sèches, les bactéries productrices de méthane sont inhibées, ce qui permet de réduire les émissions de GES. Cependant la mise en place de cette technique reste difficile en milieu paysan, où il peut être difficile de gérer le drainage des parcelles à temps. En fonction des conditions locales, le nombre de drainages et le nombre de jours où le champ n'est pas inondé varient.

2.2. Élevage de ruminants

Environ 32 % des émissions mondiales de méthane liées à l'activité de l'homme proviennent du secteur de l'élevage, et plus précisément des processus microbiens liés à la fermentation entérique chez les animaux, en particulier les ruminants, du traitement des effluents d'élevage et de la production d'aliments pour les animaux. Les émissions de méthane du secteur de l'élevage ont été estimées en 2015 à 3,4 Gt eq CO_2 , soit 54 % des émissions mondiales de GES du secteur de l'élevage : cela fait du méthane le GES le plus important de ce secteur (FAO, 2023a). Selon les auteurs, l'élevage de ruminants contribue entre 70 % (Gerber *et al.*, 2013) et 90 % (Scholtz *et al.*, 2020) des émissions de méthane du secteur de l'élevage dans le monde et le méthane entérique en est la principale source. Le méthane entérique provient du processus de fermentation issu de l'action de décomposition de la matière végétale par les micro-organismes du

rumen chez les ruminants (bovins, buffles, caprins et ovins). Plusieurs synthèses sur les émissions de méthane du secteur de l'élevage sont disponibles et décrivent en détail les différentes sources (Tedeschi *et al.*, 2022).

Selon le dernier rapport du Giec (IPCC, 2022), la réduction des émissions de CH₄ entérique provenant de la production de ruminants est un élément clé des stratégies conçues pour limiter l'augmentation de la température mondiale à +1,5°C, comme mentionné dans l'accord de Paris sur l'évolution du climat. La recherche dans le domaine de l'atténuation du méthane entérique s'est accélérée au cours des deux dernières décennies, et diverses stratégies de réduction du méthane entérique ont été étudiées : l'intensification de la production, la gestion de l'alimentation (y compris l'utilisation des concentrés, la gestion des fourrages herbacés et ligneux et des pâturages, et l'utilisation des coproduits agricoles), la manipulation du rumen, l'amélioration génétique pour améliorer la productivité et la santé des animaux, et la sélection d'animaux faiblement émetteurs de méthane entérique. Plusieurs synthèses existent dans la littérature sur les stratégies de réduction des émissions de méthane entérique (FAO, 2023b).

L'efficacité de ces stratégies varie en fonction du système d'élevage (extensif ou intensif) et de la région (tempérée ou tropicale). Il est donc important de développer des recherches sur la mesure des émissions de méthane et la prise en compte dans les inventaires des émissions de méthane dans des régions avec très peu de références comme l'Afrique subsaharienne (Assouma *et al.*, 2018; Blanfort *et al.*, 2023). C'est à ce défi que tente de répondre le projet Cassecs dans les pays sahéliens, comme décrit dans l'encadré 24.4 (voir aussi encadré 16.1). Les pays sahéliens sont très peu émetteurs de

Encadré 24.4. Calcul des facteurs d'émission de méthane dans le projet Cassecs

Dans le cadre du projet Cassecs*, des pratiques d'alimentations ont été testées pour évaluer leurs impacts sur les émissions de méthane entériques chez les bovins de race locale. Le projet a financé la mise en place d'une plateforme de mesures et de suivis des émissions de méthane entérique sur des animaux équipés d'un dispositif GrenFeed (un système mobile permettant de mesurer sur de courtes durées les gaz respiratoires émis par les ruminants) au Burkina Faso. Dans les systèmes d'élevage extensifs au Sahel, les fourrages des légumineuses arbustives sont utilisés par les éleveurs pour alimenter les ruminants. Une étude a été initiée chez les bovins complémentés avec deux principales espèces de fourrages arbustifs cultivés par les éleveurs sous forme de banque fourragère arbustive (*Leucena leucocephala* et *Gliricidia sepium*). Les résultats de cette étude montrent que la complémentation avec les fourrages de légumineuses arbustives a permis d'améliorer l'ingestion de matière sèche (MSi) journalière, la digestibilité et le gain moyen quotidien de poids vif d'une part, et de baisser d'environ 25 % les émissions de méthane entérique par kilogramme de MSi d'autre part. Ces résultats plaident pour la promotion de l'installation des banques de ligneux fourragers comme action pour l'atténuation des émissions de CH₄ en Afrique subsaharienne. Ce type de références est très utile pour accompagner les pays dans la rédaction de leur CDN (contribution déterminée au niveau national). Ces données contribuent en effet à mieux prendre en compte le secteur de l'élevage dans les stratégies d'atténuation par la réduction des émissions de méthane du secteur de l'élevage en synergie avec le rôle de l'élevage extensif dans la séquestration du carbone dans les écosystèmes pastoraux.

* <https://www.cassecs.org/>.

GES et contribuent à moins de 0,2% des émissions mondiales de GES issues des activités humaines. Ce projet est une opportunité pour cette région, car il permet à la fois de produire des références adaptées aux systèmes d'élevage extensifs de cette région, mais aussi d'explorer les principales pistes de réduction des émissions de méthane entérique.

2.3. Gestion des déjections

Le méthane est également issu de la gestion des déjections, où il est produit dans des conditions d'anaérobiose (sans oxygène dans le milieu) par des bactéries archées qui utilisent la matière organique. Les émissions de méthane liées à la gestion des déjections représentent 7,8% des émissions totales du secteur de l'élevage dans le monde (FAO, 2023a). Elles varient en fonction des systèmes d'élevage et des espèces. Les fortes émissions de méthane liées à la gestion des déjections proviennent des élevages porcins. Des synthèses dans la littérature décrivent ces formes d'émissions de méthane (FAO, 2023a). Certains systèmes de stockage liquide du lisier tels que les bassins favorisent plus la production de méthane que les systèmes ouverts qui émettent alors plus de N₂O par volatilisation.

De nombreuses stratégies ont été proposées pour réduire les émissions de CH₄ provenant de la gestion des déjections. Ces stratégies sont résumées dans le tableau 24.1.

Tableau 24.1. Les stratégies de réduction des émissions de méthane liées à la gestion des déjections des animaux d'élevage.

Les stratégies de réduction des émissions	
Valorisation du méthane sous forme de bioénergie	Collecte et captage du biogaz
	Gestion des fumures avec des biodigesteurs
Gestion et stockage des déjections	Retrait fréquent du fumier des bâtiments d'élevage ou de stockage
	Séparation des solides, utilisation de filtres et d'épurateurs
Actions sur les déjections	Refroidissement du fumier
	Acidification du fumier
	Ajout d'amendements qui inhibent la production de CH ₄
Valorisation des déjections dans la production végétale	Épandage des fumures sur les parcours et sur les sols agricoles
Aménagements spécifiques	Gestion du fumier en condition d'aérobiose
	Utilisation de filtres et d'épurateurs

3. Conclusion : l'aspect multidimensionnel du méthane

Depuis l'accord de Paris et l'engagement mondial sur le méthane (le Global Methane Pledge), les émissions de méthane sont soumises à une attention particulière, car (1) la réduction des émissions de ce GES à courte durée de vie permet de limiter le réchauffement dans le court terme et (2) elles sont intrinsèquement liées aux émissions de GES à longue durée que sont le CO₂ et le N₂O.

La gestion des émissions de méthane affecte directement les émissions de CO₂ par plusieurs canaux : (1) les émissions de méthane sont souvent associées à des émissions

de CO₂ (émissions de bétail) ou de N₂O (émissions du riz) par le biais de processus d'émission conjoints, (2) le méthane fait partie de stratégies générales de réduction d'émissions de GES, où l'on retrouve des cibles de réduction de CO₂. L'effet final sur le réchauffement climatique de ces pratiques de réduction d'émissions de méthane doit donc inclure les effets sur les émissions de CO₂ en intégrant également une réflexion sur les métriques d'équivalence (encadré 24.3) et (3) ces émissions de méthane sont étroitement liées à plusieurs dimensions du développement durable.

En effet, les émissions de méthane sont intimement associées aux dimensions de la sécurité alimentaire et de la lutte contre la pauvreté. De fait, la production de riz est au centre des stratégies de sécurité alimentaire de certains pays, comme l'Inde, et l'élevage est au centre des stratégies de nombreux agriculteurs dans les pays en développement pour assurer leur sécurité alimentaire et leurs apports nutritionnels (voir chapitre 16). Il permet également de lutter contre la pauvreté dans ces zones rurales en assurant des revenus aux éleveurs. Bien que non évoquée dans ce chapitre, la gestion des émissions de méthane associées aux zones humides affecterait alors aussi la biodiversité de ces zones.

Au sujet du climat, la reconnaissance et la prise en compte de cet aspect multidimensionnel des émissions de méthane permettraient de mieux comprendre les difficultés rencontrées dans les arènes des négociations internationales, comme les négociations sur le climat.

4. Références bibliographiques

- Assouma M.H., Lecomte P., Hiernaux P., Ickowicz A., Corniaux C., Decruyenaere V., *et al.*, 2018. How to better account for livestock diversity and fodder seasonality in assessing the fodder intake of livestock grazing semi-arid sub-Saharan Africa rangelands. *Livestock Science*, 216, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.07.002>
- Blanfort V., Assouma M.H., Bois B., Edouard-Rambaut L.-A., Vayssières J., Vigne M., 2023. Efficiency to account for the complexity of the contributions of livestock grazing systems to climate change. In: Ickowicz A., Moulin C.-H. (eds.), *Livestock grazing systems and sustainable development in the Mediterranean and tropical areas. Recent knowledge on their strengths and weaknesses*. Versailles, éditions Quæ, 82-99.
- Bouman B.A.M., Yang X., Wang H., Wang Z., Zhao J., Chen B., 2006. Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. *Field Crops Res.* 97, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.08.015>
- Crippa M., Guizzardi D., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Monforti-Ferrario F., *et al.*, 2023. GHG emissions of all world countries. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/235266>
- FAO, 2023a. Methane emissions in livestock and rice systems – Sources, quantification, mitigation and metrics. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>
- FAO, 2023b. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., *et al.*, 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 115 p.
- Gupta K., Kumar R., Baruah K.K., Hazarika S., Karmakar S., Bordoloi N., 2021. Greenhouse gas emission from rice fields: a review from Indian context. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 30551-30572. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13935-1>
- IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Liu Y., Ge T., van Groenigen K.J., Yang Y., Wang P., Cheng K., *et al.*, 2021. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. *Commun. Earth Environ.* 2, 154. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>

Malley C.S., Borgford-Parnell N., Haeussling S., Howard I.C., Lefèvre E.N., Kuylentierna J.C.I., 2023. A Roadmap to Achieve the Global Methane Pledge. *Environmental Research: Climate*, 2(1): 011003. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/acb4b4>

Ocko I.B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A.N., Pacala S.W., *et al.*, 2021. Acting Rapidly to Deploy Readily Available Methane Mitigation Measures by Sector Can Immediately Slow Global Warming. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf9c8>

Peng S., Lin X., Thompson R.L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., *et al.*, 2022. Wetland Emission and Atmospheric Sink Changes Explain Methane Growth in 2020. *Nature*, 612(7940), 477-82. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>

Prudhomme R., O'Donoghue C., Ryan M., Styles D., 2021. Defining National Biogenic Methane Targets: Implications for National Food Production & Climate Neutrality Objectives. *Journal of Environmental Management*, 295: 113058. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113058>

Qian H., Zhu X., Huang S., Linquist B., Kuzyakov Y., Wassmann R., *et al.*, 2023. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4, 716-732. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00482-1>

Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Jackson R.B., *et al.*, 2020. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth System Science Data*, 12, 3: 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

Scholtz M.M., Naser F.W.C., Makgahlela M.L., 2020. A balanced perspective on the importance of extensive ruminant production for human nutrition and livelihoods and its contribution to greenhouse gas emissions. *South African Journal of Science*, 116(9/10). <https://doi.org/10.17159/sajs.2020/8192>

Shumba A., Chikowo R., Corbeels M., Six J., Thierfelder C., Cardinael R., 2023. Long-Term Tillage, Residue Management and Crop Rotation Impacts on N₂O and CH₄ Emissions from Two Contrasting Soils in Sub-Humid Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 341: 108207. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108207>

Tedeschi L.O., Abdalla A.L., Álvarez C., Anuga S.W., Arango J., Beauchemin K.A., *et al.*, 2022. Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. *Journal of Animal Science*, 100(7), skac197.

Tollefson J., 2022. Scientists Raise Alarm over 'Dangerously Fast' Growth in Atmospheric Methane. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00312-2>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2022., Greenhouse Gas Data Interface, available at: <https://di.unfccc.int/>

Chapitre 25

L'hétérogénéité des voies d'institutionnalisation des politiques et des instruments climatiques pour l'agriculture : une comparaison entre le Sénégal, la Colombie, le Brésil et la France

*Marie Hrabanski, Jean François Le Coq, Gilles Massardier,
Carolina Milhorange, Yves Montouroy, Éric Sabourin*

Face à l'urgence, les questions d'atténuation et d'adaptation de nos sociétés au changement climatique constituent désormais des enjeux majeurs pour les politiques publiques aux Nords et aux Suds. Les premiers plans nationaux d'adaptation au changement climatique ont émergé dans les années 2000 (en 2004 en France, en 2006 au Sénégal, en 2011 en Colombie et au Brésil), dont une partie incluait l'agriculture. Puis l'accord de Paris, en 2015, demandait aux pays signataires de déposer leur contribution déterminée au niveau national (CDN), afin de réduire les émissions au niveau mondial. C'est donc principalement à l'échelle nationale que l'intégration des enjeux climatiques liés à l'agriculture a été promue dans les pays des Nords et des Suds. En 2020, plus de 90% de ces CDN incluait l'adaptation de l'agriculture au changement climatique (AACC) et environ 80% d'entre elles identifiaient des objectifs d'atténuation dans le secteur agricole. On notera aussi qu'en 2023 la majorité des pays développés (62%) ne présentait aucune mesure liée aux systèmes alimentaires dans leur CDN. La déclaration sur les systèmes alimentaires de la COP28 de Dubai devrait toutefois permettre que ceux-ci soient davantage intégrés dans les stratégies nationales des États. (voir chapitres 2 et 23). Malgré ces efforts, la vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques est croissante (OECD, 2023) : les dispositifs pour les gérer doivent être développés et améliorés.

Ce chapitre analyse comment les voies d'institutionnalisation des politiques climatiques propres à chaque pays expliquent les blocages institutionnels qui entravent la mise en œuvre au concret de l'action publique (Hrabanski et Montouroy, 2022). Ces voies d'institutionnalisation seront analysées dans quatre pays (Colombie, Brésil, France et Sénégal) et comparées selon les cinq variables suivantes : (1) le type de cadrage de la problématique climatique dans l'agriculture (place de l'atténuation vs l'adaptation, concepts principaux mobilisés dans les documents de politiques d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture au changement climatique [AAACC], hiérarchisation des problèmes publics); (2) le degré de proactivité vis-à-vis du changement climatique (pays proactifs vs pays réactifs ou suiveurs de l'agenda climatique international) et les dynamiques d'extraversion (influences internationales) ou d'endogénéisation (logiques internes) dans la mise en œuvre des politiques d'AAACC; (3) l'intégration

(intersectorielle) des dispositifs ou au contraire leur caractère sectoriel (uniquement agricole); (4) les types d'instruments disponibles¹, réglementaires, incitatifs, informationnels (Vedung, 1998) ou encore combinant différents types d'instruments (Pacheco-Vega, 2020), et (5) leur degré d'innovation.

Ce chapitre analyse l'hétérogénéité des voies d'institutionnalisation des enjeux climatiques pour l'agriculture dans ces quatre contextes nationaux du Sud et du Nord. Il est structuré en trois parties. La première analysera, pour les quatre pays, les trois variables suivantes : le cadrage, l'extraversion et l'intégration. La seconde partie examinera les deux dernières variables : instruments d'action publique et innovation. Enfin, la troisième partie visera à discuter les résultats afin de comprendre le lien entre la variété nationale des voies d'institutionnalisation et la capacité de transition des pays vers l'AAACC. Le chapitre, tout en abordant à la fois les enjeux liés à l'institutionnalisation des politiques d'adaptation et des politiques d'atténuation, se focalise davantage sur les premières.

1. Institutionnalisation des politiques de transition agricole : cadrage, degré d'extraversion et d'intégration

1.1. En Colombie, une institutionnalisation extravertie peu coordonnée

En Colombie, un premier instrument climatique dédié à la problématique de l'adaptation a été créé en 2011, le Fonds national d'adaptation (Milhorce *et al.*, 2022b), et un plan national d'adaptation (PNA) a été formulé puis lancé en 2011. Le gouvernement souhaitait donner une architecture multisectorielle et intégrée à cet enjeu, à un haut niveau (Sisclima, Sistema Nacional de Cambio Climático) : la responsabilité de la construction des politiques climatiques a été transférée du ministère de l'Environnement au département de la Planification nationale (DNP), et le Plan national de développement 2010-2014 a été reformulé pour tenir compte du changement climatique dans le but de construire une action climatique transversale et coordonnée à l'échelle des ministères.

Pour autant, une dynamique d'extraversion peu coordonnée va orienter le travail des ministères pour la transition agroécologique et climatique. Des acteurs extranationaux sont intervenus dans les processus de climatisation des politiques sectorielles existants, puisque le Centre international d'agriculture tropicale (Ciat) a préconisé la *climate-smart agriculture* auprès du département de la Planification nationale dès les années 2010, la FAO a promu dans le même temps le concept de résilience climatique au ministère de l'Agriculture, l'Usaid (Agence des États-Unis pour le développement international) a également contribué à cette diversification des approches en promouvant la résilience auprès des ministères des Mines et de l'Énergie, de l'Eau, et du Logement, illustrant ainsi l'application du concept de résilience dans des contextes variés. En parallèle, les ONG WWF (World Wide Fund for Nature) et le TNC (The Nature Conservancy) ont encouragé pour leur part l'adoption de l'adaptation fondée sur les écosystèmes par le ministère de l'Environnement, soulignant l'importance de protéger la biodiversité. L'agroécologie n'est pas une notion clé dans le PNA

1. À partir de trois projets de recherche (MUSE Typoclim, Tackling CC, ANR Artimix) menés entre 2018 et 2022.

colombien. Malgré l'intégration formelle dans le PNA, l'absence de mesures concrètes de mise en œuvre suggère une application plus symbolique qu'efficace de ces concepts (Milhorce *et al.*, 2022b ; Howland et le Coq, 2022).

Pour autant, malgré ces efforts conceptuels, le PNA colombien de 2011 n'est pas conçu comme un plan directement opérationnel et manque de coordination. Il est composé de plusieurs documents qui incitent certes à la formulation de politiques sectorielles et territoriales, en fournissant des outils méthodologiques afin que les administrations compétentes prennent des décisions éclairées sur les enjeux climatiques, mais cette multiplication de documents sectoriels est source de dynamiques sectorielles disparates, selon les intérêts des acteurs concernés. Par ailleurs, le processus d'élaboration du PNA a été à la fois bureaucratique, non participatif (Milhorce *et al.*, 2022b) et extraverti, c'est-à-dire qu'il a émané de dynamiques extérieures à la Colombie. Les acteurs de la coopération internationale (la Banque interaméricaine de développement, la Banque mondiale, le Programme des Nations unies pour le développement et l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO]) y jouent un rôle de premier plan, en apportant un soutien technique et financier. Le gouvernement colombien a promu la politique climatique de manière opportuniste, de façon à renforcer les accords de paix au niveau territorial, d'attirer les investissements internationaux et de soutenir le dialogue du pays avec la communauté internationale (Bustos, 2018).

Au total, la mise en œuvre des politiques climatiques en Colombie est marquée par une coupure nette entre les niveaux nationaux (principalement basés sur les recommandations internationales générales décontextualisées (Mariño, 2011) et les niveaux locaux. En dépit de multiples comités *ad hoc*, on observe en effet un manque de coordination entre les institutions sectorielles et territoriales. Enfin, la mise en œuvre des politiques reste limitée en l'absence d'engagement politique et de budget additionnel alloué à leur mise en œuvre.

1.2. Au Sénégal : l'institutionnalisation des questions climatiques en compétition avec la sécurité alimentaire

Après la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1992, l'agenda climatique se structure à l'échelle internationale, et le Sénégal, en tant que pays sous régime d'aide (Lavigne Delville, 2017), va intégrer ces nouvelles recommandations (Boutroue *et al.*, 2022). Cette approche se concrétise à partir de 2006 par la rédaction d'un plan d'action national pour l'adaptation (PANA) et, en complémentarité, le Sénégal s'est engagé dans le processus d'élaboration de son plan national d'adaptation (PNA) à partir de 2015. L'intégration de la question climatique dans le secteur agricole repose d'abord sur la mobilisation de la notion d'agriculture intelligente face au climat (CSA), puis sur la promotion de l'agroécologie (Milhorce *et al.*, 2022a). Ces deux notions participent à l'institutionnalisation des enjeux climatiques dans les politiques agricoles au Sénégal (Boutroue *et al.*, 2022) et marquent plus largement la volonté d'associer les enjeux climatiques (adaptation et atténuation) et les enjeux de sécurité alimentaire. Toutefois les stratégies avancées demeurent prioritairement tournées vers le productivisme agricole et la sécurité alimentaire, sans que ces objectifs prioritaires ne soient nécessairement combinés à des objectifs d'adaptation.

En matière d'extraversion, de nombreux partenaires techniques et financiers supranationaux sont engagés pour soutenir le Sénégal dans l'élaboration de son PNA : l'Usaid a soutenu et financé le ministère des Pêches entre 2016 et 2018 pour l'élaboration de son PNA pêche, de même l'AFD (Agence française de développement), depuis 2018, propose un appui à travers le projet Adapt'Action. D'autres initiatives portées par l'agence de coopération internationale allemande pour le développement (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit ou GIZ), la FAO, le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD) ou le Fonds vert pour le climat, etc., y sont développées, soulignant ainsi l'extrême dépendance du Sénégal vis-à-vis des partenaires extranationaux.

Enfin, en matière d'intégration institutionnelle, le plan national d'adaptation au Sénégal a adopté une démarche sectorielle et participative, sous la coordination du ministère de l'Environnement et du Développement durable. La dynamique d'intégration institutionnelle des enjeux climatiques est toutefois marquée par une compétition institutionnelle entre, d'un côté, le Comité de suivi écologique (CSE), qui, en tant qu'acteur opérationnel du ministère de l'Environnement, défend un cadrage environnemental des questions climatiques et, de l'autre, l'Anacim (Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie) qui cadre d'abord le problème de l'adaptation sous l'angle de la sécurité alimentaire, en lien avec ses intérêts institutionnels et ses compétences professionnelles (Boutroue *et al.*, 2022).

1.3. Au Brésil, l'institutionnalisation d'un nouveau problème dans des secteurs routinisés

L'évolution de la politique climatique brésilienne, influencée par l'agenda international, s'est manifestée dès la ratification de la CCNUCC en 1992. La diplomatie brésilienne a été proactive en matière de climat, mettant en avant la responsabilité des pays développés dans la réduction des émissions dès 1992, tout en résistant à l'inclusion des crédits carbone pour la déforestation évitée REDD+ (réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts). Cette approche reflète les tensions internes au Brésil : le secteur de l'agrobusiness souhaite en effet éviter les restrictions liées à la conversion des terres agricoles en forêt, afin de favoriser l'expansion agricole des cultures de soja et de l'élevage bovin (Friberg, 2009 ; Lahsen, 2009).

Sous l'administration Lula, une série de plans a été lancée. Le plan national sur le changement climatique en 2008 visait à réduire les émissions, notamment en Amazonie (Gallo et Albrecht, 2018). Le plan Agriculture bas-carbone a, quant à lui, surtout mis l'accent sur l'atténuation, tandis que le plan national d'adaptation au changement climatique (PNA) a été établi en 2016. Ces politiques climatiques adoptaient une approche intersectorielle. Chaque partie traitait à la fois de secteurs distincts et d'enjeux transversaux, mais avec un manque notable de coordination et d'intégration effective entre les différentes dimensions de ces stratégies. Plus encore, les conflits autour de l'utilisation des terres ont rapidement entravé ces efforts (Zellhuber, 2016).

Le PNA a, dans une certaine mesure, ciblé des enjeux parfois contradictoires et liés à des spécificités régionales (Milhorance *et al.*, 2022b). Ainsi, le plan ABC pour l'agriculture à faible émission de carbone s'est concentré sur le secteur de l'agrobusiness dans le Cerrado (région du Centre-Ouest), s'inspirant dans un premier temps des principes d'agriculture intelligente face au climat, intégrant adaptation, atténuation et productivité

(Lipper *et al.*, 2014). Ce secteur favorise notamment l'innovation technologique pour accroître la compétitivité internationale de ses produits, contrastant avec les difficultés institutionnelles et financières rencontrées par les initiatives d'agroécologie et de conservation (voir chapitre 3). En parallèle, l'approche de l'adaptation dans la région du Nord-Est a privilégié l'agroécologie et l'amélioration de l'accès à l'eau pour les exploitations familiales (Sabourin *et al.*, 2022), s'alignant sur une démarche d'adaptation reposant sur la résilience socio-écologique (Brazil, 2016; Monteiro *et al.*, 2022). Dans le Nord (Amazonie), l'accent a été mis sur la conservation des services environnementaux des forêts tropicales, essentiels pour les populations autochtones (Brazil, 2016).

Ainsi, le cadrage de la politique climatique s'inscrit dans un processus politique complexe de négociations, où se confrontent divers intérêts sectoriels et différentes approches du développement (Milhorance *et al.*, 2022b).

1.4. En France : une institutionnalisation multiniveau et négociée à l'échelle nationale et territoriale

En France, l'intégration des objectifs climatiques résulte de processus multiniveaux complexes, à la fois européens, nationaux et territoriaux. Récemment, la nouvelle PAC (période 2023-2027) a confirmé les objectifs climatiques européens, dans la logique du pacte vert européen qui veut «réduire l'empreinte climatique» (Hrabanski *et al.*, 2025). Toutefois, dans les faits, le renouveau climatique de la PAC est limité par la prévalence du triptyque, croissance, productivité et compétitivité sur lequel repose la PAC (Bodiguel, 2014). D'autres enjeux environnementaux (biodiversité, eau, produits phytosanitaires, etc.) et non environnementaux (cohésion entre les territoires, équilibre budgétaire, etc.) viennent également concurrencer l'enjeu climatique (Sabourin *et al.*, 2018; Biabiany *et al.*, 2022; Montouroy *et al.*, 2022). À l'échelle nationale, jusqu'au milieu des années 2010, la mise à l'agenda des questions climatiques dans le secteur agricole est timide et tardive. Un premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) est adopté en 2011 puis, à la suite de l'accord de Paris (2015), l'adaptation de l'agriculture et les enjeux d'atténuation sont placés en haut de l'agenda politique, comme l'illustre le lancement de l'Initiative «4 pour 1000» (Demenois *et al.*, 2022)². L'AACC attire toutefois davantage l'attention des décideurs publics tant les enjeux économiques, politiques, alimentaires et environnementaux s'imposent, poussés aussi par la mobilisation des professionnels dont beaucoup sont fragilisés par les épisodes extrêmes (sécheresses, grêles, etc.) qui se succèdent depuis la fin des années 2010 (Dantec et Roux, 2019). Un PNACC-2³ (2018-2022) est adopté. Plusieurs rapports parlementaires maintiennent l'adaptation de l'agriculture en haut de l'agenda politique. C'est dans ce contexte politique, et dans une période de raréfaction accrue de l'eau, qu'est lancé le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique (2022). La conséquence directe du changement climatique sur le monde agricole et rural est la complexification de la gouvernance. Trois logiques, parallèles ou articulées selon les dispositifs, gouvernent cette transition climatique, dévoilant

2. Objectif : création d'un réseau scientifique pour développer une stratégie de stockage du carbone dans les sols agricoles. <https://4p1000.org/>.

3. Le PNACC-2 (2018-2022) propose une série de moyens au service de l'AACC, déclinés en six domaines d'action : gouvernance, connaissance et information, prévention et résilience, filières économiques, nature et milieux, et international.

ainsi une architecture multiniveau baroque (Hrabanski *et al.*, 2025) : des aides européennes conditionnées ; une planification nationale et des planifications territorialisées imbriquées qui cherchent à intégrer, c'est-à-dire à déssectoriser, la gestion de la question climatique ; et *a contrario* des aides sectorielles, voire « filiarisées », et souvent négociées selon la logique prégnante dans l'agriculture française de coproduction néocorporatiste des dispositifs, par l'intermédiaire de la fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles (FNSEA) (Muller, 2000 ; Montouroy *et al.*, 2022).

2. L'institutionnalisation politique du problème climatique analysée selon le type d'instrument et leur degré d'innovation

Réalisé en 2019⁴, un inventaire des instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique a été élaboré dans les quatre pays étudiés. Si les instruments d'atténuation n'ont pas été recensés, cet inventaire permet d'identifier concrètement les dispositifs et les outils disponibles pour l'adaptation et, ce faisant, la capacité des États à faire face à ce nouveau problème.

2.1. En Colombie, de nombreuses innovations, mais une mise en œuvre locale fragmentée et dépendante des bailleurs extranationaux

Actuellement, le PNA colombien est largement mis en œuvre par des ONG nationales et financé par le Fonds vert pour le climat, tandis que le gouvernement national joue un rôle de coordination. Le manque de moyens gouvernementaux pour atteindre les objectifs en matière de changement climatique était déjà connu au niveau gouvernemental, et les acteurs des secteurs et des territoires étaient donc invités à rechercher des partenariats avec le secteur privé et avec les donateurs internationaux afin de financer sa mise en œuvre.

L'inventaire des instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique en Colombie a permis d'identifier une trentaine d'instruments réservés à cette cause. L'analyse des instruments d'adaptation au changement climatique en Colombie montre clairement une forte capacité d'innovation instrumentale : en effet, 90 % de la trentaine d'instruments identifiés pour l'adaptation au changement climatique ont été créés après 2009 (Noblanc, 2019). Ces instruments ne reposent pas sur la réglementation ou sur la contrainte. Ils sont plutôt incitatifs et informationnels, telles les tables de concertation et de diffusion des informations climatiques dans le département de Cauca en Colombie (Martinez Tintinago, 2019 ; Osorio-García *et al.*, 2019). Enfin, de manière contre-intuitive étant donné le caractère largement extraverti de la Colombie, l'intermittence des financements est relative puisque les instruments pérennes sont finalement majoritaires.

Le PNA colombien a intégré des stratégies internationales alignées avec la notion de CSA et a mis en place de nouveaux instruments, notamment des cadres de concertation.

4. Les instruments de politique publique sont ici définis comme un « ensemble de techniques par lesquelles les autorités gouvernementales exercent leur pouvoir en essayant d'assurer, de soutenir et d'affecter ou de prévenir le changement social [...] à des fins que les autorités poursuivent » (Vedung, 1998 ; p. 21). Les instruments sont donc des outils techniques qui, articulés entre eux, constituent ensemble une politique, un programme ou un dispositif tendant vers un objectif politiquement identifié : une règle particulière, une incitation, une taxe, une ligne budgétaire, etc.

Cependant, malgré cette innovation, le plan manque de mesures concrètes pour leur réalisation et leur mise en œuvre effective. Le PNA a été élaboré par le gouvernement au niveau national, avec une implication principalement limitée au personnel technique. La participation de la société civile et des décideurs sectoriels clés, qui auraient pu attribuer un budget spécifique au plan, a été insuffisante. Le soutien technique des consultants internationaux s'est restreint à la création de documents politiques et de rapports d'études.

La tendance à privilégier l'élaboration de nouveaux cadres normatifs plutôt que leur application pratique a été soulignée par les personnels du DNP, les planificateurs du ministère de l'Agriculture et les consultants internationaux (Milhorange *et al.*, 2022b). Un responsable du ministère de l'Agriculture a admis que si la Colombie est « exemplaire sur le papier, avec des lois bien établies, la mise en application fait défaut faute de financement ». En fin de compte, d'une part, le budget alloué par le gouvernement au changement climatique reste limité, même si certaines politiques, comme la loi sur la frontière agricole de 2018 ou la stratégie de croissance verte (Conpes 3934), offrent un cadre pour intégrer les enjeux climatiques. D'autre part, la mise en œuvre de la politique d'adaptation au changement climatique au niveau des territoires s'entremêle avec l'agenda du « post-conflit ». En effet, les politiques climatiques mettent en lumière un fossé entre les orientations de politique construites à l'échelle nationale et leurs expressions locales. En outre, les dispositifs qui sont localement mis en œuvre sont fragmentés, discontinus et répondent à des jeux de pouvoir entre différents acteurs du développement pour imprimer leur protagonisme dans les territoires (Howland, 2022).

2.2. Au Sénégal, des innovations limitées par le gouvernement par projet

L'inventaire des instruments d'adaptation au Sénégal souligne un nombre important de projets consacrés officiellement à l'adaptation de l'agriculture au changement climatique (une trentaine entre 2006 et 2022), financés par des bailleurs extranationaux. Aucun de ces instruments ne repose toutefois sur la réglementation ou la contrainte. Ce sont des instruments dits informationnels, qui reposent sur la diffusion et l'échange d'informations sur le changement climatique (plateformes sur la *climate-smart agriculture*, CCASA ou le Plan climat territorial intégré, PCTI). Des instruments incitatifs sont mis en œuvre, à l'exemple du programme Un million de citernes pour le Sahel de la FAO ou encore du Projet de renforcement de la gestion des terres et des écosystèmes (PRGTE) dans les Niayes et en Casamance. Certains des instruments combinent ces deux dimensions.

L'analyse des instruments d'adaptation au Sénégal permet également d'observer que la majorité des instruments identifiés sont nouveaux (créés après le premier plan d'adaptation de 2006). Cette dynamique d'innovation instrumentale est relativisée au regard du fonctionnement par projet qui caractérise les pays sous régime d'aide. Excepté les assurances indicelles, ces instruments sont intégrés à des projets de développement, considérés comme des types de politiques publiques (Lavigne Delville, 2017). La prédominance des acteurs extranationaux et le mode de gouvernance par projet pèsent sur la coordination et sur l'intégration des politiques d'adaptation au Sénégal, notamment du fait des risques de variabilité et de précarité de ces projets, de leurs visions court-termistes, de leur potentielle incohérence et des risques d'inégalités territoriales qui peuvent en découler (Boutroue *et al.*, 2022). Enfin, si de nombreux nouveaux projets

émergent en faveur de l'adaptation de l'agriculture sénégalaise au changement climatique, les enquêtes empiriques réalisées permettent aussi de souligner que la mise en œuvre de ces projets fait parfois défaut parce qu'elle est souvent peu conforme aux attentes des agriculteurs.

2.3. Au Brésil, un saupoudrage de nouveaux instruments d'adaptation sans réforme systémique

L'analyse des instruments d'adaptation au Brésil met en avant deux résultats majeurs. D'une part, on remarque comme dans les autres cas d'études un intérêt marqué pour les instruments incitatifs. L'accent gouvernemental a été mis en effet sur des instruments incitatifs tels que le crédit pour une faible émission de carbone (crédit ABC). Cependant, l'accès à cette ligne de crédit ne représente que 1 % du montant total du crédit rural alloué entre 2010 et 2018. Avec des taux d'intérêt élevés (8,5 % en 2016-2017, réduits à 6 % en 2018-2019), il reste moins attractif que les crédits pour l'agriculture conventionnelle, ces derniers étant par ailleurs moins bureaucratiques et complexes. En comparaison, les petits agriculteurs et les communautés traditionnelles manquent nettement de financements adaptés pour une production durable. Malgré la priorité donnée aux instruments incitatifs et informationnels, les instruments réglementaires demeurent importants, suscitant de fortes tensions entre les acteurs.

D'autre part, ce qui frappe, c'est le recyclage des politiques existantes et la faiblesse des nouveaux instruments destinés spécifiquement à l'adaptation de l'agriculture. La politique climatique brésilienne a connu en effet une superposition de nouveaux objectifs climatiques aux politiques existantes, sans changer fondamentalement les cadres d'action (Milhorange, 2020). Par conséquent, l'innovation instrumentale est limitée : le gouvernement a surtout recyclé des instruments existants. De même, des subventions à l'agrobusiness ont été requalifiées de façon qu'elles correspondent aux nouveaux objectifs climatiques des politiques agricoles. Par exemple, l'agrobusiness a promu des mesures comme le soutien à la transformation technologique pour une agriculture à faible émission de carbone et la réhabilitation des zones et pâturages dégradés, qui reconduisent finalement des pratiques d'amélioration de la productivité agricole, sans une refonte systémique. Dans le PNA, ce concept repose sur une production agro-industrielle dépendante des intrants agricoles, d'une mécanisation lourde, même si de précision, et de l'énergie fossile (pétrole, gaz, engrais chimiques).

2.4. En France : quelques innovations, de nombreux recyclages

L'analyse des instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique en France met en avant trois résultats majeurs. Le premier témoigne d'une préférence marquée pour les instruments de type incitatif, pour les instruments de type informationnel, et pour l'association de ces deux modalités d'instruments (Pacheco-Vega, 2020). Les instruments incitatifs recouvrent principalement des dispositifs d'aide financière (mesures agroenvironnementales et climatiques ou Maec, assurances multirisques climatiques, etc.). Conçus au niveau européen et régional dans le cadre de la PAC, et au niveau national pour les instruments à l'initiative du ministère de l'Agriculture et des établissements publics agricoles, les instruments incitatifs ciblent directement les agriculteurs et les organisations professionnelles (OP). Les instruments

informationnels sont des observatoires (Oracle, Clima-XXI, observatoire viticole, etc.) ou des mesures visant à diffuser de l'information pour faire évoluer les cadrages du problème du changement climatique chez les agriculteurs.

Le deuxième résultat a trait au fait que les instruments d'adaptation sont principalement des instruments sectoriels : la structuration historique du secteur agricole, lequel dispose de nombreuses organisations qui encadrent la profession sur les territoires (conseils agricoles, chambres d'agriculture, syndicats, organisations des filières, etc.), permet de proposer rapidement des instruments conçus vers l'adaptation. La gouvernance multisectorielle de l'adaptation se heurte donc en France à des secteurs particulièrement bien organisés et structurés. Cette action collective complexifie certes le dialogue et la prise en compte des enjeux non sectoriels, mais elle permet d'intégrer rapidement l'enjeu climatique aux objectifs et aux instruments régulant les pratiques agricoles, au moins dans sa rhétorique.

Le troisième résultat pousse toutefois à relativiser cette capacité d'innovation du secteur agricole, dans la mesure où, en France, beaucoup d'instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique sont en réalité recyclés. En utilisant des instruments déjà existants pour opérationnaliser l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, les pouvoirs publics recyclent des dispositifs créés au préalable avec d'autres objectifs en y intégrant une dimension climatique. Ainsi, les mesures agroenvironnementales territorialisées (Maet) sont devenues des mesures agroenvironnementales et climatiques (Maec) en 2014, mais de nombreux professionnels restent perplexes quant à l'impact climatique de ces mesures sur le terrain à la suite de l'ajout du *c*. Ces évolutions, que marquent les sigles et les registres de justification des instruments, ne sont pas toujours suivies d'une application concrète en matière d'adaptation (Hrabanski *et al.*, 2025). Pire, le contenu des mesures européennes étant localement négocié, ces instruments peuvent même être capturés par des filières collectivement organisées qui y trouvent les subsides nécessaires au soutien de la rentabilité de leurs exploitations, sans pour autant opérationnaliser une transition climatique (Montouroy *et al.*, 2022).

3. Constats et pistes pour des politiques transformationnelles

Sous l'influence des recommandations internationales, les quatre pays étudiés ont grandement intégré l'adaptation et l'atténuation dans les agendas politiques nationaux, adoptant aussi de nouvelles normes et objectifs en faveur de la transition agricole. Ces cas soulignent que ces logiques demeurent imbriquées dans celle du secteur agricole, et ce, malgré la promotion internationale de la gouvernance multisectorielle, plus propice à une adaptation des institutions aux enjeux climatiques dans une optique d'« *adaptive governance* » (Chaffin et Gunderson, 2016; Koontz *et al.*, 2015). Quatre constats communs émergent. Le premier est que des objectifs climatiques sont aujourd'hui institutionnalisés, quels que soient les pays. Toutefois, et c'est notre deuxième constat, on comprend que, selon les pays, les voies d'institutionnalisation empêchent, chacune à leur manière, les capacités transformationnelles. Au Sénégal et en Colombie, la voie extravertie et sa logique de projets, « mélange d'opportunisme et de coercition qui caractérise le fait de se conformer aux politiques publiques internationales » (Siméant-Germanos, 2019), impliquent le plus souvent des financements non pérennes dans le temps et inégalitaires dans l'espace. Si nombre de nouveaux instruments d'adaptation

y ont été promus, cette institutionnalisation dans et par les ministères, dans les rhétoriques politiques et dans les documents officiels ne s'accompagne pas d'un changement concret. Le modèle d'institutionnalisation français, de son côté, se caractérise à la fois par un processus de planification homogène et sectoriel, mais il engendre un recyclage incrémental, c'est-à-dire par petits pas, certes plus pérenne, mais fortement dépendant des logiques sectorielles existantes et des rapports de force à l'œuvre. Idem au Brésil, sous le parapluie du regroupement de plans plurisectoriels préexistants, le gouvernement délègue aux acteurs locaux le soin de bricoler des dispositifs territorialement inégalitaires et soumis à la complexité institutionnelle multiniveau (fédérale et nationale). Le troisième constat est que les modèles de production agricole nationaux sont peu remis en cause par ces dispositifs, quels que soient les pays. Au Brésil, les objectifs du changement climatique dans le secteur agricole sont rassemblés dans un seul plan, dans lequel se confrontent les tenants de l'agroécologie paysanne et ceux de l'agro-business bas-carbone. Or, l'adaptation au changement climatique réclame des réformes systémiques qui doivent remettre en question les modèles agricoles existants. De même, en France, si les politiques agricoles de transition entretiennent la logique d'écologisation de la PAC, se pose toutefois la question de la sortie du modèle agricole actuel qui, construit à partir d'un cadre technologique moderniste et tourné vers l'exportation, ne permet pas une adaptation transformative comme recommandé pourtant par les travaux du Giec. Enfin, et quatrième, nous constatons que dans l'ensemble des pays étudiés le changement climatique fait l'objet d'une hiérarchisation face à d'autres enjeux (Hrabanski et Montouroy, 2022). La sécurité alimentaire, la production agricole, la biodiversité, l'énergie, les enjeux liés à l'eau et à la justice climatique sont autant de problèmes publics qui peuvent entrer en compétition politique et faire l'objet de luttes institutionnelles entre différents acteurs politiques.

Pour aller vers des politiques transformatives, des compromis complexes s'imposent. Ce chemin dépend de la capacité à trouver les équilibres entre le recours à la gouvernance locale et l'usage d'impulsions homogènes sur l'ensemble des territoires (planificatrice) depuis les États pour éviter les inégalités territoriales (Brésil, Colombie, Sénégal) ; entre le renforcement des financements et la fabrication de dispositifs pérennes (Colombie, Sénégal) ; entre le volontarisme planificateur multisectoriel et la décharge de mise en œuvre sur le secteur agricole (France) ; entre la technicité des décisions et des instruments et la politisation des enjeux. On le voit donc, les questions de l'AAACC et de la transition ne sauraient être seulement dépendantes des variables technologiques et financières, mais aussi fortement liées à celle de la gouvernance de ces dispositifs d'accompagnement public.

4. Références bibliographiques

- Biabiany O., Massardier G., Montouroy Y., 2022. The implementation process of agriculture adaptation instruments to climate change. The invisibilization of European climate policy goals in French West Indies' banana Chain. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(6), 1181-1193.
- Bodiguel L., 2014. Lutter contre le changement climatique : le nouveau leitmotiv de la politique agricole commune. *Revue de l'Union Européenne*, (580), 414-426.
- Boutroue B., Hrabanski M., Diao Camara A., 2022. Gouverner l'adaptation de l'agriculture au changement climatique par projet? Les limites de la climatisation des politiques agricoles au Sénégal. *Gouvernement et action publique*, (3), 99-125.
- Bustos M.C., 2018. What Shapes Colombia's Foreign Position on Climate Change? *Colombia Internacional*, 94: 27-51. <https://doi.org/10.7440/colombiaint94.2018.02>

- Chaffin B.C., Gunderson L.H., 2016. Emergence, institutionalization and renewal: Rhythms of adaptive governance in complex social-ecological systems. *Journal of Environmental Management*, 165, 81-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.003>
- Dantec R., Roux J.Y., 2019. Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée. Rapport d'information-Sénat No511.
- Demenois J., Dayet A., Karsenty A., 2022. Surviving the jungle of soil organic carbon certification standards: an analytic and critical review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27(1), 1.
- Friberg L., 2009. Varieties of carbon governance: The clean development mechanism in Brazil—a success story challenged. *The Journal of Environment & Development*, 18(4), 395-424.
- Gallo P., Albrecht E., 2019. Brazil and the Paris Agreement: REDD+ as an instrument of Brazil's Nationally Determined Contribution compliance. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 19, 123-144.
- Howland F., 2022. Local climate change policy and rural development in Colombia's post-peace agreements context. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20:7: 1260-127.
- Howland F., Le Coq J.-F., 2022. Disaster risk management, or adaptation to climate change? The elaboration of climate policies related to agriculture in Colombia. *Geoforum*, 131, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.02.012>
- Hrabanski M., Boutroue B., Massardier G., Thomas A., 2025. Les Politiques publiques d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture française au changement climatique : entre mise à l'agenda tardive et marquerie institutionnelle complexe, In : Debaeke P., Graveline N., Lacor B., Pellerin S., Renaudeau D., Sauquet E., *Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation*. Versailles, éditions Quæ, 398 p.
- Hrabanski M., Montouroy Y., 2022. Les « climatisations » différenciées de l'action publique: Normaliser l'étude du problème « changement climatique ». *Gouvernement et action publique*, (3), 9-31.
- Koontz T.M., Gupta D., Mudliar P., Ranjan P., 2015. Adaptive institutions in social-ecological systems governance: A synthesis framework. *Environmental Science & Policy*, 53, Part B, 139-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.01.003>
- Lahsen M., 2009. A science-policy interface in the global south: the politics of carbon sinks and science in Brazil. *Climatic change*, 97(3), 339-372.
- Lavigne Delville P., 2017. Pour une socio-anthropologie de l'action publique dans les pays « sous régime d'aide ». *Anthropologie & développement*, 45, 33-64. <https://doi.org/10.4000/anthropodev.542>
- Mariño N., 2011. Reflexiones sobre la perspectiva cultural en las políticas de cambio climático en Colombia: un acercamiento al análisis cultural y espacial de las políticas públicas. *Perspectivas culturales del clima*. In : Ulloa A., ed., *Perspectivas culturales del clima*, Bogota, Universidad Nacional de Colombia, 495-528.
- Martinez Tintinago M.H., 2019. Les mesas técnicas agroclimáticas dans la région du Cauca [Colombie] : Les limites d'un projet d'instrument d'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Mémoire de master 2. Univ. Paris 1 Panthéon Sorbonne, Iedes, Paris, 108 p.
- Milhorance C., 2020. Diffusion of Brazil's food policies in international organisations: assessing the processes of knowledge framing. *Policy and Society*, 39(1), 36-52.
- Milhorance C., Camara A.D., Sourisseau J.M., Piraux M., Assembène Mane C., Sirdey N., et al., (2022a). L'intégration de l'agroécologie dans les politiques publiques du Sénégal. ISRA.
- Milhorance C., Howland F., Sabourin E., Le Coq J.-F., 2022b. Tackling the implementation gap of climate adaptation strategies: understanding policy translation in Brazil and Colombia. *Climate Policy*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2085650>
- Monteiro D., Silveira L., Petersen P., 2022. « Fartura tem de montão »: Public policies and socio-ecological resilience in traditional communities of pastureland in the Sertão do São Francisco, Bahia. In: Sabourin E. et al. *Public policies for adapting agriculture to climate change in semi-arid Northeast Brazil*. Rio de Janeiro, E-papers, 183-210.
- Montouroy Y., Biabiany O., Massardier G., 2022. La mise en œuvre locale des instruments comme vecteur de déclimatisation des politiques publiques : Le cas de la politique agricole et de la filière banane en Guadeloupe. *Gouvernement et action publique*, (3), 127-152.

- Muller P., 1990. *Les politiques publiques*. Paris, Presses Universitaires de France, 127 p.
- Muller P., 2000. L'analyse cognitive des politiques publiques : vers une sociologie politique de l'action publique. *Revue française de science politique*, 189-207.
- Noblanc M., 2019. Cartographie des instruments politiques d'adaptation de l'agriculture en Colombie (filiale manguier et maraichage), Mémoire de Master2.
- Osorio-García A.M., Paz L., Howland F., Ortega L.A., Acosta-Alba I., Arenas L., *et al.*, 2019. Can an innovation platform support a local process of climate-smart agriculture implementation? A case study in Cauca, Colombia. *Agroecology and sustainable food systems*, 44(3): 378-411. <https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1629373>
- Pacheco-Vega R., 2020. Environmental regulation, governance, and policy instruments, 20 years after the stick, carrot, and sermon typology. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 22(5), 620-635.
- Sabourin E., Le Coq J.F., Fréguin-Gresh S., Marzin J., Bonin M., Patrouilleau M.M., *et al.*, 2018. Public policies to support agroecology in Latin America and the Caribbean. *Perspective*, 45, 1-4.
- Sabourin E., Oliveira L.M.R., Goulet F., Martins E.S., 2022. *Public policies for adapting agriculture to climate change in semi-arid Northeast Brazil*. Rio de Janeiro, E-papers, 236 p.
- Siméant-Germanos J., 2019. Penser les ingénieries de l'environnement en Afrique à l'aune des sciences sociales du développement. *Zilsel*, 6(2), 281-313.
- Vedung E., 1998. Policy instruments: Typologies and theories. In: Bemelmans-Videc M.-L., Rist R.C., Vedung E. (Eds.), *Carrots, sticks, and sermons: Policy instruments and their evaluation*. Transaction Publishers, 21-58.
- Zellhuber A., 2016. Environmental policy in Brazil. Tensions between conservation and the ideology of growth. In: *The Political System of Brazil*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin, 329-350.

Chapitre 26

Finance, agriculture et climat

Antoine Ducastel

Depuis 2020, une multitude de politiques (internationales et nationales) et d'études se sont focalisées sur les rapports entre la finance, l'agriculture (ou plus largement les systèmes alimentaires) et le climat. Ces initiatives partagent un double dénominateur : elles mettent en évidence le déficit de financements, publics et privés, alloués à l'adaptation et à l'atténuation des effets du changement climatique dans l'agriculture ; et, elles proposent des solutions et des pistes d'actions pour combler ce déficit.

Ce chapitre dresse un bref état des lieux des rapports entre finance, climat et agriculture en s'intéressant aux manières dont ils sont problématisés par différents groupes d'acteurs et aux instruments d'action publique qui sont promus pour « corriger le tir » : qui sont les acteurs qui s'engagent dans ce débat ? Avec quelles propositions et quelles ressources ?

Nous reviendrons tout d'abord sur les tentatives récentes d'évaluation des financements climat pour l'agriculture. Ces efforts s'inscrivent dans une approche financiarisée des politiques de développement agricole (Chiapello *et al.*, 2023 ; Ducastel *et al.*, 2023) et de lutte contre le changement climatique (Bracking et Leffel, 2021 ; Carton et Bigger, 2020 ; Chiapello, 2020) : l'objectif prioritaire est la mobilisation de financements (privés) et les moyens privilégiés sont les infrastructures et les outils de la finance de marché. Face au déficit chronique de financement, deux voies sont prioritairement explorées : la quête d'instruments financiers publics-privés innovants ; et/ou la réaffectation (*repurposing*) vers des activités plus « durables » des financements publics existants en faveur de la production et de la commercialisation des produits agricoles. Nous détaillerons ces deux chantiers à travers des exemples concrets mis en œuvre dans les pays du Nord et du Sud.

D'une manière générale, la mainmise des acteurs financiers sur la fabrique et sur la mise en œuvre des politiques de financement climat pour l'agriculture, et la centralité qu'ils accordent au couple risque-rendement pour l'allocation des capitaux, cadre et limite *de facto* les effets distributifs de ces politiques — que ce soit sur le plan quantitatif (le volume de financement climat alloué à l'agriculture) ou sur le plan qualitatif (le fléchage vers les groupes sociaux les plus vulnérables et/ou les pratiques les plus écologiques).

1. Mesurer le *financial gap* pour mieux le combler ?

Depuis 2020, plusieurs études, commandées ou conduites par les organisations internationales agricoles, ont tenté de dresser un état des lieux des financements climat en faveur de l'agriculture et des systèmes alimentaires (Ifad et CPI, 2020 ; FAO, 2022 ; CPI, 2023 ; Roppa *et al.*, 2023). Ces études sectorielles s'inspirent, tant sur le plan méthodologique que conceptuel, des nombreux panoramas de la finance climat

réalisés aux échelles internationales et nationales (CPI, 2023; I4CE, 2023a), dans le sillage de l'accord de Paris en 2015¹. S'ils rencontrent les mêmes limites et écueils — à commencer par le manque de données ou l'absence de standardisation des pratiques « durables » ou « vertes » (Chiapello, 2020; Jachnik *et al.*, 2019) — ces travaux identifient toutefois trois tendances générales :

- la part des financements climat destinée à l'agriculture est limitée, et en diminution²;
- la distribution de ces financements est, par ailleurs, très inégale et l'agriculture familiale sur de petites surfaces est largement oubliée³;
- les financements publics représentent l'essentiel des flux recensés⁴.

Par-delà la nouveauté des financements climat, il faut souligner que le sous-financement de l'agriculture est une dynamique de long terme, notamment dans les pays du Sud, qui fait suite aux politiques d'ajustement structurel des années 1980 et 1990 (Ducastel *et al.*, 2023; Gabas *et al.*, 2017). Ce sous-financement chronique est souvent mis en miroir des besoins financiers nécessaires pour atteindre les objectifs de développement durable (ODD) et/ou la neutralité carbone. La Food and Land Use Coalition estime par exemple que « des investissements annuels de l'ordre de 300 à 350 milliards de dollars sont nécessaires pour assurer la transition vers des systèmes alimentaires et des usages des sols qui soient durables, et pour s'attaquer aux problèmes liés au changement climatique » (FOLU, 2019)⁵.

L'écart, ou *financial gap*, entre les financements (climat) existants et les besoins financiers est devenu au fil des ans un enjeu majeur des politiques de lutte contre le changement climatique, dans l'agriculture et au-delà. Ce cadrage des politiques climatiques au prisme des enjeux et des risques financiers, autrement dit la financiarisation des politiques climatiques⁶, constitue aujourd'hui le paradigme dominant de la gouvernance climatique (Bracking et Leffel, 2021; Carton et Bigger, 2020; Chiapello, 2020).

Pour répondre à ce déficit de financement, des arènes et des coalitions d'acteurs publics et privés émergent et se structurent. En ce qui concerne le secteur agricole, une communauté internationale de la finance climat regroupe les organisations internationales spécialisées dans l'agriculture et l'environnement (FAO, Ifad, Banque mondiale, Unep), qui cherchent à financer leur programme d'action dans un contexte budgétaire contraint; les institutions financières de développement, multinationales (Green Climate Fund), régionales (Banque africaine de développement) ou nationales (Agence française de développement), souvent à la pointe de l'innovation financière

1. Article 2.1c.

2. «Le financement cumulé pour l'agriculture, la sylviculture et l'utilisation des terres n'était que de 20 milliards de dollars par an en 2017-2018, ce qui représente 3% du financement climat mondial total pour la période» (Ifad et CPI, 2020).

3. « Seulement 2% du financement public international pour le climat — soit 2 milliards de dollars — ont été consacrés aux petits exploitants familiaux et aux communautés rurales en 2021 » (Roppa *et al.*, 2023).

4. «Le financement climat de la petite agriculture provient à 95% du secteur public, notamment des dons gouvernementaux, et des institutions multilatérales et bilatérales de financement du développement» (Ifad et CPI, 2020).

5. Il existe de nombreuses autres estimations de ces besoins, énoncées par exemple par Shakhovskoy *et al.* (2019), Thornton *et al.* (2023) ou la Banque mondiale (2021) : « 300 à 400 milliards de dollars d'investissements supplémentaires par an, soit moins de 0,5% du PIB mondial ».

6. Selon Eve Chiapello, il s'agit de « politiques publiques, qui cherchent à capter les forces de la finance privée, à en engager les acteurs, et qui s'appuient aussi sur ses techniques, et ses formes de raisonnement » (Chiapello, 2020).

(Ducastel *et al.*, 2023); des investisseurs institutionnels (fonds de pension, fonds souverains) et des sociétés d'investissement (Phatisa, un gestionnaire de fonds de capital-investissement africains); des sociétés de conseil spécialisées (Dalberg, Food System for the Future) et des prestataires de services; et enfin des think tanks (Climate Policy Initiative, IFPRI).

Cette communauté se structure autour de coalitions, comme le Good Food Finance Network⁷, constituées en marge des sommets UN Food system, qui réunit des entreprises agro-alimentaires (Yara), des investisseurs (Rabobank, Green Climate Fund) et des organisations internationales (Unep, FI, Banque mondiale) autour d'un programme de réforme de l'architecture de «la finance agro-alimentaire» (Banque mondiale, 2021). Ces acteurs de la finance climat trouve de plus en plus de relais au sein des arènes de la gouvernance climatique mondiale, notamment auprès des États (du Sud) à la recherche de financements additionnels. Ainsi, lors de la COP27 de Charm el-Cheikh (2022), la présidence égyptienne a lancé l'initiative Fast dans le but affiché d'accroître «la quantité et la qualité» de la finance climat par l'agriculture⁸.

Ces acteurs partagent au moins trois convictions : d'une part, dans le contexte actuel des politiques d'austérité, les financements publics sont insuffisants pour combler le *financial gap*; d'autre part, les marchés et les acteurs financiers concentrent une large fraction de l'épargne mondiale et sont toujours à la recherche de nouvelles opportunités d'investissement⁹. Par conséquent, les fonds publics doivent prioritairement faire un «effet de levier» sur la finance privée, notamment en «dérivant» (Gabor, 2023) les investissements dans l'agriculture «durable».

2. Promouvoir des instruments financiers innovants pour attirer les capitaux privés

Récemment, de nombreux instruments financiers dits innovants ont été promus pour répondre au déficit de financement dans l'agriculture durable. Par-delà leur diversité, ces instruments d'action publique sont :

- publics-privés, tant lors de la phase de conception que pour leur mise en œuvre;
- incitatifs et volontaires (Chiapello, 2020);
- fondés sur le marché, ou *market-based*, ciblant les défaillances de marché, par le développement de nouveaux marchés ou en agissant sur les «signaux», mais sans remettre en cause leur fonctionnement général;
- importés d'autres secteurs d'activités et adaptés aux spécificités du secteur agricole.

Sans être exhaustifs¹⁰, nous nous intéressons dans ce chapitre à deux types d'instruments en particulier : les financements mixtes (ou *blended finance*) d'une part, et les projets de compensation carbone d'autre part.

7. <https://goodfood.finance/>.

8. <https://www.fao.org/climate-change/action-areas/access-to-climate-finance/fast/en>.

9. «Les ressources financières publiques, y compris l'aide publique au développement, ne sont pas suffisantes. Le financement privé est essentiel pour combler le déficit de financement et soutenir la transition rapide des systèmes alimentaires» (Unep, 2023).

10. Parmi les autres instruments existants, on peut citer notamment les obligations vertes (van Veelen, 2020) ou les instruments de gestion des risques climatiques et financiers, par exemple les assurances climatiques ou contre les catastrophes naturelles (Angeli Aguiton, 2021; Barral, 2023; Johnson, 2021).

2.1. Les financements mixtes (ou *blended finance*)

Pour financer l'adaptation et l'atténuation de l'agriculture dans les pays du Sud et, comme le veut la formule consacrée, « passer des milliards aux trilliards », l'aide publique au développement (APD) est de plus en plus utilisée pour attirer les investissements privés. Pour enclencher cet effet de levier, la *blended finance*¹¹ s'est développée jusqu'à devenir le nouveau paradigme de référence en matière de finance pour le développement (Christiansen, 2021; Mah, 2023; Mawdsley, 2018). La *blended finance* regroupe une large palette d'instruments dont l'objectif commun est de « dérisquer » les investissements : prêts concessionnels, fonds de capital-investissement (Ducastel, 2016), assistance technique, ou mécanismes de garanties.

Cette *blended finance* a été assez tardivement importée dans le secteur agricole. Toutefois, ces dernières années, plusieurs initiatives ont été lancées (encadré 26.1).

Encadré 26.1. Une prolifération de fonds *blended* pour l'agriculture

Tout d'abord, l'Union européenne (UE) a été pionnière en lançant dès 2007 le EU-Africa Infrastructure Trust Fund (EU-AITF). Plusieurs poches de financement fléchées vers une région ou vers un secteur particulier ont suivi, comme l'initiative ElectricFI pour le développement des énergies renouvelables dans les pays du Sud. À partir de 2018, l'UE a étendu cette stratégie au secteur agricole, avec son entrée au capital de deux fonds d'investissement, le African Agriculture Fund and Trade géré par la Deutsch Bank et l'Agri-Business Capital Fund géré par l'Ifad, et en montant une facilité AgriFI.

Ensuite, l'Unep et la Rabobank ont mis en place le fonds Agri3 dont l'objectif est de mobiliser un milliard de dollars pour les projets de protection et de restauration des forêts et de promotion de l'agriculture, notamment familiale à travers deux leviers : l'octroi de garantie aux institutions financières qui financent ces projets, et une facilité d'assistance technique pour accompagner le développement de projets.

Enfin, la Banque ougandaise de développement, en partenariat avec le centre d'investissement de la FAO, a lancé l'initiative AgrInvest afin de renforcer les capacités de la banque en matière d'investissement dans l'agriculture et pour l'évaluation des émissions carbone de son portefeuille (FAO, 2023).

2.2. Les projets de compensation carbone

Le développement des marchés de crédits carbone, et en particulier les marchés volontaires, constitue une autre promesse, un nouveau gisement potentiel, pour le financement de l'agriculture durable, notamment en faveur de l'agroforesterie ou de l'agriculture régénérative. Pour compenser leurs émissions de CO₂, les entreprises qui s'engagent dans une démarche volontaire de neutralité carbone (comme Microsoft, Danone, Unilever, CMA CGM) doivent acquérir des crédits carbone. Ces derniers

11. «Le financement mixte est l'utilisation de capitaux catalytiques provenant de sources publiques ou philanthropiques pour accroître la part des investissements du secteur privé dans le développement durable.» Convergence website. <https://www.convergence.finance/blended-finance>.

équivalents à la réduction ou à la suppression d'une tonne métrique de CO₂ ou équivalent. Un vecteur privilégié pour atteindre ces réductions ou suppressions de CO₂ est les « solutions fondées sur la nature » (*nature-based solutions*), comme les projets de plantations d'arbres, de conservation (« déforestation évitée »), d'agroforesterie ou encore d'agriculture régénérative. Ces « paiements aux résultats » sont certifiés par des organismes tiers qui veillent aux respects de standards environnementaux (émissions, biodiversité) et sociaux¹². Malgré l'instabilité et l'étroitesse actuelles des marchés volontaires de crédits carbone, de nombreux opérateurs et intermédiaires financiers anticipent une forte hausse de la demande globale pour ces crédits¹³ et ont lancé des fonds spécifiques, comme le fonds aDryada.

Malgré les ressources publiques investies, ces instruments financiers innovants n'ont pas comblé le déficit de financement auquel ils prétendaient s'attaquer. En effet, de nombreux travaux constatent plutôt la persistance, voire l'accentuation, du sous-financement de l'agriculture durable dans les pays du Sud (FAO, 2023; FAO, 2022). Ces études observent par ailleurs un déséquilibre croissant entre un groupe restreint de bénéficiaires des financements climat et un autre groupe qui en est exclu. D'un côté, les institutions financières (publiques et privés) et les entrepreneurs agricoles « innovants », notamment dans la *climate-smart agriculture* (Dey et Mishra, 2022) ou la séquestration du carbone, ont les ressources pour capter ces fonds (Climate Policy Initiative, 2023). À ce titre, la finance climat bénéficie largement à l'industrie financière par l'émergence d'« une nouvelle chaîne d'investissement avec ses acteurs spécialisés (évaluateurs, auditeurs, fonds d'investissement) et son écosystème » (Chiapello, 2020). En revanche, de l'autre côté, les (petits) agriculteurs familiaux sont laissés à la marge.

« Dans les systèmes agro-alimentaires mondiaux et locaux, la finance durable peut soutenir les efforts de décarbonisation ; cependant, de nombreux acteurs sont laissés pour compte. Cette dynamique n'est pas propre à la finance durable, mais plutôt à la finance en général : les petits exploitants agricoles, les PME agro-alimentaires et d'autres acteurs, en particulier dans les pays en développement, ne sont pas en mesure de bénéficier du développement de la finance durable. [...] Le financement de ces acteurs stratégiques engendre des risques et des coûts de transaction élevés, qui les rendent éligibles à de nombreuses formes d'instruments financiers durables » (FAO, 2023).

Enfin, le caractère « durable » ou « vert » des projets soutenus par la finance climat est régulièrement critiqué par des chercheurs (van Veelen, 2020) et des ONG environnementales (ONE France, 2023), de même que les mécanismes d'accaparement et d'expropriation (*green grabbing*) induits (Franco et Borrás, 2019).

Si les partisans de la finance climat déplorent souvent les limites des politiques publiques existantes, comme l'absence d'une taxonomie verte standardisée ou l'absence d'un guichet unique, pour expliquer ces « dysfonctionnements », c'est pourtant bien le couple risque et rendement qui pose problème dans un secteur perçu comme trop risqué (coûts de transaction, aléas climatiques) et dont les rendements n'atteignent pas

12. Par exemple, les standards « Climate, Community and Biodiversity » développés et promus par l'organisme de certification Verra.

13. « Bien que ces marchés restent limités à environ 2 milliards de dollars, la demande mondiale de crédits carbone devrait être multipliée par 100 d'ici à 2050 » (Climate Policy Initiative, 2023).

les niveaux attendus par les investisseurs¹⁴. Ainsi, la financiarisation des politiques de développement agricole et de lutte contre le changement climatique conduit inexorablement à un désinvestissement du secteur. Paradoxalement, c'est encore à l'industrie financière que l'on assigne le rôle de contrebalancer cette tendance.

Par ailleurs, ces politiques posent également deux autres problèmes. Premièrement, le paysage de la finance climat se caractérise aujourd'hui par une multiplication d'initiatives et d'instruments sans aucune coordination ni nationale ni internationale. Cette logique additionnelle, qui s'explique principalement par des enjeux de distinction et de compétition institutionnelle, est une limite majeure à la planification de l'atténuation et de l'adaptation du changement climatique dans le secteur agricole. Deuxièmement, en plaçant la focale sur l'offre de financement (et comment l'accroître) ces politiques relèguent au second plan la question des modèles, des filières et des pratiques agricoles à financer : faut-il par exemple développer l'agroécologie ou renforcer l'efficacité de l'agriculture conventionnelle ?

3. « Verdir » les financements publics existants

Tandis que la quête des financements climat innovants se poursuit, un autre chantier s'est récemment ouvert pour la finance climat : la réaffectation (*repurposing*) des financements publics existants en faveur de la production et/ou de la commercialisation des produits agricoles. Plusieurs rapports récents ont ainsi mis l'accent sur le potentiel lié à la conversion des financements existants. Dès 2020, un rapport de la Banque mondiale s'est attaché à évaluer le volume de financement public alloué à l'agriculture dans le monde et la part de celui-ci destinée à l'atténuation ou à l'adaptation au changement climatique :

« Seule une petite partie des aides agricoles actuelles contribue à réduire les émissions ou à accroître l'efficacité de la production en général. Les quelque 300 milliards de dollars de soutien au prix du marché font grimper les prix pour certains agriculteurs, mais au détriment d'autres. Sur les 300 milliards de dollars de dépenses directes, environ 43 % sont destinés à soutenir les revenus des agriculteurs et 30 %, à soutenir la production. Seuls 9 % des dépenses directes soutiennent explicitement la conservation, tandis que 12 % soutiennent la recherche et l'assistance technique » (Malins *et al.*, 2020).

Les auteurs du rapport proposent donc de réallouer une partie conséquente de ces aides publiques, en particulier les aides couplées à la production et les subventions aux intrants, vers l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Par la suite, plusieurs rapports et études ont repris à leur compte cette proposition en détaillant

14. « Le profil risque-rendement de certains investissements agro-alimentaires fait qu'il est difficile d'attirer des capitaux privés. Pour les projets dans l'agriculture primaire, il est plus difficile de concevoir un modèle risque-rendement standardisé, attrayant pour les investisseurs privés et facilement reproductible. La plupart des investisseurs privés associent encore le secteur agricole à un risque plus élevé, à une gestion de projet plus compliquée et à une prévisibilité moindre. En outre, la plupart des sociétés d'investissement privées ne sont souvent pas en mesure de prendre en charge les coûts d'exploitation et de transaction de nombreux projets agro-alimentaires, en particulier ceux de petite taille. Afin de réduire les coûts de transaction et de maximiser les rendements, les grands investisseurs institutionnels tels que les fonds souverains préfèrent investir à plus grande échelle (Bernstein *et al.*, 2013). Même les plus petits fonds d'impact ont du mal à investir dans des projets de petite taille sans un certain niveau de subventionnement des coûts de transaction » (FAO, 2023).

ses atouts et ses conditions de faisabilité (Scown *et al.*, 2020; FAO, 2021; Malins *et al.*, 2020; IFPRI, 2022; Banque mondiale, 2023; CAWR, 2023; Climate Policy Initiative, 2023; Unep, 2023). Deux enjeux sont régulièrement soulignés.

Premièrement, comme l'illustre le titre du rapport de la FAO et de l'Unep sur le sujet (« Une opportunité de plusieurs milliards de dollars », en 2021), le succès rapide, tout du moins discursif, de cette proposition s'explique d'abord par la « découverte » d'un nouveau gisement dans un contexte financier structurellement contraint. En effet, les promoteurs de la réallocation développent une critique virulente des aides publiques existantes et de leurs effets négatifs, que ce soit sur les plans économique (des freins à l'efficacité et au progrès), social (une distribution très inégalitaire) et écologique (destruction d'écosystèmes). Ils proposent donc de « rationaliser » les administrations et les aides publiques au nom d'une triple efficacité économique, sociale et écologique.

« Les subventions publiques représentent aujourd'hui une part énorme des budgets publics dans le monde, peut-être plus importante qu'à n'importe quel moment de l'histoire de l'humanité. Dans de nombreux pays, l'ampleur des subventions directes dans les secteurs des ressources naturelles dépasse celle des investissements dans des biens publics importants tels que la santé et l'éducation. Ce rapport identifie et quantifie les canaux connus et nouveaux, par lesquels des subventions mal conçues dans les secteurs des ressources naturelles, bien que souvent bien intentionnées, creusent les inégalités, diminuent la productivité et entraînent la destruction des écosystèmes. À une époque de contraintes fiscales et de dégradation du capital naturel, la réforme et la réaffectation des subventions perverses et nuisibles offrent la possibilité de promouvoir une plus grande durabilité, l'inclusion et une prospérité partagée » (Banque mondiale, 2023).

Deuxièmement, les effets sociaux de la conversion des financements sont pris au sérieux. En effet, il y a une volonté affichée d'anticiper, et souvent de compenser, les acteurs et les territoires affectés ou « perdants » de ces politiques. Ainsi, la FAO et l'Unep (2021) proposent un protocole en six étapes pour évaluer *ex ante* et *ex post* les impacts de ces politiques. Dans la même veine, la Banque insiste sur les outils de communication et de compensation nécessaires pour mener à bien ces réformes.

« Les réformes des subventions à travers le monde mettent en évidence les risques de stratégies mal conçues qui négligent les conséquences distributives, l'ampleur de la résistance et la nécessité de construire une coalition forte en faveur du changement » (Banque mondiale, 2023).

L'idée d'une réallocation des financements publics s'attaque à ce qui a été longtemps un angle mort des politiques de financement climat, dans l'agriculture et ailleurs¹⁵ : les aides publiques (subventions, exonérations fiscales) « brunes », au profit d'acteurs et d'activités fortement émetteurs de CO₂ ou polluants. En effet, tandis que les instruments financiers « verts » s'additionnaient, ces flux sont longtemps restés sous les radars. Toutefois, ces propositions sont largement déconnectées des mondes agricoles, et elles masquent un large éventail d'agendas politiques.

Tout d'abord, la conversion des financements est à ce jour un vœu d'expert qui peine à trouver des manifestations concrètes. Ces rapports mettent souvent en avant les

15. Dans le secteur de l'énergie, les premières mesures pour supprimer les aides publiques aux énergies carbonées datent de 2009, pourtant encore aujourd'hui elles ne sont pas réellement mises en œuvre.

mêmes exemples vertueux : les Maec européennes (voir chapitre 25), la politique agricole suisse ou encore les crédits publics aux agriculteurs brésiliens conditionnés à de bonnes pratiques en matière de gestion des forêts. Il est donc difficile d'analyser et de comparer les facteurs empiriques qui conditionnent la mise en œuvre et la réussite de ces politiques. Ces études tendent au contraire à minorer les enjeux politiques de ces réformes lors de la phase de négociation, ou des groupes d'intérêts (syndicats d'agriculteurs, agro-industriels, élites administratives et politiques) s'affrontent et se confrontent autour des arbitrages financiers (Iddri, 2023), et lors de la mise en œuvre, lorsque des résistances et des conflits sociaux peuvent mettre à mal ou bouleverser les mesures négociées. Pourtant, les tentatives avortées de suppression des exonérations fiscales sur le diesel pour les agriculteurs en France ou en Allemagne, ou les mobilisations contre le plan azote aux Pays-Bas ont remis en évidence la forte capacité de mobilisation et de résistance des mondes agricoles et de leurs organisations politiques et syndicales.

Enfin, cet appel à la « conversion » des aides publiques dans l'agriculture masque des conceptions du « verdissement » antagonistes qui se déclinent entre deux pôles. D'un côté, un pôle réformateur remet en cause la taille, voire parfois l'existence, de certaines filières particulièrement émettrices en CO₂ ou en azote. C'est le cas notamment de l'élevage, mais aussi de certaines cultures de rente (comme le sucre), dans lesquels il serait nécessaire de désinvestir pour financer des actions en faveur de politique alimentaire décarbonée (CAWR, 2023; I4CE, 2023b). De l'autre côté, un pôle optimisateur propose plutôt d'améliorer l'efficacité de ces filières pour les rendre plus durables. En améliorant les rendements agricoles, il serait par exemple possible de réduire la déforestation, une des principales causes d'émission dans le secteur agricole (Malins *et al.*, 2020).

4. Conclusion

L'intérêt actuel pour les financements climat dans l'agriculture semble traduire une large prise de conscience du manque structurel de ressources dont souffre le secteur, en particulier l'agriculture familiale sur de petites superficies. Cependant, la mise à l'agenda et le cadrage des financements climat dans l'agriculture sont principalement portés par une coalition d'acteurs publics-privés, regroupant les acteurs agro-industriels et agrofinciers dominants d'un côté, les principales organisations internationales de l'autre. Par conséquent, cette mise en problème prolonge et approfondit les réformes néolibérales en faveur d'une privatisation et d'une financiarisation accrues des politiques de développement agricole.

D'une part, la promotion des instruments financiers innovants et la réallocation des aides publiques agricoles sont souvent un vecteur de rationalisation des administrations publiques dans un sens toujours plus favorable au marché. Au nom de l'efficacité (économique, environnementale et sociale), les ressources gérées par les institutions publiques sont réduites et transférées à des opérateurs privés.

D'autre part, le cadrage du problème climatique dans l'agriculture au prisme du *financial gap* illustre bien la financiarisation du secteur et la primauté donnée aux logiques, aux acteurs, aux infrastructures et aux instruments financiers pour y faire face. Ce cadrage dominant a des effets sociaux et politiques importants en (dé)légitimant certaines options et solutions. Ainsi, en postulant une dépense publique structurellement

limitée, ce cadrage exclut *de facto* d'autres modes de financement budgétaires ou fiscaux, comme le recours à l'impôt ou à la réforme de la politique monétaire (CAWR, 2023). Enfin, ces politiques restent technocratiques et descendantes, sans participation des « bénéficiaires », ce qui ne va pas sans poser des problèmes en matière de justice procédurale (Colenbrander *et al.*, 2018).

5. Références bibliographiques

- Angeli Aguiton S., 2021. A market infrastructure for environmental intangibles: the materiality and challenges of index insurance for agriculture in Senegal. *Journal of Cultural Economy*, 14(5):580-595. <https://doi.org/10.1080/17530350.2020.1846590>.
- Banque mondiale, 2023. Detox development. Repurposing Environmentally Harmful Subsidies.
- Barral S., 2023. Risk management in the Common Agricultural Policy: the promises of data and finance in the face of increasing hazards. *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 104(1):67-76.
- Bracking S., Lefell B., 2021. Climate Finance Governance: Fit for Purpose? *WIREs Climate Change*, 12(4):e709. <https://doi.org/10.1002/wcc.709>
- Carton W., Bigger P., 2020. *Finance and Climate Change*. The Routledge Handbook of Financial Geography.
- CAWR, 2023. Financing Agroecological Transformations for Climate Repair.
- Chiapello E., 2020. La financiarisation de la politique climatique dans l'impasse. In : *Faire l'économie de l'environnement*. Paris, Presses de l'école des mines.
- Chiapello È., Engels A., Gresse E.G., 2023. *Financializations of Development*. New York, Routledge.
- Christiansen J., 2021. Fixing fictions through blended finance: The entrepreneurial ensemble and risk interpretation in the Blue Economy. *Geoforum*, 120:93-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.01.013>
- Climate Policy Initiative, 2022. Global Landscape of Climate Finance.
- Climate Policy Initiative, 2023. Landscape of Climate Finance for Agrifood Systems.
- Colenbrander S., Dodman D., Mitlin D., 2018. Using climate finance to advance climate justice: the politics and practice of channelling resources to the local level. *Climate Policy*, 18(7):902-15. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1388212>
- Dey K., Mishra P.K., 2022. Mainstreaming blended finance in climate-smart agriculture: Complementarity, modality, and proximity. *Journal of Rural Studies*, 92:342-53. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.04.011>
- Ducastel A., 2016. Le capital-investissement comme instrument de l'action publique ou la financiarisation du développement en Afrique subsaharienne. *Politique africaine*, 144(4):135-55. <https://doi.org/10.3917/polaf.144.0135>
- Ducastel A., Bourblanc M., Adelle C., 2023. Why development finance institutions are reluctant to invest in agriculture... And why they keep trying. The financialization of development policies as an obstacle to invest in agriculture. In: *Financializations of Development. Global Games and Local Experiments*. Routledge.
- FAO, 2022. Climate finance in the agriculture and land use sector – global and regional trends between 2000 and 2020.
- FAO, 2023. Investing in carbon neutrality: Utopia or the new green wave? Challenges and opportunities for agrifood systems.
- FAO, Unep, 2021. A multi-billion dollar opportunity. Repurposing agricultural support to transform food systems.
- FOLU, 2019. Growing better. Ten critical transitions to transform food and land use.
- Franco J.C., Borrás S.M., 2019. Grey areas in green grabbing: subtle and indirect interconnections between climate change politics and land grabs and their implications for research. *Land Use Policy*, 84:192-99. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.013>

Partie 3. Atténuer et adapter les systèmes agricoles et alimentaires

- Gabas J.-J., Ribier V., Vernières M., 2017. Présentation. Financement ou financiarisation du développement ? Une question en débat. *Mondes en développement*, 178:7-22.
- Gabor D., 2023. The (European) Derisking State. SocArXiv hpbj2, Center for Open Science. <https://doi.org/10.31219/osf.io/hpbj2>
- I4CE, 2023a. Panorama des financements climat. Edition 2023.
- I4CE, 2023b. Transition de l'élevage : gérer les investissements passés et repenser ceux à venir.
- Iddri, 2023. Greening the agrifood system through the EU budget: can we repurpose agricultural subsidies?
- Ifad, CPI, 2020. Examining the Climate Finance Gap for Small-Scale Agriculture.
- IFPRI, 2022. Repurposing Agricultural Support: Creating Food Systems Incentives to Address Climate Change. Global food policy report.
- Jachnik R., Mirabile M., Dobrinevski A., 2019. Tracking finance flows towards assessing their consistency with climate objectives. Paris, OCDE.
- Johnson L., 2021. Rescaling index insurance for climate and development in Africa. *Economy and Society*, 50(2):248-74. <https://doi.org/10.1080/03085147.2020.1853364>
- Mah L., 2023. The financialization of EU development policy: Blended finance and strategic interests (2007-2020). In: *Financializations of Development*. Routledge.
- Malins C., Searchinger T.D., Dumas P., Baldock D., Glauber J., Jayne T., *et al.*, 2020. Revising Public Agricultural Support to Mitigate Climate Change. Development Knowledge and Learning, World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/33677>
- Mawdsley E., 2018. 'From Billions to Trillions': Financing the SDGs in a World 'beyond Aid'. *Dialogues in Human Geography*, 8(2): 191-95. <https://doi.org/10.1177/2043820618780789>
- ONE France, 2023. Les « Climate Finance Files » : le Far West des financements climatiques.
- Roppa, 2023. Untapped potential – An analysis of international public climate finance flows to sustainable agriculture and family farmers.
- Scown M.W., Brady M.V., Nicholas K.A., 2020. Billions in Misspent EU Agricultural Subsidies Could Support the Sustainable Development Goals. *One Earth*, 3(2): 237-25.
- Unep, 2023. Driving Finance for Sustainable Food Systems. A Roadmap to Implementation for Financial Institutions and Policy Makers.
- van Veelen B., 2020. Cash Cows? Assembling Low-Carbon Agriculture through Green Finance. *Geoforum*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.12.008>

Chapitre 27

Les interfaces entre science et décision politique face au défi du changement climatique

Carolina Milhorange, Antoine Perrier, Julien Demenois, Vincent Freycon, Camille Piponiot, Paul Luu, Adèle Gaveau, Marie Hrabanski, Sélim Louafi

La pandémie de la Covid-19, les catastrophes naturelles exacerbées par le changement climatique et les crises alimentaires récurrentes ont renforcé l'appel des sociétés à intégrer la science dans les décisions politiques (Cairney *et al.*, 2016; Weible *et al.*, 2020). Par ailleurs, de nombreuses conventions internationales s'appuient sur des évaluations scientifiques, notamment celles réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) et la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

L'expression «interface science-politique» (ISP) revêt plusieurs définitions dans la littérature¹, mais elle est généralement conçue comme un dispositif institutionnel, un forum, un processus ou une organisation visant à faciliter le dialogue entre les avis scientifiques et les décisions politiques. La mise en place de ces interfaces repose, entre autres, sur l'hypothèse que certains problèmes particulièrement complexes — tels que la sécurité alimentaire mondiale, les changements climatiques ou l'érosion de la biodiversité — nécessitent une interaction étroite et dynamique entre scientifiques et décideurs. Cela est dû à l'intersectorialité de ces enjeux, au fort degré d'incertitude concernant l'état des connaissances et aux divergences marquées quant aux valeurs à privilégier pour les aborder (solidarité, efficacité, équité, responsabilité, etc.) (Head, 2022). Dans ce contexte, les scientifiques s'efforcent d'éclairer les multiples causes, valeurs et connaissances en jeu, tout en établissant des liens entre problèmes et solutions potentielles, et en offrant des analyses et des interprétations susceptibles d'influencer les stratégies politiques.

Or, les interactions entre la recherche scientifique et la prise de décision politique ne constituent pourtant pas un sujet nouveau. Depuis plus de quarante ans, les sciences humaines et sociales étudient ces interactions, dépassant le modèle linéaire traditionnel. Ce modèle repose sur l'idée que la connaissance précède l'action et que le public, souvent perçu comme insuffisamment informé, peut être éclairé par des informations fiables. L'approche de l'*evidence-based policymaking* illustre ce modèle, en postulant que les politiques devraient s'appuyer sur des preuves scientifiques pour répondre aux enjeux sociétaux. Pourtant, cet idéal se heurte à la réalité : les preuves scientifiques sont souvent contestées, et le processus politique implique une diversité d'acteurs aux intérêts variés. En pratique, les décideurs mobilisent une combinaison d'émotions, de savoirs diversifiés et de raccourcis cognitifs pour faire avancer leurs politiques (Cairney, 2013).

1. Voir Van den Hove (2007), Koetz *et al.* (2012) et Sarkii *et al.* (2015).

Ainsi, l'interface entre science et décision politique, loin d'être linéaire ou directe, soulève des questions fondamentales sur la nature et les modalités de ces interactions. Ce chapitre s'organise en trois parties pour explorer ces questions. Il propose d'abord une grille d'analyse des interactions entre science et décision politique, s'appuyant sur les modèles technocratique, décisionniste et pragmatiste. Ensuite, il examine les processus décisionnels au sein des ISP, en révélant les tensions, les compromis et les asymétries de pouvoir qui influencent ces interactions et la construction des politiques publiques. Enfin, il discute du potentiel des ISP à favoriser un apprentissage collectif face aux défis climatiques, tout en abordant les enjeux liés à leur mise en œuvre et à leur pérennité.

1. Repenser les relations entre science et décision politique

Cette section propose une présentation succincte de différentes grilles d'analyse et d'exemples concrets pour explorer les interactions entre les scientifiques, les décideurs politiques et autres acteurs dans les domaines climatique et environnemental (encadrés 27.1 et 27.2). Elle met en lumière les dynamiques complexes de ces interactions, tant dans la formulation que dans la mise en œuvre des politiques publiques. L'analyse invite à approfondir la compréhension des processus politiques afin de mieux appréhender les tensions et les compromis qui en émergent.

1.1. Différents modèles conceptuels

Trois modèles clés illustrent des perspectives contrastées sur l'interface entre science et décision politique, selon l'importance relative accordée à la science ou à la politique en matière de contrôle et d'autorité. Ces modèles, allant d'une prédominance politique (modèle décisionniste) à une prédominance scientifique (modèle technocratique), s'inscrivent dans une conceptualisation académique développée au fil du temps grâce aux contributions de nombreux penseurs en science politique, en philosophie et en sociologie (parmi lesquels Jürgen Habermas, Sheila Jasanoff, Bruno Latour, Roger Pielke, Laurens Hessels, David Guston, John Dewey, entre autres). Ces modèles, qualifiés d'idéaux types, visent à éclairer les dynamiques d'interaction entre science et décision publique. Ils ne reflètent pas toute la richesse de cette littérature et ne doivent pas être interprétés comme des cadres opposés ou comme le reflet des positions défendues par des acteurs spécifiques (Dressel, 2022).

– L'approche technocratique conçoit la pratique politique comme l'exécution de directives définies par une élite scientifique et technique. S'inscrivant dans une vision positiviste de la science, elle cherche à orienter les politiques publiques à travers des solutions jugées « optimales », fondées sur les connaissances disponibles. Cette approche repose sur l'idée que l'expertise scientifique suffit à résoudre les problèmes publics, en minimisant l'influence des rapports de force, des valeurs et des croyances dans la prise de décision. Elle suggère une supériorité intrinsèque des solutions scientifiques par rapport à celles issues d'un débat démocratique et participatif fondé sur des valeurs sociétales et économiques. En conséquence, une science prescriptive laisse peu de place au dialogue critique et à la négociation entre expertise technique et valeurs sociétales.

– L'approche décisionniste distingue clairement les rôles des experts et des décideurs politiques, attribuant à ces derniers l'autorité principale pour définir les objectifs politiques. Dans ce modèle, la science se limite à fournir des faits et des options techniques, tandis que les choix finaux relèvent des acteurs politiques, selon leurs

priorités et leurs préférences. Une fois les objectifs établis, la science détermine objectivement les moyens pour les atteindre, préservant ainsi une recherche exempte de valeurs et un rôle neutre de la science dans les débats publics. Cette approche voit la science comme une source fiable de connaissance, capable d'orienter les actions concrètes sans s'immiscer dans la définition des valeurs et des objectifs. Cependant, en cantonnant la science à un rôle instrumental, cette approche néglige la nécessité d'une réflexion collective sur des problématiques complexes qui exigent souvent une négociation ou un dialogue multiacteur. Elle soulève également des questions sur la possibilité réelle de dissocier les valeurs des faits dans la recherche scientifique et sur la capacité de la science à maintenir sa neutralité dans des contextes politiques ou sociaux imprégnés de valeurs.

Les critiques des approches mentionnées ci-dessus mettent en lumière les interactions profondément dynamiques entre science et décision politique, où les valeurs et les objectifs politiques influencent non seulement la recherche scientifique, mais aussi son application (Dressel, 2022). Le Giec illustre bien comment certains individus endossent des rôles à la fois scientifiques et politiques au cours de leur carrière, voire simultanément, selon les situations. Bien que les rapports du Giec s'appuient sur des travaux scientifiques rigoureux, ils formulent également des diagnostics politiques concernant l'évolution des sociétés et proposent des visions stratégiques pour la gestion des forêts, des sols et d'autres écosystèmes à l'échelle mondiale (Louafi, 2021).

– L'approche pragmatiste considère les sphères scientifiques et politiques comme interdépendantes, plutôt que séparées. Selon van den Hove (2007), cette interdépendance favorise des interactions constructives, tout en encourageant le dialogue et la négociation. Cette approche met l'accent sur la réflexivité, permettant aux acteurs scientifiques et politiques de réévaluer et d'adapter constamment leurs méthodes et leurs perspectives en fonction des retours et des évolutions contextuelles. Cette approche insiste sur la nécessité de reconnaître et de communiquer les incertitudes inhérentes à la science, renforçant ainsi la transparence et la collaboration. Cependant, elle présente des défis, notamment le risque d'entraîner un relativisme épistémologique dû à la construction sociale et historique des savoirs scientifiques, et la complexité de son application pratique. Par ailleurs, en admettant explicitement les influences sociales et politico-économiques sur la production scientifique, cette approche peut involontairement encourager une politisation excessive de la science.

L'idée de coproduction des connaissances scientifiques et des contextes sociaux remonte aux premières recherches sur les ISP. Pourtant, de nombreuses initiatives internationales et une partie de la littérature continuent de s'appuyer sur des modèles linéaires simplistes, centrés sur une science alimentant directement les décisions politiques. Ces approches masquent la complexité des relations entre recherche et politique ainsi que celle des processus de formulation et d'évolution des politiques publiques.

1.2. Les processus décisionnels dans la construction des politiques publiques

Dans un contexte où les frontières entre science et décision politique sont mouvantes, il est essentiel de mieux comprendre les processus décisionnels et de formulation des politiques publiques. Cela invite à remettre en question certaines idées reçues, notamment celle selon laquelle la science fournirait des connaissances objectives et

Encadré 27.1. L'agroforesterie en Côte d'Ivoire : la science, un arbitre des décisions politiques ?

En Côte d'Ivoire, bien que l'agroforesterie soit une pratique ancienne, elle a connu un regain d'intérêt à partir du milieu des années 2010, notamment comme réponse à la déforestation croissante et pour assurer la durabilité de la production de cacao. Intégrée aux discours politiques et aux normes de durabilité, l'agroforesterie est aujourd'hui perçue comme une solution de plus en plus consensuelle pour la durabilité du cacao. Cependant, la décision concernant le choix du système agroforestier à soutenir relève de choix politiques à la confluence d'objectifs parfois contradictoires. Par exemple, l'agroforesterie est pratiquée aussi bien dans des zones préalablement défrichées dans un objectif de reforestation que dans des forêts préservées, menant à leur déforestation ou à leur dégradation (Zo-Bi et Hérault, 2023).

Dans ce contexte, certains décideurs considèrent la science comme un arbitre légitime pour établir les normes de mise en œuvre des systèmes agroforestiers favorisés par les politiques publiques et les projets internationaux. Cependant, cette reconnaissance peut exposer les scientifiques à des risques d'instrumentalisation. Ils sont régulièrement sollicités par des acteurs institutionnels et des entreprises privées pour établir des critères normatifs concernant par exemple le nombre d'arbres par hectare, les espèces à planter, le niveau d'ombrage nécessaire et le rôle des paysans dans ces systèmes. Si ces critères et ces indicateurs semblent d'abord relever de considérations techniques, ils résultent en réalité de compromis et de négociations politiques. Leur application dans les zones rurales et dans les forêts classées de la Côte d'Ivoire ne se limite pas à une démarche scientifique, mais implique également un équilibre délicat entre les impératifs économiques, environnementaux et politiques (Di Roberto *et al.*, 2023).

Encadré 27.2. La place de l'expertise dans la Grande Muraille verte

Le projet de la Grande Muraille verte, lancé en 2007 par onze pays africains, a pour objectif de restaurer et de reverdir les terres sahéliennes sur 7000 km, de l'Atlantique à la mer Rouge. Toutefois, malgré une forte volonté politique et d'importants financements, sa mise en œuvre reste inégale et les résultats obtenus sont mitigés.

Plusieurs facteurs expliquent cet échec partiel. Les politiques de plantation, largement basées sur des savoirs scientifiques biophysiques et des approches professionnelles et gestionnaires, ont négligé les dimensions sociales et économiques. Ce projet, conçu de manière descendante, a rencontré divers obstacles, notamment une faible participation des populations locales au processus de restauration (Cesaro *et al.*, 2022). Cette approche a généré des tensions avec les communautés pastorales, qui ont vu leurs pratiques de transhumance entravées. Par ailleurs, la gouvernance locale des ressources n'a pas toujours respecté les règles établies, accentuant les difficultés (Mugelé, 2018).

Face à ces défis, de nombreux chercheurs et techniciens plaident pour une meilleure prise en compte des spécificités sociopolitiques de chaque contexte. C'est pourquoi, ces dernières années, diverses initiatives ont été lancées pour encourager les dialogues entre les scientifiques de différents domaines (sciences sociales, agronomie, environnement, géographie...) et les acteurs politiques (Mugelé, 2022).

déterminantes pour les décisions politiques (Louafi, 2021). Cette analyse invite également à dépasser la vision simpliste d'un État unitaire, souvent réduit aux seules actions des ministres et du Parlement. Trois messages clés émergent de cette réflexion :

- Les politiques publiques dépassent les seules interventions étatiques et mobilisent une multitude d'acteurs à différents niveaux, souvent de manière non coordonnée. Les frontières entre les secteurs public et privé deviennent floues, ouvrant la voie à une diversité d'intervenants à l'interface de ces deux sphères. Ce phénomène, amplifié par la libéralisation, la privatisation et la mondialisation, a favorisé le développement de partenariats variés, l'intégration de normes privées dans le secteur public, et l'implication croissante d'ONG, d'agences internationales et d'entités privées dans l'élaboration et la mise en œuvre des politiques (Hassenteufel, 2011).

- Contrairement à une vision rationnelle centrée sur la résolution de problèmes et des débats informés, le processus politique est souvent imprévisible et discontinu. Ce processus est façonné par la manière dont les décideurs établissent les priorités, fixent des objectifs et choisissent des instruments spécifiques. Une variété d'acteurs publics et privés y participent, formant parfois des coalitions autour de paradigmes communs — valeurs, visions du monde — pour soutenir ou pour contester certaines décisions (Jenkins-Smith *et al.*, 2014). La politique qui en résulte n'est pas nécessairement dictée par la science, mais est plutôt influencée par des facteurs tels que le rôle des acteurs clés, les crises, les contextes économiques, les cadres de négociation, les changements institutionnels et le soutien d'autres parties prenantes.

- Les décisions politiques, prises à différents niveaux, s'accompagnent de processus de mise en œuvre souvent marqués par des objectifs flous, des intérêts contradictoires et des moyens asymétriques. Cela ouvre la voie à des interprétations et à des décisions décentralisées de la part des acteurs impliqués. La mise en œuvre révèle non seulement comment un programme public est appliqué, mais aussi comment il est approprié, parfois en s'éloignant de sa conception initiale (Lascoumes et Le Galès, 2018).

Ces dynamiques soulignent l'importance de comprendre les paradigmes d'action publique qui s'entrecroisent dans la formulation des politiques publiques ainsi que les tensions, les rapports de pouvoir, les routines bureaucratiques et les facteurs institutionnels qui les accompagnent.

Les politiques climatiques, forestières et agricoles révèlent des tensions et des synergies entre des objectifs variés : la conservation de l'environnement, la sécurité alimentaire et le développement socio-économique. Ces objectifs, souvent interconnectés mais parfois contradictoires, se manifestent particulièrement dans la gestion des paysages modifiés par l'activité humaine. En Afrique de l'Ouest, notamment au Ghana et en Côte d'Ivoire, les cultures de cacao, de café, d'hévéa et de palmier à huile, établies sur d'anciens paysages forestiers, illustrent les effets de la disparition de plus de 80 % des forêts depuis 1900 (Aleman *et al.*, 2018). Ces territoires, mêlant terres agricoles, zones délaissées faute de fertilité et fragments de forêts résiduels, incarnent les tensions entre impératifs socio-économiques, conservation de la biodiversité, droits des peuples autochtones et pressions des marchés agricoles mondiaux. La construction de politiques publiques pour ces espaces nécessite une approche intégrée, prenant en compte des échelles spatiales et temporelles variées ainsi que les interactions complexes et les conflits entre secteurs.

Enfin, dans le contexte actuel, marqué par le populisme et la désinformation, la complexité des interactions entre science et politique devient encore plus apparente. L'administration de Donald Trump aux États-Unis illustre comment des problématiques scientifiques et démocratiques peuvent être réduites à des simplifications excessives, conduisant à des décisions polarisées et à des slogans réducteurs. La montée d'une « ère de post-vérité » remet en question l'autorité des travaux scientifiques dans le débat public, fragilisant non seulement la confiance dans la science, mais aussi certains fondements démocratiques (Soneryd et Sundqvist, 2023). Cependant, de nombreux travaux s'accordent sur le fait que la science ne peut être dissociée de la société. Les scientifiques, loin de réduire la réalité à des simplifications, l'enrichissent et jouent un rôle actif dans les processus de transformation sociale.

2. L'interface science-politique au croisement des enjeux climatiques, alimentaires et écologiques

Cette section explore la diversité des ISP dans le domaine climatique et leurs interconnexions avec les enjeux alimentaires et écologiques, en examinant leur fonctionnement à différentes échelles et dans divers contextes. À partir d'exemples internationaux, nationaux et territoriaux, elle met en évidence leurs objectifs, qu'il s'agisse de contribuer à la construction des politiques publiques ou de favoriser l'apprentissage collectif. Elle analyse également les défis structurels et contextuels liés à la production et à l'application des connaissances scientifiques, en intégrant les asymétries nord-sud et les questions intersectorielles.

2.1. Une interface science-politique à diverses échelles

Les ISP se concrétisent de multiples façons et opèrent à différents niveaux, notamment à travers des consultations informelles, des séminaires, des réseaux, des projets, des plateformes d'interaction et d'autres espaces (Wagner *et al.*, 2023). Ces espaces poursuivent divers objectifs : la synthèse et la diffusion de connaissances, le renforcement des compétences, l'appui à l'implémentation et au suivi des politiques, ou encore la mise en place de partenariats.

Dans les domaines du changement climatique, de l'agriculture et des forêts, des initiatives internationales comme le Giec pour la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, l'IPBES pour la Convention sur la diversité biologique, l'interface science-politique de la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification et la dégradation des terres, le Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition et l'Initiative « 4 pour 1 000 » illustrent des exemples significatifs (encadré 27.3). Par exemple, avec la publication de six rapports d'évaluation et de nombreux rapports spéciaux depuis 1990, le Giec cumule plus de trente-cinq ans de dialogue entre scientifiques du climat et représentants des gouvernements.

À l'échelle nationale, de nombreuses instances plus ou moins formelles existent, telles que les comités multiacteurs chargés de la formulation et du suivi des politiques nationales de changement climatique. Parmi ces exemples figurent le groupe d'experts du Brésil sur le changement climatique, la commission nationale de REDD+ (réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts) de la Côte d'Ivoire, le comité national sur le changement climatique au Sénégal et le Haut Conseil pour

le climat en France. À un niveau plus territorial, des comités émergent pour suivre la mise en œuvre des politiques publiques et pour gérer des enjeux concrets tels que les impacts du changement climatique sur l'intensification des crises hydriques.

Par ailleurs, les projets de recherche et de développement adoptent de plus en plus des approches novatrices, comme les observatoires territoriaux. Ces structures sont spécialisées dans la collecte et dans l'analyse systématique de données pour surveiller et comprendre des phénomènes spécifiques. Par exemple, l'Observatoire des dynamiques socio-environnementales (Odyssea) examine la transformation de l'usage des sols dans certains territoires amazoniens en rassemblant et en produisant des données issues de suivis satellitaires, de relevés climatiques et hydrologiques, d'analyses de pollution et d'études des dynamiques sociopolitiques. L'objectif est de mettre ces données au service de la société et de stimuler la « science citoyenne », en mobilisant les syndicats ruraux et en facilitant des processus de changement politique (Commission européenne, 2020).

Encadré 27.3. L'Initiative internationale « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat »

Lancée par la France lors de la COP21 en 2015, l'Initiative internationale « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » promeut l'idée qu'une augmentation annuelle de 0,4% des stocks de carbone dans les sols grâce à des pratiques agricoles ou forestières adaptées permettrait de contribuer substantiellement à la lutte contre le changement climatique et ses effets. Elle reflète les efforts de longue date de la science pour intégrer cette solution dans l'agenda politique (Kon Kam King *et al.*, 2018). Le ministre français de l'Agriculture de l'époque a joué un rôle dans la promotion de cet agenda au niveau international. Son adoption politique est aussi liée à la promesse de réconcilier adaptation et atténuation au changement climatique, un enjeu souvent conflictuel entre les pays du Sud et du Nord, et qui était central dans les négociations de l'accord de Paris. Il s'agit enfin d'une plateforme multiacteur facilitant le dialogue entre les diverses parties prenantes des mondes politique, scientifique, entrepreneurial, de la production et de la société civile.

L'Initiative « 4 pour 1 000 » a contribué avec d'autres initiatives et coalitions (Global Soil Partnership, Adaptation of African Agriculture, Climate Action for Sustainable and Healthy Soils, Coalition pour l'agroécologie) à mettre au premier plan de l'agenda international la question des sols et de leur santé, grâce à un dialogue permanent entre tous les acteurs, y compris les décideurs et les scientifiques, sans oublier les producteurs. D'ailleurs, forte de ses plus de 800 partenaires à travers le monde, elle reste, à ce jour, l'un des rares partenariats globaux pluriacteurs œuvrant sur les sujets du carbone du sol, de la santé des sols au profit de la lutte contre le changement climatique, la désertification, l'érosion de la biodiversité et l'insécurité alimentaire.

Pour plus d'informations, voir : <https://4p1000.org/>

2.2. Contextualiser les processus de négociation et d'apprentissage au sein de l'interface science-politique

Les processus politiques, ainsi que les tensions et les compromis inhérents à la construction des politiques publiques, se manifestent également au sein des ISP, où des négociations s'élaborent à plusieurs niveaux.

Un exemple marquant est l'Évaluation internationale des connaissances, des sciences et des technologies agricoles pour le développement (IAASTD), menée de 2003 à 2008. Ce processus visait à évaluer l'impact des technologies agricoles sur la réduction de la faim et de la pauvreté, tout en sensibilisant le Giec à l'importance des questions agricoles dans le contexte du changement climatique. Il a mis en lumière l'interconnexion croissante entre agriculture et climat, ainsi que la nécessité d'approches interdisciplinaires et inclusives pour relever les défis globaux. Toutefois, l'IAASTD a également dû concilier l'expertise scientifique et l'inclusion de perspectives diverses. Les modèles quantitatifs utilisés pour les scénarios futurs ont été critiqués pour leur caractère réducteur, excluant certaines solutions, notamment en Afrique. Par ailleurs, le débat sur les cultures génétiquement modifiées a exacerbé les divisions entre agriculture industrielle et durable, entraînant le retrait des représentants de l'industrie biotechnologique (Scoones, 2009).

Des tensions similaires apparaissent dans les travaux de l'IPBES, notamment sur les liens entre la biodiversité et l'agriculture. Son premier rapport, publié en 2015 et portant sur la pollinisation, a mis en évidence les controverses liées à l'utilisation des intrants chimiques et à leurs effets sur la biodiversité (Duperray *et al.*, 2017). Dans le domaine de la sécurité alimentaire, les divergences sur la hausse des prix des denrées alimentaires en 2007-2008 ont conduit à la création, en 2009, du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition (HLPE) au sein du Comité de la sécurité alimentaire mondiale des Nations unies. Depuis 2021, cette problématique a été élargie pour inclure des dimensions d'équité, d'accès à une alimentation saine et des modèles agricoles sous-jacents.

Ces tensions sociopolitiques varient selon les contextes. Depuis la fin des années 2000, de nombreux projets d'observatoires scientifiques ont émergé pour suivre, quantifier et documenter les grandes acquisitions foncières. Cependant, la production de données à grande échelle implique des arbitrages influencés par les parties prenantes, les réalités locales et les ressources disponibles. Par exemple, au Cameroun, des divergences internes ont freiné la diffusion des données sur les acquisitions foncières, tandis qu'à Madagascar l'Observatoire du foncier limite la divulgation d'informations sensibles en raison de son rattachement ministériel. De plus, la production de données est confrontée à des contraintes techniques et logistiques, nécessitant des ressources humaines qualifiées. Leur utilisation doit également répondre aux besoins des acteurs cibles. Au Sénégal, par exemple, un décalage entre les attentes des organisations de la société civile et le format des données produites a limité leur impact (Grislain *et al.*, 2023).

En parallèle, la production de recherche et d'expertise dans le cadre de la coopération internationale et des relations nord-sud soulève des questions cruciales. Ces relations mettent en évidence des asymétries de pouvoir et des dynamiques qui influencent directement l'impact des connaissances scientifiques sur les politiques.

Le Giec illustre bien ces enjeux. Ses travaux, répartis en trois groupes, abordent différents aspects du changement climatique : le groupe I évalue les connaissances scientifiques; le groupe II analyse les impacts et les possibilités d'adaptation; et le groupe III explore les solutions d'atténuation. Ce dernier groupe, en lien direct avec les considérations politiques, joue un rôle clé dans les discussions diplomatiques, notamment lors de l'approbation des résumés pour décideurs (ou Summaries for Policymakers). Depuis l'adoption de l'accord de Paris en 2015, les contributions déterminées au niveau national ont renforcé l'importance des ISP à l'échelle nationale,

avec le Giec jouant un rôle croissant dans l'élaboration des stratégies climatiques. Les experts siègent dans des comités scientifiques, conseillent les membres de l'exécutif ou participent directement à des organes décisionnels tels que les ministères de l'Environnement ou de la Science (Pryck et Gaveau, 2023). Toutefois, malgré une augmentation du nombre d'experts issus des pays du Sud depuis les années 1990, ces derniers ne représentaient que 39% des participants au sein du 6e rapport (AR6) (Pryck, 2022). Ce déséquilibre structurel reflète la domination des institutions du Nord, mieux équipées en matière d'infrastructures (comme les superordinateurs) et disposant de réseaux institutionnels plus solides. D'autres facteurs y contribuent, tels qu'une sélection insuffisante d'auteurs par certains points focaux nationaux du Sud, l'absence de rémunération des auteurs, et des interactions limitées entre institutions scientifiques, États, société civile et secteur privé, ainsi que des ressources de communication parfois inadaptées (Yamineva, 2017).

Le dialogue science-politique peut également être envisagé comme un processus d'apprentissage collectif, s'appuyant sur divers savoirs, secteurs et disciplines, et allant au-delà des connaissances scientifiques (Cairney *et al.*, 2016). Ce processus repose sur la collaboration de multiples acteurs et sur l'intégration de différents systèmes de connaissances. Il contribue ainsi à produire des savoirs d'action, essentiels pour faciliter la mise en œuvre d'actions collectives.

Toutefois, l'interaction limitée du Giec avec d'autres ISP à l'échelle internationale freine les possibilités d'apprentissage intersectoriel sur des défis communs. En réponse, un processus informel a été lancé en 2023 à Montpellier, en France, pour mutualiser l'intelligence collective des groupes d'experts travaillant sur le climat, la biodiversité, la santé et les systèmes alimentaires. L'objectif est de renforcer la connectivité entre les échelles locale, nationale et mondiale, et de structurer une communauté de pratique des ISP. Ce projet met l'accent sur la transformation des systèmes agro-alimentaires comme levier clé pour relever les défis interdépendants du développement durable (Caron *et al.*, 2022). Il vise à promouvoir la transversalité entre les ISP, à surmonter les modes de pensée et les pratiques cloisonnées, à améliorer la représentation des parties prenantes et à mieux connecter les échelles, du local au global.

3. Conclusion

Ce chapitre a analysé le rôle des ISP face aux enjeux interconnectés des changements climatiques, des questions alimentaires et des problématiques écologiques. Il a présenté des grilles de lecture permettant de mieux appréhender ces interfaces, tout en mettant en avant la diversité des échelles d'action et des contextes dans lesquels elles s'inscrivent.

En s'appuyant sur des travaux soulignant l'imbrication profonde de la science et de la société, ce chapitre a mis en lumière le rôle actif des scientifiques dans les processus de transformation sociale. Loin de réduire la réalité à des simplifications, la science enrichit les débats et éclaire les choix collectifs. Un focus sur les processus politiques a permis d'explorer les tensions et les compromis inhérents aux interactions entre les scientifiques, les décideurs et autres acteurs dans la formulation et dans la mise en œuvre des politiques publiques. Cette approche dépasse les visions linéaires, qui envisagent la science comme une influence purement technique sur les décisions politiques.

Les exemples étudiés montrent que les ISP sont des espaces de négociations où convergent intérêts divergents, asymétries de pouvoir et enjeux de légitimité.

Par ailleurs, les ISP offrent un potentiel important pour promouvoir des processus d'apprentissage collectif impliquant une diversité d'acteurs : scientifiques, gouvernements, société civile et populations. Ces processus permettent d'élargir les perspectives sur les défis climatiques, de remettre en question les paradigmes qui entravent les processus de changement politique et de redéfinir les approches d'action.

Toutefois, des défis majeurs persistent, notamment en matière de coproduction des savoirs et de prise en compte des incertitudes scientifiques, dans un contexte où la confiance dans les travaux scientifiques est de plus en plus remise en question dans le débat public. En outre, les faibles intégration et coordination entre les nombreuses ISP existantes à l'échelle mondiale limitent leur efficacité. Une contextualisation attentive de ces espaces est essentielle, en tenant compte des besoins en ressources, en compétences et en financements pour garantir leur pérennité.

Au-delà des défis financiers ou de coordination, il est essentiel d'appréhender les dynamiques de pouvoir locales, les rivalités entre groupes d'intérêts et le degré d'ouverture politique aux contributions issues de la recherche et d'autres types de savoirs. Ces dimensions influencent la qualité et la nature des dialogues dans les contextes institutionnels et territoriaux variés. De plus, la mise en place de plateformes de coordination doit éviter de créer des structures éphémères, souvent tributaires des projets de développement internationaux à court terme. Les enjeux géopolitiques, ainsi que l'influence des organisations internationales et des agences de développement sur les politiques publiques des pays du Sud, méritent également une attention particulière.

Enfin, la recherche ne doit pas se limiter à un rôle d'alerte ou à une expertise technique visant à orienter des réformes institutionnelles. Une approche à la fois réflexive et dynamique est indispensable pour faire de la science un levier de transformation face aux défis globaux.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Terri4Sol, avec l'appui financier du Fonds français pour l'environnement mondial : <https://www.terri4sol.org/>

4. Références bibliographiques

- Aleman J.C., Jarzyna M.A., Staver A.C., 2018. Forest extent and deforestation in tropical Africa since 1900. *Nature Ecology & Evolution*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0406-1>
- Cairney P., Oliver K., Wellstead A., 2016. To Bridge the Divide between Evidence and Policy: Reduce Ambiguity as Much as Uncertainty. *Public Administration Review*, 76(3), 399-402. <https://doi.org/10.1111/puar.12555>
- Caron P., Ferrero de Loma-Osorio G., Ferroni M., Lehmann B., Mettenleiter T.C., Sokona Y., 2022. Global food security: Pool collective intelligence. *Nature*, 612(7941), 631-631. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-04471-0>
- Cesaro D., Touré I., Taugourdeau S., Delay E., Diouf A., Ba M., Diop D., Ferrari S., 2022. Reforestation et pastoralisme au Sahel : (Ré)concilier les usages dans les territoires pour une relance de la Grande muraille verte. Conférence des parties (COP15) de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. https://agritrop.cirad.fr/600970/1/POSTER_PPZS_GMV.pdf
- Commission européenne, 2020. Des parties prenantes locales surveillent la dynamique sociale et environnementale de l'Amazonie. *CORDIS | European Commission*. <https://cordis.europa.eu/article/id/422428-involving-local-stakeholders-in-monitoring-social-and-environmental-dynamics-in-the-amazon/fr>

- Di Roberto H., Milhorance C., Sokhna Dieng N., Sanial E., 2023. L'agroforesterie en contexte post-forestier : Perspectives et controverses d'une mise à l'agenda politique en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques*, 356, 81-91. <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37121>
- Dressel M., 2022. Models of science and society: Transcending the antagonism. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 241. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01261-x>
- Duperray F., Hrabanski M., Oubenal M., 2017. First thematic assessment on pollination: Between the legitimization of IPBES and tensions regarding the selection of knowledge and experts. In: *The Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. Routledge.
- Grislain Q., Burnod P., Bourgoin J., Anseeuw W., 2023. Produire, partager et renforcer l'usage des données : Défis et enseignements tirés des observatoires des grandes acquisitions foncières. *Cahiers Agricultures*, 32, 30. <https://doi.org/10.1051/cagri/2023024>
- Hassenteufel P., 2011. *Sociologie politique : L'action publique*. Armand Colin.
- Head B.W., 2022. Coping with wicked problems in policy design. In: *Research Handbook of Policy Design*. Edward Elgar Publishing, 155-175. <https://www.elgaronline.com/display/edcoll/9781839106590/9781839106590.00018.xml>
- Jenkins-Smith H., Nohrstedt D., Weible C.M., Sabatier P.A., 2014. The Advocacy Coalition Framework: Foundations, evolution, and ongoing research. In: Sabatier P.A., Weible C.M., (eds.), *Theories of the policy process* (Third edition). Westview Press, 183-223.
- Koetz T., Farrell K.N., Bridgewater P., 2012. Building better science-policy interfaces for international environmental governance: Assessing potential within the Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 12(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10784-011-9152-z>
- Kon Kam King J., Granjou C., Fournil J., Cecillon L., 2018. Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative—The promises of underground carbon. *Energy Research & Social Science*, 45, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.024>
- Lascoumes P., Le Galès P., 2018. *Sociologie de l'action publique* (Nouvelle éd.). Armand Colin.
- Louafi S., 2021. Les scientifiques alertent mais les politiques ne font rien... Est-ce vraiment si simple? *The Conversation*. <http://theconversation.com/les-scientifiques-alertent-mais-les-politiques-ne-font-rien-est-ce-vraiment-si-simple-158205>
- Mugelé R., 2018. La Grande muraille verte au Sahel : Entre ambitions globales et ancrage local. Bulletin de l'association de géographes français. *Géographies*, 95(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/bagf.3084>
- Mugelé R., 2022. La Grande muraille verte : Utopie mobilisatrice ou outil de développement local? *Grain de sel*, 82-83, 54-55.
- Przyck K.D., 2022. Négocier la science du climat. Le rôle des États membres dans le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Critique internationale*, 95(2), 132-153.
- Przyck K.D., Gaveau A., 2023. Scientists in Multilateral Diplomacy. The Case of the Members of the IPCC Bureau. <https://doi.org/10.1163/25903276-bja10040>
- Sarkki S., Tinch R., Niemelä J., Heink U., Waylen K., Timaeus J., et al., 2015. Adding 'iterativity' to the credibility, relevance, legitimacy: A novel scheme to highlight dynamic aspects of science-policy interfaces. *Environmental Science & Policy*, 54, 505-512. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.02.016>
- Scoones I., 2009. The politics of global assessments: The case of the International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD). *The Journal of Peasant Studies*, 36(3), 547-571. <https://doi.org/10.1080/03066150903155008>
- Soneryd L., Sundqvist G., 2023. *Science and Democracy: A Science and Technology Studies Approach* (1st ed). Bristol University Press. <https://doi.org/10.46692/9781529222159>
- van den Hove S., 2007. A rationale for science-policy interfaces. *Futures*, 39(7), 807-826. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2006.12.004>
- Wagner N., Velandar S., Biber-Freudenberger L., Dietz T., 2023. Effectiveness factors and impacts on policymaking of science-policy interfaces in the environmental sustainability context. *Environmental Science & Policy*, 140, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.008>

Partie 3. Atténuer et adapter les systèmes agricoles et alimentaires

Weible C.M., Nohrstedt D., Cairney P., Carter D.P., Crow D.A., Durnová A.P., *et al.*, 2020. COVID-19 and the policy sciences: Initial reactions and perspectives. *Policy Sciences*, 53(2), 225-241. <https://doi.org/10.1007/s11077-020-09381-4>

Yamineva Y., 2017. Lessons from the Intergovernmental Panel on Climate Change on inclusiveness across geographies and stakeholders. *Environmental Science & Policy*, 77, 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.04.005>

Zo-Bi I.C., Hérault B., 2023. Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des tropiques*, 356, 93-98. <https://doi.org/10.19182/bft2023.356.a37132>

Conclusion

Renforcer les institutions scientifiques nationales indépendantes dans un monde sous tension géopolitique et financière

Michel Eddi, Sébastien Treyer

1. Une mise à l'agenda réussie de transformations réellement systémiques

Depuis la signature de l'accord de Paris lors de la COP21, la science a réussi à mettre à l'agenda politique des transformations réellement systémiques. En 2015, on pouvait craindre que la question du climat, et singulièrement celle de l'atténuation, ne devienne l'unique priorité pour la transformation du secteur des terres, au détriment d'autres objectifs pourtant inséparables. Grâce à l'appui des travaux scientifiques comme le rapport du Giec sur le secteur des terres (IPCC, 2019) ou le rapport d'évaluation mondiale de l'IPBES (2019), le monde s'est désormais doté d'un cadre cohérent d'objectifs à moyen et long terme pour la transformation des systèmes alimentaires et du secteur des terres : les objectifs de développement durable (ODD), l'accord de Paris sur le climat dès 2015, complétés en 2022 par le Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal. Comme le soulignent les rapports mondiaux sur le développement durable (GSDR, 2019 et 2023), seule une transformation profonde des systèmes alimentaires permettra de tenir ensemble ces différents objectifs. La déclaration de Dubai sur l'agriculture à la COP28 en 2023¹ illustre que toutes ces orientations politiques de long terme sont alignées : la plupart des gouvernements de la planète se sont engagés à élaborer avant 2025 une stratégie climat pour le secteur des terres, cohérente avec les objectifs en matière de sécurité alimentaire, de biodiversité et de lutte contre la désertification.

2. Conflits et compétition : un contexte politique entièrement différent de l'esprit de coopération de la COP21

Mais ces objectifs se traduisent-ils dans la réalité des arbitrages politiques, alors que le contexte s'est considérablement tendu ? Les tensions géopolitiques entre grandes puissances et les guerres font prévaloir la compétition, la conflictualité, les rapports de force et la défiance. L'impact des crises successives met aussi à rude épreuve les espaces politiques nationaux qui se polarisent. La capacité à négocier des accords stables semble se dégrader dans toutes les régions. Les pays les plus vulnérables doivent faire face à une crise financière majeure ainsi qu'une crise en matière de sécurité alimentaire. Les pays riches eux aussi réduisent les budgets de la transition

1. <https://www.cop28.com/en/food-and-agriculture>.

écologique et de la solidarité internationale pour le développement. Comment, dans un tel contexte, négocier des transformations profondes des modèles économiques et sociaux ? La solidité des institutions scientifiques dans chacun des contextes nationaux et leur coopération sont essentielles, car elles ont un rôle fondamental à jouer pour garantir l'objectivation et la pertinence du débat politique nécessaire pour opérer de tels changements, pour analyser les gains et les pertes, les gagnants et les perdants, les coûts d'investissement et de transition, les risques et les bénéfices, et pour proposer des solutions maximisant les cobénéfices.

Dans ce contexte de rivalité économique et politique, l'enjeu du climat redevient le seul point d'entrée politiquement praticable. La neutralité carbone a fait son chemin dans les agendas politiques et les stratégies d'entreprises de tous les secteurs, y compris l'agro-alimentaire. L'adaptation et la rareté de l'eau sont devenues des préoccupations centrales pour les agriculteurs. Dans un contexte de rareté des ressources publiques, d'inflation et de crise économique, les enjeux de biodiversité et de pollution sont vite considérés comme secondaires. Pourtant la recherche a très clairement établi que piloter les transformations du secteur des terres uniquement par les objectifs climatiques met en danger la viabilité même du secteur : la santé des sols et de la biodiversité constitue un facteur de production essentiel.

3. Le rôle clé des référentiels des acteurs financiers pour évaluer les cobénéfices au-delà du carbone

Le référentiel d'évaluation établi par le conseil scientifique de l'Initiative « 4 pour 1000 » (4p1000 initiative, 2021) est ainsi très clair à ce sujet : l'accroissement du stock de carbone organique des sols constitue un angle d'attaque majeur pour une transformation des systèmes agricoles, mais il convient de suivre avec attention les impacts de ces modifications sur la sécurité alimentaire, sur le contenu en emploi des filières, sur la biodiversité, etc. L'Agence française de développement s'est donné des objectifs de cobénéfices sur la biodiversité de leurs interventions pour le climat, en particulier dans le secteur agricole et alimentaire. Autre débat actuel majeur, les crédits carbone volontaires apparaissent comme une source potentielle de financement sur laquelle misent beaucoup d'acteurs clés, en particulier en agriculture. Mais il est essentiel que ces crédits focalisés sur le carbone prennent en compte leurs impacts en matière sociale ou de biodiversité. Les références scientifiques jouent ici un rôle majeur d'objectivation et d'élaboration de cadres et d'indicateurs d'évaluation et de suivi.

4. Définir des trajectoires nationales de transformation

À la suite du Sommet des Nations unies sur les systèmes alimentaires de 2021², les trajectoires nationales que les pays se sont engagés à produire sont encore loin de décrire des transformations permettant d'atteindre ensemble tous les objectifs environnementaux et sociaux. Le secteur agricole et alimentaire est tellement stratégique que les pays cherchent absolument à maintenir leur capacité souveraine à choisir les priorités pour la transformation. Pourtant, décrire des trajectoires nationales crédibles de transformation systémique du secteur des terres et de l'industrie agro-alimentaire est l'enjeu clé de la période pour deux raisons. D'abord, les emplois industriels

2. <https://www.un.org/en/food-systems-summit>.

dans ce secteur sont extrêmement importants pour la transformation structurelle de l'économie, parce que ce sont ceux qui n'ont pas encore été délocalisés dans les pays développés, et parce que ce sont ceux qui peuvent déclencher l'industrialisation au Sud (Losch *et al.*, 2010; Dorin *et al.*, 2013; Timmer, 2017; Schwoob *et al.*, 2018). Deuxième raison, développer une vision nationale de la transformation et les programmes d'investissement associés est aujourd'hui identifié comme crucial parmi les solutions permettant aux pays du Sud d'attirer les flux financiers publics comme privés dont ils sont actuellement cruellement dépourvus.

En situation de crise politique et de tensions sur les finances publiques, les risques économiques à court terme peuvent vite prévaloir contre les démonstrations par les scientifiques que sans transformation c'est la viabilité même du système qui est en danger. Des références scientifiques doivent permettre de crédibiliser les chemins de transformation sur deux points critiques : les risques financiers et les rapports de force politique.

5. Nourrir un dialogue international sur les investissements pour la transformation

Comme le montrent les expériences centrées sur la transition énergétique juste (Just Energy Transition Partnerships, JETPs³), les plans d'investissement pour la transformation ne sont crédibles pour les banques de développement publiques et pour les investisseurs privés que s'ils reposent sur une expertise scientifique nationale solide et indépendante, impliquée dans le débat politique et garantissant une appropriation par tous les acteurs des analyses clés sur le coût de la transformation et sur ses impacts distributifs, comme cela a été le cas au Sénégal lors de la négociation du Just Energy Transition Partnership avec les pays financeurs du G7⁴. La coopération internationale entre les institutions scientifiques a donc un rôle clé à jouer pour garantir la solidité des institutions nationales en matière d'expertise sur la transformation systémique et ses enjeux, et sur leur capacité à participer au débat politique en temps troublés.

À l'échelle internationale, la défiance et la conflictualité ne cessent de croître entre Sud et Nord, et entre Ouest et Est. L'espace pour la coopération semble s'être rétréci, mais le financement de l'économie et du climat reste un des sujets sur lesquels la coopération et la solidarité persistent dans l'agenda des rencontres internationales, du G20 aux COP pour le climat. La coopération scientifique entre les pays sur ces sujets est donc essentielle pour soutenir et pour entretenir ce fil essentiel du dialogue, en particulier sur les règles en matière de commerce et d'investissement pour que chaque pays puisse financer sa propre trajectoire de transformation.

6. Références bibliographiques

4p1000 initiative, 2021. Critères de référence et indicateurs pour l'évaluation de projets, Comité scientifique et technique de l'Initiative «4 pour 1000» (2^e version), 12p. https://679d6c62.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2021/12/4p1000_reference-criteria-and-indicators-for-project-assessment_V3_2021_EN.pdf

3. <https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/billet-de-blog/comment-les-jetp-peuvent-ils-etre-utiles-la-cop-28>.

4. https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/Ukama_SEN_v05.pdf.

Dorin B., Hourcade J.-C., Benoit-Cattin M., 2013. A world without farmers? The Lewis path revisited. Working paper 47. Paris, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED).

Giec, 2019. Résumé à l'intention des décideurs. Changement climatique et terres émergées : rapport spécial du Giec sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_fr.pdf

Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General, Global Sustainable Development Report, 2019. The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development, United Nations. https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-07/24797GSDR_report_2019.pdf

Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General, Global Sustainable Development Report, 2023. Times of crisis, times of change: Science for accelerating transformations to sustainable development, United Nations. https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-09/FINAL%20GSDR%202023-Digital%20-110923_1.pdf

IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p. https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_fr.pdf

Losch B., Fréguin-Gresh S., White E., 2012. Structural transformation and rural change revisited: Challenges for late developing countries in a globalizing world. Washington, World Bank.

Schwoob M.H., Timmer P., Andersson M., Treyer S., 2018. Agricultural transformation pathways to the SDGs, Chapter 12. In: Serraj R., Pingali P. (eds), *Agriculture & Food Systems to 2050*, World Scientific Series in Grand Public Policy Challenges of the 21st Century, 417-436. https://www.world-scientific.com/doi/10.1142/9789813278356_0012

Timmer C.P., 2017. Structural transformation and food security: Their mutual interdependence. In: Lin J., Monga C. (eds), *The handbook of structural transformation*. Oxford University Press.

Postface de Stéphane Le Foll

Président de l'Initiative internationale «4 pour 1 000»

Dix ans après la COP21 de Paris, mémorable pour son accord universel (adopté par 195 nations) à maintenir l'augmentation de la température mondiale bien en dessous des 2 °C et à mener des efforts encore plus poussés pour limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels en renforçant la capacité à répondre aux conséquences du changement climatique, où en sommes-nous ?

Les pays développés s'étaient engagés à mobiliser 100 milliards de dollars américains par an pour l'action climatique dans les pays en développement, dans le contexte d'une action significative d'atténuation et d'une transparence sur la mise en œuvre. Cet objectif, qui devait initialement être atteint en 2020, a été prolongé jusqu'en 2025. Nous y sommes là aussi, et quel en est le bilan ?

La hausse de la température moyenne mondiale en référence à l'ère préindustrielle a dépassé, fin 2024, 1,5 °C, et les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial poursuivent leur augmentation (+ 18,2 % entre 2005 et 2020, alors qu'elles auraient dû baisser pour permettre d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris). Il y a urgence à agir, c'est un impératif !

Parallèlement, en 2022, pour la première fois, le montant total des financements en faveur de la lutte contre le changement climatique (montant total fourni et mobilisé, y compris dans l'aide au développement) a dépassé l'engagement annuel des 100 milliards de dollars américains, avec 115,9 milliards, soit + 50 % par rapport à la moyenne des six années précédentes¹. À noter que sur les 115,9 milliards de dollars de 2022, près de 80 % sont des financements publics bilatéraux ou multilatéraux. C'est donc un point positif dont il faut se réjouir. En détail, les deux tiers de ce montant vont aux efforts d'atténuation ; le complément va à l'adaptation. Le secteur de l'agriculture, la sylviculture et la pêche concentrent 18 % des financements alloués à l'adaptation, 4 % de ceux-ci pour l'atténuation et 13 % répondant à ces deux objectifs. C'est-à-dire que 10,4 milliards de dollars américains ont été consacrés au total en 2022 à ces secteurs de production sur les 115,9 milliards, soit 8,9 % du total. Gageons que sur ce total, la part de l'agriculture ne doit pas représenter plus du quart, soit environ 2,5 milliards de dollars américains. Quant aux financements, c'est bien, mais leur ciblage peut être amélioré, sans parler des nouvelles demandes des pays en développement concernant cette enveloppe de financements en faveur de la lutte

1. OCDE (2024), Financement climatique fourni et mobilisé par les pays développés en 2013-2022, Le financement climatique et l'objectif des 100 milliards de dollars, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9db2b91d-fr>.

contre le changement climatique, qu'ils souhaitent voir atteindre 1 000 milliards de dollars américains à terme.

Depuis l'accord de Paris, nous sommes de plus en plus nombreux à reconnaître le potentiel fantastique d'atténuation et d'adaptation que représente le secteur agricole, grâce aux sols. La COP21 a marqué le début de cette prise de conscience sur le plan international avec entre autres la naissance de l'Initiative internationale « 4 pour 1 000 » qui promeut la séquestration du carbone dans les sols, notamment grâce à l'adoption de pratiques agroécologiques. À la COP22, il y eut l'Initiative AAA (Adaptation de l'agriculture africaine), à la COP23, la naissance de l'action commune de Koronivia pour l'agriculture, jusqu'à la COP28 à Dubai et la Déclaration sur l'agriculture durable, les systèmes alimentaires résilients et l'action climatique adoptée par 159 pays, reconnaissant enfin l'importance de l'agriculture dans le contexte de la lutte contre le changement climatique.

Nous savons aujourd'hui que certaines pratiques agricoles et forestières permettent de limiter les émissions de GES et surtout de stocker du carbone dans les sols. La solution réside dans les sols, leur santé, leur richesse en carbone, et surtout dans la façon dont on en prend soin. Or, la perception de l'importance des sols et de leur santé, qui doit être l'objet de toutes nos attentions, n'est malheureusement pas la même dans tous les pays, même si, comme on l'a vu, la prise de conscience globale s'accroît chaque jour.

Les solutions existent au niveau du terrain et ne sont pas toujours l'objet d'innovation, mais souvent de « rénovation » ou de remise au goût du jour de pratiques agroécologiques déjà existantes au niveau des agriculteurs et des éleveurs (agriculture biologique, agriculture biodynamique, agroforesterie, etc.). Il faut étudier ces solutions, les évaluer scientifiquement et les adapter aux conditions locales, car il n'y a pas de solution unique qui réponde à toutes les situations, mais une multitude de solutions adaptées. L'enjeu est donc d'améliorer les pratiques (agriculture de conservation, pâturage dynamique tournant, etc.) développées depuis plusieurs décennies et leur évaluation scientifique, pour donner du corps aux futures orientations agricoles, avec une vraie question qui est celle du passage à l'échelle de ces bonnes pratiques.

Dans ce contexte, le rôle des politiques, au sens noble du terme, est majeur pour la mise en place de politiques allant dans la bonne direction et favorisant l'adoption des bonnes pratiques agroécologiques. Il est vrai que la science n'est pas toujours en mesure de trancher clairement sur les résultats de telle ou telle pratique, mais cette incertitude ne doit pas être prétexte à l'inaction, voire à la procrastination. La science a des éléments de réponse à apporter en matière de mesure, de suivi, d'évaluation et de vérification pour permettre de s'y retrouver et de guider le mieux possible le choix des décideurs, des agriculteurs et des entreprises, car ce qui se mesure bien se gère bien, voire mieux. Enfin, un autre enjeu réside dans le rôle des consommateurs et de l'information qui leur permettrait d'avoir un impact, par le biais des produits achetés, sur les modes de production et sur les pratiques aux champs.

Il y a dix ans paraissait l'ouvrage *Changement climatique et agricultures du monde*² qui nous faisait prendre conscience, si besoin était, de l'impact du changement climatique sur les systèmes agricoles et alimentaires, et de la nécessité de réduire nos émissions et de travailler à l'adaptation de nos systèmes agricoles et alimentaires. Aujourd'hui, il nous faut voir aussi les interactions dans les deux sens, afin de tirer profit de nos connaissances pour définir des lignes d'action rapides, à la fois tournées vers le global et le local.

À cet effet, ce nouvel ouvrage interdisciplinaire identifie et analyse cet impact dans des territoires et pour des filières variés (notamment sous les tropiques), de façon que les connaissances produites servent à alimenter le dialogue entre science et société sur le changement climatique et orientent l'action en matière d'adaptation et d'atténuation en proposant des solutions. Un ouvrage de référence à conseiller à tous décideurs politiques, avant et pendant l'action.

2. Torquebiau E. (éd.), 2015. *Changement climatique et agricultures du monde*, collection : Agricultures et défis du monde (Cirad-AFD), Versailles, éditions Quæ, 328 p.

Remerciements

La dimension globale que nous avons souhaitée donner à cet ouvrage, ainsi que la diversité des contextes et des systèmes agricoles, alimentaires et forestiers impliquait un regard multidisciplinaire et croisé. Nous avons donc naturellement sollicité des auteurs d'horizons et de disciplines diversifiés et complémentaires. C'est à eux que nous adressons d'abord nos remerciements. Ils sont près de 150 (voir la liste en fin d'ouvrage)! Nous leur adressons donc un grand et chaleureux merci collectif.

Le projet de cet ouvrage s'est construit en étroite collaboration avec la Direction générale déléguée à la recherche et à la stratégie (DGD-RS) du Cirad qui en a assuré le financement. Nous tenons en particulier à remercier sincèrement Philippe Petithuguenin qui nous a apporté un soutien sans faille en tant que directeur général délégué à la recherche.

La rédaction d'un ouvrage est une chose, l'organisation de son édition en est une autre. Nous avons pu en prendre la mesure lors des différentes étapes de mise en place, de conception, de réalisation et de correction. Avant tout, un grand merci à l'équipe éditoriale de Quæ qui nous a accompagnés avec une grande efficacité tout au long de ce projet, à Sophie De Decker pour sa relecture attentive et éclairée de la forme du manuscrit, et à Hélène Bonnet pour le travail de mise en page.

Nous remercions enfin les relecteurs scientifiques, dont les contributions ont été essentielles à l'amélioration du contenu de l'ouvrage.

Abréviations

ACC : adaptation au changement climatique

ACV : analyse du cycle de vie

AF : agriculture familiale

AFOLU : Agriculture, foresterie et autres utilisations des terres ou Agriculture, Forestry and Other Land Use

AR : Assessment Report

C : carbone

CC : changement climatique

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC en anglais)

CDN : contribution déterminée au niveau national

Cedeao : Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest

CGIAR : Consultative Group on International Agricultural Research

Cive : culture intermédiaire à vocation énergétique

CNULCD : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification

COP27/COP25 : Conférence des parties

COS : carbone organique du sol (SOC en anglais)

Corsia : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

CRB : centre de ressources biologiques

CSA : agriculture climato-intelligente ou *climate-smart agriculture*

EA : exploitation agricole

ENR : énergies renouvelables

ENSO : El Niño-Southern Oscillation

ERC : séquence « éviter, réduire, compenser »

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

FAOSTAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database

Fida : Fonds mondial de transformation de l'agriculture (Ifad en anglais)

GES : gaz à effet de serre

Gire : gestion intégrée des ressources en eau

GMP : Global Methane Pledge

Giec : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)

HLPE : Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition (High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition)

IEA : International Energy Agency

IPBES : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Giec en français)

Ippu : procédés industriels et utilisation des produits

ISP : interface science-politique

ITMO : *internationally transferred mitigation outcome* ou crédits carbone

LULUCF : Land Use, Land Use Change and Forestry

Maec : mesures agroenvironnementales et climatiques

Mena : Middle East and North Africa (ANMO en français)

MDP : mécanisme de développement propre

Moc : mécanisme de mise en œuvre conjointe

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique

ODD : objectif de développement durable

OIM : Organisation internationale pour les migrations

OMC : Organisation mondiale du commerce

OMM : Organisation météorologique mondiale

OMS : Organisation mondiale de la santé

ONG : organisation non gouvernementale

PNA : plan national d'adaptation

PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement

PRG : potentiel de réchauffement global

PSE : paiements pour services environnementaux

RCP : *representative concentration pathways*

REDD+ : réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts

RNA : régénération naturelle assistée

RSPO : Roundtable on Sustainable Palm Oil

SBSTA : Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice

Saf : système agroforestier

SELMET : Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

SFN : solutions fondées sur la nature

SOC : carbone organique du sol (COS en français)

SRCCCL : Special Report on Climate Change and Land

SSP : *shared socio-economic pathways*

UE : Union européenne

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

Unep : United Nations Environment Programme

USDA : United States Department of Agriculture

UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie

Liste des auteurs

Myriam Adam : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France; Faculty of Agriculture and Food Processing, National University of Battambang, Battambang, Cambodia.

Amandine Adamczewski : Cirad, UMR G-EAU, Montpellier, France.

Koladé Akakpo : Cirad, UMR G-EAU, Meknes, Maroc.

Véronique Alary : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Arlène Alpha : Cirad, UMR MoISA, Montpellier, France; MoISA, Univ Montpellier, Cirad, CIHEAM-IAMM, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Véronique Ancey : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), Montpellier, France.

Nadine Andrieu : Cirad, UMR Innovation, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France. Innovation, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Mohamed Habibou Assouma : UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), université de Montpellier, Cirad, INRAE, Montpellier Institut Agro, Montpellier, France; Cirad, UMR SELMET, dP ASAP (systèmes agro-sylvo-pastoraux en Afrique de l'Ouest), Bobo Dioulasso, Burkina Faso; Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

Bruno Bachelier : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Victoria Bancal : Cirad, UMR Qualisud, Abidjan, Côte d'Ivoire; UFR Sciences et Technologies des Aliments, université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire; Qualisud, Univ Montpellier, Avignon Université, Cirad, Institut Agro, université de La Réunion, Montpellier, France.

Carine Barbier : UMR Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, CNRS, ENPC, Cirad, AgroParisTech, EHESS, Montpellier, France.

Isabelle Basile-Doelsch : université Aix-Marseille, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France.

Damien Beillouin : Cirad, UPR HortSys, Campus agro-environnemental Caraïbe (CAEC), Martinique, France; HortSys, Cirad, université de Montpellier, Montpellier, France.

Raphaël Belmin : Cirad, UPR HortSys, Institut Sénégalais de Recherche Agricole, Dakar, Sénégal; HortSys, Cirad, université de Montpellier, France.

David Berre : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Benoît Bertrand : Cirad, UMR DIADE, Montpellier, France; DIADE, université de Montpellier, IRD, Cirad, Montpellier, France.

Yannick Biard : Cirad, UPR HortSys, Montpellier, France; HortSys, Cirad, université de Montpellier, Montpellier, France; ELSA (Environmental Life cycle and Sustainability Assessment), Montpellier, France.

Philippe Birnbaum : Cirad, UMR AMAP, Univ Montpellier, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France; Institut agronomique néo-calédonien (IAC), Nouvelle-Calédonie.

Lilian Blanc : Cirad, UPR Forêts et Sociétés, Montpellier, France; Forêts et Sociétés, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Vincent Blanfort : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Séverine Bouard : IAC (Institut agronomique néo-calédonien), Nouvelle-Calédonie; Lincoln University, Lincoln, New Zealand.

Magalie Bourblanc : Cirad, UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU), Montpellier, France.

Jérémie Bourgoïn : Cirad, UMR TETIS, International Land coalition, Rome, Italie.

Nicolas Bricas : Cirad, UMR MoISA, Montpellier, France; MoISA, université de Montpellier, CIHEAM, Cirad, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Rémi Cardinael : Cirad, UPR Aïda, Univ Montpellier, Montpellier, France; Department of Plant Production Sciences and Technologies, University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe.

Alexandre Caron : UPR Forêts et Sociétés, UMR ASTRE, Cirad, Montpellier, France.

Fabian Carriconde : IAC (Institut agronomique néo-calédonien), Nouvelle-Calédonie, France.

Cécile Chéron-Bessou : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Grâce Chidikofan : Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey (ENSGEP/UNSTIM), Bénin.

Mathias Christina : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Christian Corniaux : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

François-Xavier Côte : Cirad, DGD-RS, Montpellier, France.

Der Dabire : Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

Hélène David-Benz : Cirad, UMR MoISA, Saint-Pierre, La Réunion, France; MoISA, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, Cirad, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Alexis Delabouglise : Cirad, UMR ASTRE, Montpellier, France.

Julien Demenois : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Valérie Dermaux : DGPE, ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, France.

Cyril Diatta : Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse, Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, Thiès, Sénégal.

Hadrien Di Roberto : Cirad, UMR ART-Dev, Université Houphouët Bouany, Côte d'Ivoire.

Julien Drouin : IAC (Institut agronomique néo-calédonien), Nouvelle-Calédonie, France.

Antoine Ducastel : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), FAO, Rome, Italie.

Raphaëlle Ducrot : Cirad, UMR G-EAU, Université Royale d'Agriculture, Phnom Penh, Cambodge.

Patrice Dumas : Cirad, UMR Cired, Montpellier, France.

Julie Dusserre : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Guillaume Duteurtre : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Pierre-François Duyck : Cirad, BIOS, UMR PVBMT, Nouvelle-Calédonie, France.

Michel Eddi : ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Iddri, Paris, France.

Hervé Etienne : Cirad, UMR DIADE, Montpellier, France; DIADE, université de Montpellier, IRD, Cirad, Montpellier, France.

Abigail Fallo : Cirad, UMR SENS, Montpellier, France; SENS, Univ Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Frédéric Feder : Cirad, UPR Recyclage et Risque, Univ. Montpellier, Montpellier, France.

Daniel Fonckea : Cirad, UMR AGAP, Montpellier, France; Cirad, INRAE, AGAP, université de Montpellier, Institut Agro, Montpellier, France.

Vincent Freycon : UPR Forêts et Sociétés, Cirad, Montpellier, France.

Franck Galtier : Cirad, UMR MoISA, Montpellier, France; MoISA, Univ Montpellier, Cirad, CIHEAM-IAMM, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Adèle Gaveau : université de Lausanne, Suisse.

Frédéric Gay : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Edward Gérardeaux : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Pierre Girard : Cirad, UMR ART-Dev, Ghana.

Mathieu Gonin : Cirad, UMR DIADE, Montpellier, France; DIADE, université de Montpellier, IRD, Cirad, Montpellier, France; National Coffee Research Institute, National Agricultural Research Organization, Mukono, Uganda.

Flavie L. Goutard : Cirad, UMR ASTRE, National Institute of Animal Science (NIAS), Hanoi, Vietnam.

Christine Granier : INRAE, UMR AGAP Institut, Montpellier, France.

Cécile Grenier : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Isabelle Grechi : Cirad, UPR HortSys, université de Montpellier, Montpellier, France.

Émeline Hassenforder : Cirad, UMR G-EAU, Institut national agronomique de Tunisie (INAT), Tunis, Tunisie.

Bruno Héroult : UPR Forêts et Sociétés, Cirad, Montpellier, France.

Alexandre Hobeika : Cirad, UMR MoISA, Montpellier, France; MoISA, Univ Montpellier, Cirad, CIHEAM-IAMM, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Marie Hrabanski : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), Montpellier, France.

Camille Jahel : Cirad, UMR TETIS, Montpellier, France.

Christophe Jourdan : Cirad, UMR Eco&Sols, Montpellier, France; Eco&Sols, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France.

Éric Justes : Cirad, PERSYST, Montpellier, France.

Rémi Kahane : Cirad, UPR HortSys, université de Montpellier, Montpellier, France.

Maguette Kaire : AGRHYMET, Centre Climatique Régional pour l'Afrique de l'Ouest et le Sahel (CCR-AOS), Niamey, Niger.

Saverio Krätli : International Union of Anthropological and Ethnological Sciences (IUAES), Commission on Nomadic Peoples (CNP), Lewes, Royaume-Uni.

Laurent Laplaze : UMR DIADE, université de Montpellier, IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Montpellier, France.

Fabrice Le Bellec : Cirad, UPR HortSys, université de Montpellier, Montpellier, France.

Jean-François Le Coq : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), Montpellier, France.

Caroline Lejars : Cirad, UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU), Montpellier, France.

Sophie Lérans : Cirad, UMR DIADE, Montpellier, France; DIADE, université de Montpellier, IRD, Cirad, Montpellier, France; Nicafrance Foundation, Finca La Cumplida, Matagalpa, Nicaragua.

Audrey Leopold : IAC (Institut agronomique néo-calédonien), Nouvelle-Calédonie, France.

Guillaume Lestrelin : Cirad, UMR TETIS, Institut national agronomique de Tunisie (INAT), Tunis, Tunisie.

Didier Lesueur : Cirad, UMR Eco&Sols, Montpellier, France; Alliance of Biodiversity International and International Center for Tropical Agriculture (Ciat), Asia hub, Common Microbial Biotechnology Platform (CMBP), Hanoi, Vietnam.

Laurent L'Huillier : IAC (Institut agronomique néo-calédonien), Nouvelle-Calédonie, France.

Bruno Locatelli : UPR Forêts et Sociétés, Cirad, Montpellier, France.

Romain Loison : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Sélim Louafi : Cirad, DGD-RS, Montpellier, France.

Delphine Luquet : Cirad, département Bios, Montpellier, France.

Paul Luu : Initiative internationale « 4 pour 1000 », Montpellier, France.

Alexandre K. Magnan : Iddri, Paris, France.

Éric Malézieux : Cirad, UPR HortSys, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France; HortSys, Cirad, université de Montpellier, Montpellier, France.

Pierre Marraccini : Cirad, UMR DIADE, Montpellier, France; DIADE, université de Montpellier, IRD, Cirad, Montpellier, France.

Thibaud Martin : Cirad, UPR HortSys, université de Montpellier, Montpellier, France.

Gilles Massardier : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), Montpellier, France.

Dominique Masse : IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier, France; Eco&Sols, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, IRD, InstitutAgro, Montpellier, France; Pole de recherche Intensification Écologique des Sols Cultivés en Afrique de l'Ouest (IESOL), IRD, ISRA, Dakar, Sénégal.

Pierre-Louis Mayaux : Cirad, UMR Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU), Montpellier, France.

Patricio Mendez del Villar : Cirad, UMR TETIS, Univ Montpellier, AgroParisTech, Cirad, CNRS, INRAE, Montpellier, France.

Sara Mercandalli : Cirad, UMR ART-Dev, Montpellier, France.

- Christophe Menkès** : Institut de recherche pour le développement (IRD), UMR ENTROPIE, Ifremer, IRD, Univ. La Réunion, Univ. Nouvelle-Calédonie, CNRS, Nouvelle-Calédonie.
- Fabienne Micheli** : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Carolina Milhorange** : Cirad, UMR ART-Dev, Montpellier, France.
- Yves Montouroy** : LC2S, université des Antilles, France.
- Roxane Moraglia** : DGPE, ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, France.
- Ronan Mugelé** : UMR Prodig, Aubervilliers, France.
- Audrey Naulleau** : Cirad, UMR Innovation, Tunis, Tunisie. Innovation, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Jacques André Ndione** : Agence régionale pour l'agriculture et l'alimentation (ARAA), CEDEAO, Lomé, Togo.
- Marie Ange Ngo Bieng** : UPR Forêts et Sociétés, Cirad, Montpellier, France; Unidad bosques y biodiversidad en paisajes productivos, CATIE, Guatemala.
- Boris Parent** : UMR LEPSE, université de Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Sandra Payen** : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Régis Peltier** : Cirad, UPR Forêts et Sociétés, Montpellier, France.
- Antoine Perrier** : Institut Agro Angers, Angers, France.
- Marisa Peyre** : Cirad, UMR ASTRE, Montpellier, France.
- François Pinta** : Cirad, UPR BioWooEB (biomasse, bois, énergie, bioproduits) université de Montpellier, Montpellier, France.
- Camille Piponiot** : Cirad, UPR Forêts et Sociétés, Montpellier, France.
- René Pocard Chapuis** : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), EMBRAPA Amazonia Oriental, Belém, Brésil.
- Christophe Poser** : Cirad, UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles (Aïda), Montpellier, France; Aïda, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.
- David Pot** : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Alexia Prades** : Cirad, DGD-RS, Montpellier, France.
- Rémi Prudhomme** : Cirad, UMR CIRED, Nogent-sur-Marne, France.
- Bruno Rapidel** : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.
- Clément Rigal** : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France; WorldAgroforestry, Vietnam Office, Hanoï, Vietnam.
- Aude Ripoché** : Cirad, UMR Aïda, Station de La Bretagne, Saint-Denis, La Réunion, France.
- Alain Rival** : Cirad, UMR ABSys, Montpellier, France; UMR ABSys, université de Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro de Montpellier, Montpellier, France; Cirad DRASEI, Jakarta, Indonesia.
- Maria Camila Rebolledo** : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France; Alliance Bioversity Ciat, Palmira, Colombia.
- François Roger** : Cirad, DGD-RS, Van Phuc Diplomatic Compound, Hanoï, Vietnam.

Fatma Rostom : Cirad, UMR ART-Dev, Montpellier, France.

Catherine Sabinot : Institut de recherche pour le développement (IRD), EspaceDev IRD, Univ Montpellier, Univ Guyane, Univ La Réunion, Univ Antilles, Univ Nouvelle Calédonie, Univ Perpignan, France.

Éric Sabourin : Cirad, UMR ART-Dev, Montpellier, France.

Sylvain Schmitt : Cirad, UPR Forêts et Sociétés, Montpellier, France; Forêts et Sociétés, Univ. Montpellier, Cirad, Montpellier, France.

Ninon Sirdey : Cirad, UMR MoISA, Montpellier, France; MoISA, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, Cirad, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France.

Jean-Michel Sourisseau : Cirad, UMR Acteurs Ressources Territoires & Développement (ART-Dev), Montpellier, France.

Adèle Tanguy : Iddri, France.

Jacques Tassin : Cirad, UPR Forêts et Sociétés, Montpellier, France.

Tiago Teixeira Da Silva Siqueira : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Saint-Pierre, La Réunion, France.

Mohamed Lamine Tékété : Institut d'Économie Rurale, Bamako, Mali.

Maxime Tesch : Cirad, UMR ASTRE, Montpellier, France.

Philippe Thaler : IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier, France; Eco&Sols, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France.

Didier Tharreau : Cirad, UMR PHIM, Montpellier, France.

Emmanuel Torquebiau : Cirad, Montpellier, France.

Sébastien Treyer : Iddri, Paris, France.

Michel Vaksman : Cirad, UMR AGAP Institut, Montpellier, France; UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, Cirad, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Anais Valance : Haut Conseil pour le Climat, Paris, France.

Élodie Valette : Cirad, UMR ART-Dev, Montpellier, France.

Jonathan Vayssières : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Mathieu Vigne : Cirad, UMR SELMET (Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux), Univ. Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France.

Daan Vink : Cirad, UMR ASTRE, Montpellier, France.

Nicolas Viovy : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), CEA-CNRS-UVSQ, université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

Marie Walser : Chaire Unesco Alimentations du monde, Cirad, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Moussa Waongo : AGRHYMET, Centre Climatique Régional pour l'Afrique de l'Ouest et le Sahel (CCR-AOS), Niamey, Niger.

Tom Wassenaar : Cirad, UPR Recyclage et Risque, Univ. Montpellier, Montpellier, France.

Mathieu Weil : Cirad, UMR Qualisud, Montpellier, France; Qualisud, université de Montpellier, Cirad, Institut Agro, Avignon Université, université de La Réunion, Montpellier, France.

Photographie de couverture : Cyrille Cornu © Cirad.
Photographie aérienne (drone) de rizières dans la région d'Ambalavao à Madagascar.

Édition : Sophie De Decker

Mise en pages et infographie : Hélène Bonnet, Studio9

À l'échelle mondiale, les systèmes agricoles, alimentaires et forestiers produisent plus du tiers des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi significativement au changement climatique. Dans le même temps, ces secteurs en subissent fortement les conséquences, notamment dans les pays du Sud. Cependant, ils disposent aussi d'un fort potentiel d'adaptation et d'atténuation, notamment *via* la séquestration du carbone dans les sols et la biomasse, sur lesquels il convient de s'appuyer pour établir des synergies d'actions.

Cet ouvrage questionne et explore la diversité des stratégies nécessaires à différentes échelles — génétique, pratiques agricoles, politiques publiques, commerce, finance — pour transformer durablement les systèmes agricoles et alimentaires face au changement climatique. Il souligne l'urgence de changements systémiques pour opérer de véritables transformations et anticiper les changements (évolution des modèles agricoles dominants, reterritorialisation, adaptation des systèmes alimentaires, réduction des pertes...) et la nécessité de les adapter aux contextes bioclimatiques, socioéconomiques et politiques.

Mobilisant près de 150 scientifiques du Nord et du Sud, ce livre met en lumière le rôle central de la recherche face à l'un des plus grands défis de notre époque.

Vincent Blanfort, ingénieur en agro-développement et docteur en agroécologie, est chercheur et chargé de mission « Changement climatique » au Cirad (UMR Selmet). Ses recherches portent sur les bilans carbone dans les systèmes d'élevage au pâturage.

Julien Demeois, ingénieur des Ponts, des eaux et des forêts et docteur en écologie fonctionnelle, est chercheur et chargé de mission « 4 pour 1 000 » au Cirad (UR Aïda). Il travaille sur la séquestration du carbone dans les sols tropicaux.

Marie Hrabanski est chercheuse en sociologie politique au Cirad (UMR Artdev). Ses travaux portent sur la fabrication et la mise en œuvre des politiques et instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique dans les Nord et les Suds.

Les trois coordinateurs animent le champ thématique stratégique du Cirad « Accompagner toutes les agricultures du monde au changement climatique ».

En couverture : Cyrille Cornu © Cirad. Photographie aérienne (drone) de rizières dans la région d'Ambalavao à Madagascar.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com



39 €

ISBN : 978-2-7592-4008-1



Réf. : 03008