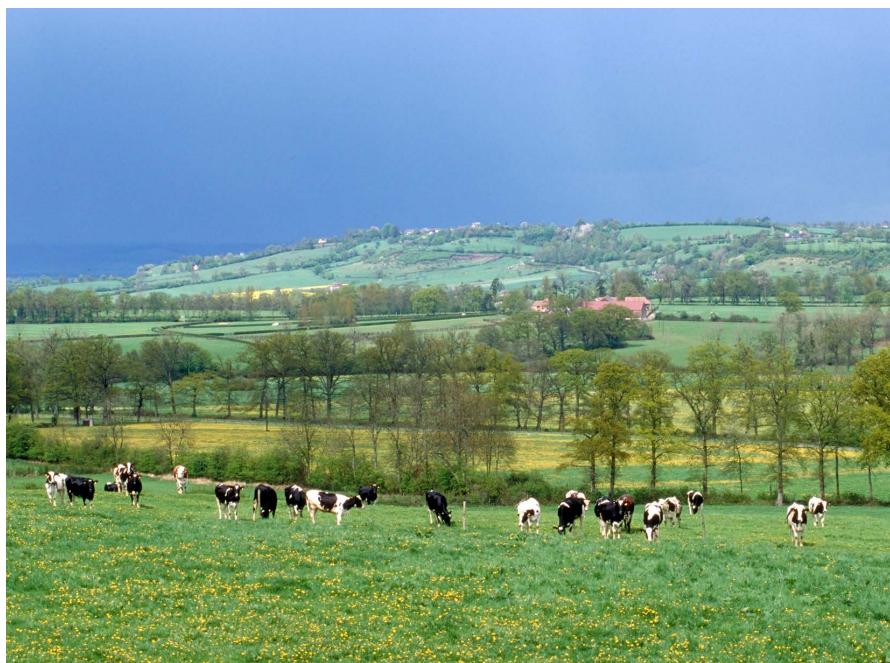


AGRICULTURE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Impacts, adaptation et atténuation

P. Debaeke, N. Graveline, B. Lacor, S. Pellerin,
D. Renaudeau, É. Sauquet, coord.



Agriculture et changement climatique

Impacts, adaptation et atténuation

Philippe Debaeke, Nina Graveline,
Barbara Lacor, Sylvain Pellerin,
David Renaudeau, Éric Sauquet (coordinateurs)

Éditions Quæ

Collection Synthèses

Les mycotoxines

Connaissances actuelles et futurs enjeux
Oswald I., Forget F., Puel O. (Coords),
2024, 272 p.

Towards pesticide-free agriculture
Research and innovations
in a future crop protection paradigm
Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Jouan J.,
Latruffe L., Le Cadre E., Malusa T.,
Reboud X., Huygue C. (Coords),
2024, 224 p.

Épigénétique

Mécanismes moléculaires,
biologie du développement
et réponses à l'environnement
Jammes H., Boudry P., Maury S. (Coords),
2024, 194 p.

De l'arbre en ville à la forêt urbaine
Castagnyrol B., Muller S.,
Paquette A. (Coords),
2024, 188 p.

Pour citer cet ouvrage :

Debaeke P., Graveline N., Lacor B., Pellerin S., Renaudeau D., Sauquet É., coord.,
2025. *Agriculture et changement climatique. Impacts, adaptation et atténuation*,
Versailles, éditions Quæ, 398 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4012-8>.

L'édition de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier du métaprogramme CLIMAE,
de la Direction pour la science ouverte (DipSO) et des départements PHASE, Génétique animale,
AQUA, AgroEcoSystem et ACT d'INRAE.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

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

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4011-1
ISBN epub : 978-2-7592-4013-5

ISBN PDF : 978-2-7592-4012-8
ISSN : 1777-4624

Sommaire

Préface	7
<i>Jean-François Soussana</i>	
Introduction.....	9
<i>Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin, David Renaudeau, Éric Sauquet</i>	
Des impacts majeurs sur la production agricole.....	9
Adapter les systèmes agricoles et atténuer leurs émissions.....	10
Une référence actualisée des problématiques liées au changement climatique en agriculture.....	11
Références	15
 PARTIE 1	
ÉTAT DES LIEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	
Chapitre 1. Aperçu du changement climatique en France.....	19
<i>Jean-Michel Soubeyroux, Brigitte Dubuisson, Lola Corre,</i>	
<i>Mathieu Régimbeau, Iñaki García de Cortázar-Atauri</i>	
Climat actuel et tendances en France	19
Évapotranspiration, bilan hydrique et sécheresse du sol.....	26
Climat futur et projections des variables agroclimatiques	28
Conclusion	34
Références	36
Chapitre 2. L'eau, les sols et le changement climatique.....	37
<i>Éric Sauquet, Annette Bérard, Claude Doussan, Yves Tramblay, Fabienne Rousset</i>	
L'eau verte.....	37
L'eau bleue	46
Conclusion	52
Références	52
 PARTIE 2	
MÉTHODES D'ANALYSE ET DE PROJECTION DES IMPACTS	
DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AGRICULTURE	
Chapitre 3. Indicateurs et observatoires pour mettre en évidence et comprendre les impacts du changement climatique en France.....	59
<i>Iñaki García de Cortázar-Atauri, Maël Aubry, Éric Ceschia, Isabelle Chuine,</i>	
<i>Dominique Courault, Carina Furusho-Pericot, Marie Launay, Renan Le Roux</i>	
L'observation de la phénologie, une histoire de données et de réseaux	60
Les données d'observation de la phénologie : des indicateurs de l'évolution du climat et de la biodiversité.....	63
La modélisation de la phénologie ou comment représenter simplement un processus complexe....	65

Les indicateurs agroclimatiques : des informations synthétiques pour caractériser les impacts du changement climatique	66
Les indicateurs écoclimatiques : mieux prendre en compte la phénologie pour caractériser les impacts	68
Quelques exemples de services construits à l'aide des indicateurs agroclimatiques et écoclimatiques	72
Conclusion	75
Références	78
Chapitre 4. Modèles biophysiques de projection des impacts du changement climatique sur les cultures de l'échelle locale à l'échelle mondiale.....	83
<i>Nicolas Guilpart, Erwan Personne, David Makowski</i>	
Les types de modèles.....	84
L'utilisation des modèles pour estimer les impacts du changement climatique	90
Conclusion	96
Références	98
Chapitre 5. Approches économiques de l'évaluation d'impact du changement climatique sur l'agriculture.....	103
<i>Loïc Henry</i>	
Les approches mécaniques de l'évaluation d'impact	104
Les approches économétriques de l'évaluation d'impact.....	108
Les approches par les modèles économiques globaux.....	113
Conclusion	116
Références	117
PARTIE 3	
IMPACTS OBSERVÉS ET PROJETÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	
SUR LES FILIÈRES ANIMALES ET VÉGÉTALES	
Chapitre 6. Impacts observés et projetés du changement climatique sur les grandes cultures et les prairies.....	123
<i>Philippe Debaeke, Jean-Louis Durand</i>	
Effets des changements climatiques sur la réponse écophysiollogique des plantes.....	124
Conséquences pour la production et la conduite en grandes cultures.....	132
Conséquences pour la production et pour la gestion des prairies	148
Conclusion	152
Références	152
Chapitre 7. Impacts observés et projetés du changement climatique sur les filières de production : cas des cultures pérennes (vigne, arbres fruitiers)	161
<i>Nathalie Ollat, Bénédicte Quilot, Cornelis Van Leeuwen, Bénédicte Wenden</i>	
La phénologie.....	162
Les rendements	166
La qualité de la récolte	170
La résilience face aux fortes contraintes	174
Conclusion	180
Références	180

Chapitre 8. Santé des plantes et changement climatique.....	187
<i>Marie Launay, Marie-Odile Bancal, Nathalie Colbach, Sylvain Pincebourde, Tiphaine Vidal</i>	
Les différents concepts au cœur de la santé des plantes.....	189
Impacts observés et attendus du changement climatique sur les bioagresseurs.....	192
Comment étudier un phénomène qui n'a pas encore eu lieu ?	202
Conclusion	211
Références	212
Chapitre 9. Impacts du changement climatique sur l'élevage.....	221
<i>David Renaudeau, Hélène Gilbert, Anne Collin, Aurélie Vinet, Stephan Zientara</i>	
Vulnérabilité du secteur de l'élevage face au changement climatique	222
Impacts du changement climatique sur l'élevage.....	223
Conclusion	235
Références	237
PARTIE 4	
ADAPTATION DE L'AGRICULTURE	
AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	
Chapitre 10. Construire un cadre d'analyse et d'action pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique.....	243
<i>Jean-Marc Touzard, Gabrielle Bouleau</i>	
Adaptation : de l'usage commun à un concept scientifique pour l'agriculture face au changement climatique.....	244
Enseignements des projets conduits dans le cadre du métaprogramme Accaf	251
Conclusion	255
Références	256
Chapitre 11. Les leviers d'adaptation au changement climatique en production végétale.....	261
<i>Philippe Debaeke, Jean-Louis Durand, Nathalie Ollat</i>	
Grandes cultures	263
Prairies	271
Vigne et productions fruitières	274
Conclusion	279
Références	281
Chapitre 12. Adaptation de l'élevage au changement climatique.....	291
<i>David Renaudeau, Jean-Christophe Bambou, Anne Collin, Luc Delaby, Jean-Luc Gourdine, Sylvie Lecollinet, Sandra Novak, Aurélie Vinet, Hélène Gilbert</i>	
Adaptation des conduites générales des animaux ou des troupeaux	292
Stratégies d'adaptation basées sur le levier génétique	300
Stratégies de lutte contre l'émergence ou la réémergence de nouvelles maladies.....	305
Vers une reconception des systèmes d'élevage pour répondre aux enjeux du changement climatique	307
Dispositifs permettant une prise en charge collective des risques.....	309
Conclusion	310
Références	311

Chapitre 13. Accompagner les acteurs du monde agricole pour l'adaptation au changement climatique : enjeux, postures, approches.....	317
<i>Nina Graveline, Laure Hossard, Jouanel Poulmarch, Jean-Marc Touzard</i>	
Les différentes formes d'accompagnement pour l'adaptation	319
Approches d'accompagnement par la recherche.....	323
Illustration avec trois exemples d'accompagnements.....	328
Conclusion	330
Références	332
 <p style="text-align: center;">PARTIE 5 APPROCHES GLOBALES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AGRICULTURE</p>	
Chapitre 14. Agriculture, émissions de gaz à effet de serre et contribution à l'atténuation	339
<i>Sylvain Pellerin</i>	
Le secteur agricole, source et puits de gaz à effet de serre	340
Contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre.....	343
Les leviers de réduction des émissions directes et indirectes de CH ₄ et de N ₂ O.....	345
La séquestration de carbone dans des compartiments à temps de résidence long (sol et biomasse ligneuse).....	347
La production d'énergie renouvelable et les effets de substitution.....	348
Transition agroécologique et émissions de gaz à effet de serre	349
Le lien à l'alimentation	350
Conclusion	351
Références	351
Chapitre 15. Relations entre atténuation et adaptation au changement climatique en agriculture : favoriser les synergies, éviter les antagonismes	353
<i>Thierry Caquet</i>	
Une complémentarité nécessaire... mais pas systématique.....	354
Interactions entre atténuation et adaptation en agriculture.....	356
Des leviers individuels aux démarches intégrées.....	357
Un enjeu : éviter la maladaptation et ses conséquences	360
Conclusion	362
Références	363
Chapitre 16. Les politiques publiques d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture française au changement climatique : entre mise à l'agenda tardive et marqueterie institutionnelle complexe	367
<i>Marie Hrabanski, Bétina Boutroue, Gilles Massardier, Alban Thomas</i>	
La mise à l'agenda tardive de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique à l'échelle internationale, européenne et en France	367
Les instruments d'adaptation en France : quelques innovations et de nombreux recyclages.....	371
La marqueterie institutionnelle complexe de la gouvernance de la transition agricole française ..	378
Conclusion	382
Références	383
Conclusion et perspectives.....	387
<i>Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin, David Renaudeau, Éric Sauquet</i>	
Liste des auteurs	395

Préface

L'année 2024 a été la plus chaude jamais enregistrée à l'échelle mondiale, atteignant pour la première fois le seuil de +1,5°C de réchauffement par rapport aux niveaux préindustriels. En France, sur les dix dernières années, l'augmentation de la température dépasse déjà +2°C, avec une occurrence six fois plus importante des vagues de chaleur et une augmentation d'un facteur 1,5 des sécheresses comparativement à la période s'étendant de 1961 à 1990. Le changement climatique représente désormais une menace directe et tangible pour les biens et les personnes. Ainsi, en 2022, les événements climatiques extrêmes ont causé trois mille décès en France et onze milliards d'euros de dommages non assurés.

L'agriculture constitue l'un des secteurs d'activité les plus exposés au changement climatique. Celui-ci affecte les cycles de production, la disponibilité de l'eau, le fonctionnement des sols, la biodiversité, les maladies animales et végétales, et cause des pertes de production qui, elles-mêmes, se répercutent sur l'ensemble du système alimentaire. Sans investissements dans l'adaptation, ces pertes de production augmenteront au cours des prochaines décennies, puisque la trajectoire de référence pour la France anticipe un réchauffement de +4°C d'ici à 2100. Des limites d'adaptation ont déjà été atteintes localement et les risques de maladaptation existent, par exemple pour la gestion des ressources en eau.

D'un autre côté, l'alimentation constitue 22 % de l'empreinte carbone des Français, et les émissions qu'elle génère diminuent de manière insuffisante par rapport aux objectifs climatiques. Pour stabiliser les températures, il est indispensable d'atteindre la neutralité carbone en 2050, ce qui suppose dans la plupart des scénarios une division par deux des émissions nettes du secteur agricole. Au défi de l'adaptation de l'agriculture s'ajoute donc celui de l'atténuation qui consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en mobilisant le stockage du carbone dans les sols et dans la biomasse.

En proposant une synthèse rigoureuse et actualisée, ce livre s'inscrit dans une démarche nécessaire de prise de conscience et d'action, tout en mettant en lumière les synergies nécessaires entre adaptation et atténuation. Il fait état des connaissances actuelles sur les impacts du changement climatique sur l'agriculture, tout en proposant des solutions pragmatiques et adaptées à la diversité des systèmes de production. Les données présentées soulignent l'urgence d'une adaptation systémique, qui doit se substituer à une approche réactive.

L'ouvrage se divise en plusieurs chapitres qui explorent les défis posés par le changement climatique, les méthodes de recherche pertinentes et les impacts spécifiques sur les différentes filières agricoles. En outre, il examine les initiatives politiques en cours, tout en mettant en avant des exemples concrets de pratiques agricoles durables. Ce livre est le fruit d'une collaboration entre chercheurs et praticiens, et son objectif est d'éclairer les décideurs, les agriculteurs, les enseignants et le grand public sur ces enjeux cruciaux.

En définitive, *Agriculture et changement climatique* se veut un outil de sensibilisation et de mobilisation. Il invite à une réflexion collective sur les solutions possibles, en soulignant l'importance d'une approche intégrée et durable pour l'agriculture. L'avenir de notre système alimentaire et de notre environnement dépend de notre capacité à nous adapter et à atténuer les effets du changement climatique. Il est temps d'agir, et cet ouvrage est une ressource précieuse pour tous ceux qui souhaitent contribuer à un avenir agricole résilient et durable.

Jean-François Soussana
Président du Haut Conseil pour le climat
Conseiller international, INRAE

Introduction

*Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin,
David Renaudeau, Éric Sauquet*

Les défis auxquels l'agriculture du xxie siècle doit faire face sont nombreux : assurer la sécurité alimentaire et produire une alimentation de qualité, tout en évoluant vers des systèmes de production plus sobres en intrants (pesticides, fertilisants, eau, énergie), préservant, voire restaurant la biodiversité, mais aussi s'adaptant au changement climatique et contribuant à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Dans le même temps, l'activité agricole doit permettre aux agriculteurs de vivre de leur travail et de se préparer au renouvellement des générations. L'ampleur de ces défis fixe des priorités absolues, mais complexes pour la recherche et pour les politiques publiques.

Le changement climatique, dont on perçoit chaque jour davantage les manifestations inquiétantes, constitue à l'évidence la préoccupation majeure (avec le déclin de la biodiversité) pour le devenir de l'humanité, en raison des enjeux évidents quant à la sécurité alimentaire. Ce changement se caractérise en particulier par un réchauffement mondial, une variabilité accrue des précipitations, une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des épisodes de sécheresse, mais aussi par la survenue plus fréquente d'événements extrêmes (vagues de chaleur, gels tardifs, précipitations intenses, tempêtes, par exemple) qui menacent gravement la production agricole (en quantité et en régularité) et qui génèrent de fortes incertitudes en amont pour les agriculteurs, et plus globalement pour les filières en aval qui collectent et transforment les productions animales et végétales (IPCC, 2023).

► Des impacts majeurs sur la production agricole

Les manifestations du changement climatique sont perceptibles depuis de nombreuses années et provoquent régulièrement des pertes significatives pour les productions agricoles, végétales et animales. Ainsi, la canicule de 2003 a entraîné une perte de 30 % de la production primaire en Europe (Ciais *et al.*, 2005). Dans l'ouest de la France, 1,7 million de poulets sont morts dans les poulaillers à la suite des excès de chaleur cette même année. Les fortes précipitations printanières en 2016 et en 2024 ont induit des pertes de rendement importantes pour le blé en France : -24 % et -11 % selon Agreste (2016 et 2024). En 2022, 35 % des sols ont été en situation de sécheresse et la production de maïs française a baissé de 18 % par rapport à la moyenne quinquennale, en raison notamment de restrictions d'irrigation. La croissance de l'herbe et l'évolution de la composition des

prairies sont également fortement affectées par les événements récurrents de sécheresse et de canicule. Les productions fruitières et viticoles sont de plus en plus menacées par la douceur hivernale qui les expose fréquemment aux gels printaniers (comme en 2021) (Legave, 2022). Selon Bras *et al.* (2021), les pertes de récoltes liées aux sécheresses et aux canicules auraient triplé ces cinquante dernières années en Europe. Ces épisodes, qualifiés d'exceptionnels au cours des dernières décennies, sont de moins en moins rares et se répéteront fréquemment dans les années à venir en Europe (Spinoni *et al.*, 2018). À cela, il faut associer le risque d'incendie, accru durant les périodes de sécheresse et de canicule, qui met en péril non seulement les surfaces forestières, mais aussi les terres agricoles exposées. L'ensemble de ces risques climatiques, auxquels il faut ajouter la hausse du niveau des mers et l'érosion côtière, a des effets déjà visibles sur la perte en terres, sur la dégradation des sols et sur la baisse de leur fertilité.

Les conséquences économiques du changement climatique sont déjà importantes et vont s'accroître avec les aléas et l'exposition des systèmes agricoles, mais leur estimation est difficile à réaliser, et les prévisions sont incertaines. Ainsi, une part de ces coûts, les dépenses d'indemnisation et de gestion des crises agricoles liées aux aléas climatiques, a fortement augmenté ces cinq dernières années en France (gel en 2021, sécheresse en 2022) pour atteindre 2,1 milliards d'euros, soit près du tiers du budget du ministère de l'Agriculture (Bonvillain *et al.*, 2024). Cela ne couvre pas toutes les pertes financières subies par les producteurs, dont la grande majorité n'a pas souscrit à une assurance multirisque climatique, ni tous les efforts d'adaptation supportés par le monde agricole.

À l'échelle nationale, Tremblay et Ruiz (2022) et Dépoues *et al.* (2024) ont estimé respectivement à plus de 1 milliard d'euros par an (jusqu'à 2050) et à 1,5 milliard d'euros par an (sur la décennie à venir) les dépenses nécessaires aux filières agricoles et alimentaires françaises pour adapter leurs activités au changement climatique. Ces dépenses concernent par exemple la prise en charge de dispositifs de stockage de l'eau et d'infrastructures d'irrigation, le conseil agricole massifié, le renouvellement des vergers et l'extension de l'agroforesterie, etc.

► Adapter les systèmes agricoles et atténuer leurs émissions

Depuis plus de trente ans, les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec)¹ ont permis de synthétiser et d'affiner l'état des connaissances sur l'évolution du climat, sur ses causes et ses impacts, mais aussi d'évaluer les possibilités de limiter l'ampleur du réchauffement et la gravité de ses impacts, et de s'adapter aux changements attendus. Cette production scientifique est au cœur des négociations internationales sur le climat et vise à alerter les décideurs et la société civile.

À travers ces rapports successifs, il apparaît que le secteur agricole (35 % des terres émergées) subit de plein fouet les impacts du changement climatique tout en étant un contributeur majeur aux émissions de GES, aussi bien par les pratiques d'élevage que par la conduite des cultures et des systèmes de culture (23 % des émissions au niveau mondial).

1. Giec : créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et sur les stratégies de parade (en anglais, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

L'urgence est d'adapter les systèmes de culture et d'élevage au changement climatique pour les rendre plus résilients face aux évolutions tendancielles et aux événements extrêmes, c'est-à-dire à la fois plus robustes, et capables de s'adapter, voire de se transformer. Dans le même temps, il est nécessaire de réduire les émissions de GES du secteur agricole et d'augmenter la séquestration du carbone pour atténuer les effets sur le climat à plus long terme. Des synergies sont à trouver entre ces deux impératifs (adapter et atténuer), sans oublier les autres enjeux et les contraintes du monde agricole énoncés plus haut.

La figure I.1, extraite du 3^e rapport du Giec (2001) d'après Smit *et al.* (1999), illustre bien les synergies entre le changement climatique, les impacts sur les agroécosystèmes, les mesures d'adaptation et d'atténuation avec un retour attendu sur le ralentissement des émissions de GES. Précisons que les deux objectifs « adapter et atténuer » sont nécessaires et indissociables, mais que les effets des mesures mises en œuvre ne s'évaluent pas à la même échelle spatiale : l'adaptation s'apprécie à l'échelle locale et l'atténuation, à l'échelle mondiale. Par ailleurs, la temporalité est bien différente : il est tout aussi urgent de s'adapter aux aléas actuels que d'atténuer les émissions de GES pour éviter des effets à plus long terme.

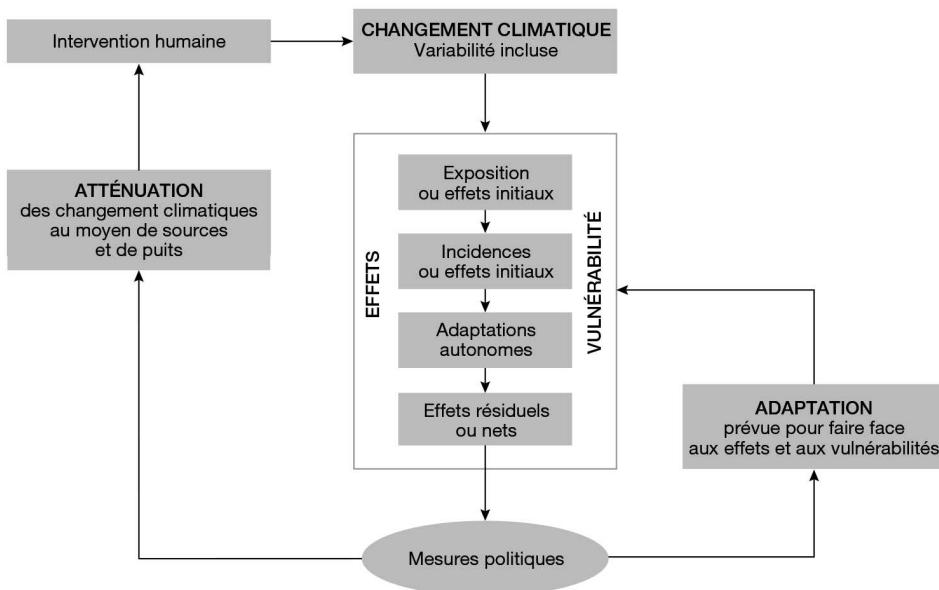


Figure I.1. Place de l'atténuation et de l'adaptation en réponse aux effets induits par le changement climatique. Source : d'après Smit *et al.*, 1999.

► Une référence actualisée des problématiques liées au changement climatique en agriculture

Afin de contribuer à l'apport de connaissances objectives sur les relations entre l'agriculture (au sens large) et le changement climatique, et d'éclairer ainsi les enjeux pour la production agricole, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) a souhaité proposer cet ouvrage de synthèse.

L'agriculture des milieux tempérés et méditerranéens en est la principale cible, mais des références provenant des milieux tropicaux ont également été intégrées.

Une première partie dresse un état des lieux de la réalité du changement climatique et de ses conséquences pour l'agriculture. Après avoir exposé un bilan actualisé des évolutions climatiques en France (aspects historiques, projections) (chapitre 1), l'ouvrage montre leurs impacts sur les ressources en eau et en sols pour l'agriculture (chapitre 2).

Une deuxième partie présente les méthodes utilisées par la recherche pour analyser et pour prévoir les impacts sur la production et sur le fonctionnement des filières (observatoires, indicateurs, modèles, etc.) (chapitres 3, 4 et 5).

Dans une troisième partie, les impacts observés ou prévisibles pour les principales filières végétales (grandes cultures, prairies, vignes, arbres fruitiers) et animales sont décrits et quantifiés (chapitres 6, 7, 8 et 9).

Une quatrième partie propose un tour d'horizon de l'accompagnement des acteurs en vue de concevoir, d'évaluer puis de mettre en œuvre des solutions et des leviers pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique (chapitres 10, 11, 12 et 13).

Enfin, la dernière partie s'intéresse d'une part aux services apportés par l'agriculture en vue d'atténuer les émissions de GES et de stocker davantage de carbone dans les terres agricoles (chapitre 14), et d'autre part aux synergies et aux compromis entre atténuation et adaptation (chapitre 15). Le chapitre 16 analyse les politiques publiques d'atténuation et d'adaptation mises en œuvre dans le secteur agricole face au changement climatique.

Chacun de ces chapitres est résitué dans le cadre d'évaluation intégrée proposé par le Giec en 2001 (figure I.2).

La plupart des questions posées au sujet de l'adaptation de l'agriculture, des écosystèmes et des territoires avaient déjà été évoquées dans un précédent ouvrage (Soussana, 2013). Depuis, les travaux de la communauté scientifique se sont amplifiés, notamment à INRAE par le biais de programmes de recherche (Accaf puis CLIMAE), de méthodes d'analyse et de scénarisation, mais aussi par l'accompagnement des acteurs et par l'émergence de solutions. Les résultats de ces recherches sont présentés dans les différents chapitres de cet ouvrage.

Plus récemment, d'autres ouvrages coordonnés par INRAE ont été publiés par les éditions Quæ, le plus souvent dans cette même collection *Synthèses*, et pourront être consultés pour approfondir les thèmes développés ici : la gestion de l'eau en agriculture (Leenhardt *et al.*, 2020), l'adaptation au changement climatique des arbres fruitiers (Legave, 2022), l'adaptation de la filière vigne et vin (Ollat et Touzard, 2024), l'atténuation des émissions de GES et le stockage du carbone (Pellerin *et al.*, 2015 et 2021). Notre ambition ici est de couvrir de manière assez large l'ensemble des problématiques associées au changement climatique en agriculture pour fournir au lecteur une vision la plus complète possible.

Cet ouvrage en français s'adresse aussi bien aux chercheurs et enseignants-chercheurs qu'aux étudiants de l'enseignement supérieur et aux ingénieurs des structures de développement. Il devrait constituer une référence actualisée, accessible aux acteurs du secteur agricole et aux décideurs politiques. À notre connaissance, il n'existe pas aujourd'hui d'ouvrage de synthèse pour ce public dans la communauté francophone.

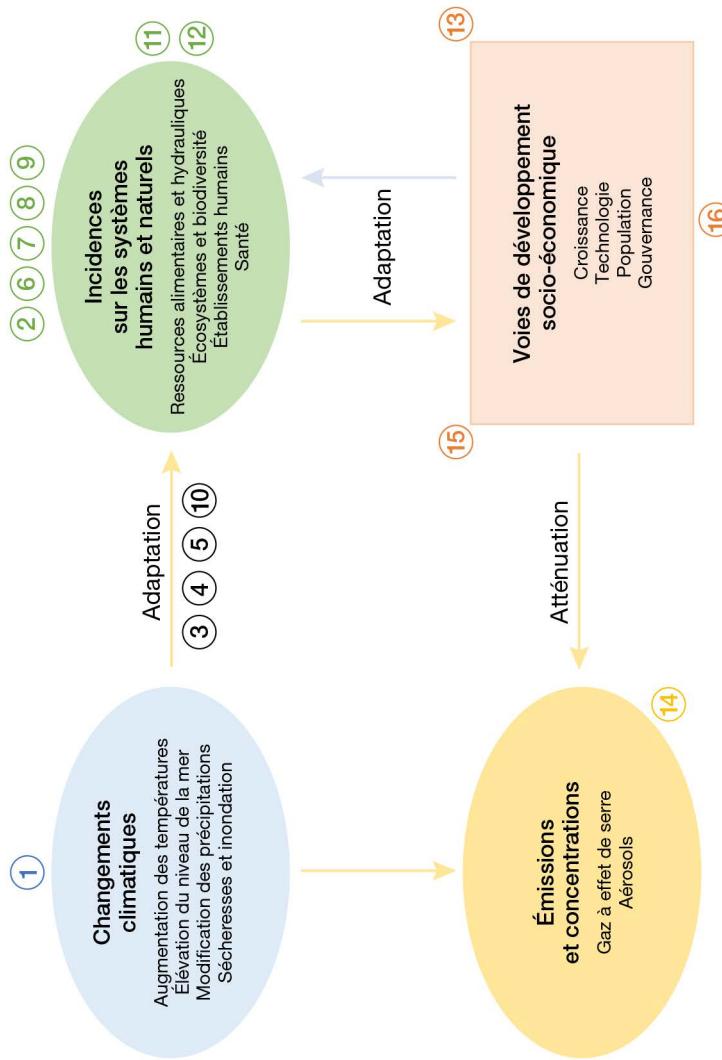


Figure I.2. Représentation schématique et simplifiée d'un cadre d'évaluation intégrée pour l'étude des changements climatiques anthropiques.

Source : d'après IPCC, 2001.

Les flèches jaunes indiquent le cycle de causes et effets dans les quatre secteurs représentés, et les flèches bleues indiquent la réponse sociale aux effets des changements climatiques. Les numéros renvoient aux chapitres de cet ouvrage.

Une terminologie à préciser

Avant toute chose, il est important de préciser un certain nombre de termes qui seront utilisés tout au long de cet ouvrage.

En 2001, le Giec a défini la notion de vulnérabilité climatique que l'on peut résumer ainsi (figure I.3) :

vulnérabilité = f (exposition, sensibilité, capacité d'adaptation).

La notion d'exposition au changement climatique fait référence, pour un système naturel ou anthropique, au niveau de contrainte climatique et à la fréquence avec laquelle il y est soumis. L'exposition s'exprime, par exemple, par la probabilité d'un déficit hydrique ou d'un excès thermique pendant une période donnée. Elle est ainsi associée à la notion de risque.

La sensibilité mesure l'ampleur des effets négatifs ou bénéfiques que le climat exerce sur un organisme vivant ou sur un système biologique ou sociotechnique qui est exposé au changement climatique.

La capacité d'adaptation des systèmes aux aléas climatiques auxquels ils sont exposés fait référence à leur capacité de se prémunir contre d'éventuels dommages, de tirer parti des opportunités liées au changement climatique ou de réagir à ses conséquences.

Enfin, la vulnérabilité, qui conjugue ces trois notions, évalue dans quelle mesure un système est sensible aux effets néfastes du changement climatique (caractérisé par des valeurs tendancielles, de la variabilité interannuelle et des événements extrêmes) et s'avère incapable d'y faire face. Elle est donc fonction du caractère, de l'ampleur et du rythme des variations climatiques auxquelles ce système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (Giec, 2001). Cette définition fait largement consensus au sein de la communauté scientifique (Tao *et al.*, 2011).

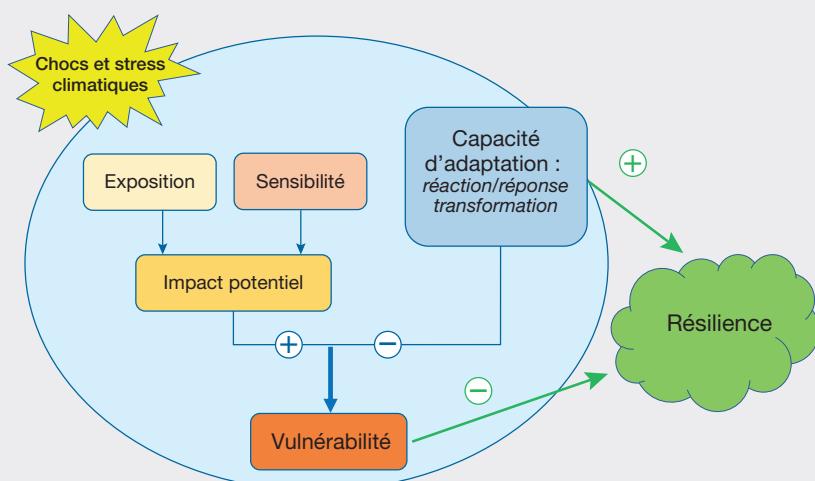


Figure I.3. Schéma illustrant la manière dont les composantes de l'adaptation interagissent pour parvenir à la résilience. Pour renforcer celle-ci, il faut accroître la capacité d'adaptation (+) et réduire la vulnérabilité des systèmes agricoles (-). Les capacités d'adaptation permettent de réduire (-) la vulnérabilité des systèmes aux impacts potentiels (+). Source : adaptée de Leippert *et al.*, 2020.

D'autres notions sont également mobilisées pour qualifier la réponse et les capacités de réaction des systèmes biologiques ou sociotechniques en agriculture face au changement climatique (Urruty *et al.*, 2016; Giec, 2021) :

- la robustesse désigne la capacité des systèmes biologiques et techniques à maintenir les niveaux souhaités de production agricole (stabilité) malgré l'apparition de perturbations qui peuvent être fortes et variables;
- la résilience caractérise la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux — tous interdépendants — à faire face à une évolution, à une perturbation ou à un événement aléatoire et potentiellement néfaste. Cette résilience leur permet d'y répondre ou de se réorganiser de façon à préserver leur fonction, leur identité et leur structure fondamentales tout en gardant leurs capacités d'adaptation, d'apprentissage et de transformation. Par exemple, la résilience d'une exploitation agricole, d'une filière ou d'un territoire sera mesurée par sa capacité à anticiper, à agir (à faire face aux chocs), à s'adapter et à se transformer de manière rapide et efficace pour réduire sa vulnérabilité face aux aléas climatiques. Ainsi, accroître la résilience d'un système passe par la réduction de sa vulnérabilité et par le renforcement de ses capacités d'adaptation (figure I.3).

D'autres notions sont apparentées à la résilience, comme la résistance ou la tolérance des systèmes face à une perturbation.

► Références

- Agreste, 2016. Bilan conjoncturel 2016, *Agreste Panorama*, n° 5, 44 p.
- Agreste, 2024. Grandes Cultures, *Conjoncture-Infos rapides*, n° 130.
- Bonvillain T., Rogissart L., Féret S., 2024. Estimation des dépenses publiques liées aux crises agricoles en France entre 2013 et 2022, rapport Institute for Climate Economics (I4CE), 36 p.
- Bras T.A., Seixas J., Carvalhais N., Jägermer J., 2021. Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe, *Environmental Research Letters*, 16(6), 065012, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V. *et al.*, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437, 529-533, <https://doi.org/10.1038/nature03972>.
- Dépoues V., Dolques G., Nicol M., 2024. Anticiper les effets d'un réchauffement de + 4°C : quels coûts de l'adaptation?, rapport Institute for Climate Economics (I4CE), 39 p.
- Giec, 2021. Annexe VII – Glossaire, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Royaume-Uni, 1032 p.
- IPCC, 2023. Sections, in *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*, Genève, Suisse, p. 35-115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Leenhardt D., Voltz M., Barreteau O. (Coords), 2020. *L'Eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion territoriale*, Versailles, éditions Quæ, 288 p.
- Legave J.M. (Coord.), 2022. *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique. Risques et opportunités en régions tempérées*, Versailles, éditions Quæ, 464 p.
- Leippert F., Darmaun M., Bernoux M., Mpheshea M., 2020. The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems, FAO and Biovision, Rome, 136 p., <https://doi.org/10.4060/cb0438en>.

Agriculture et changement climatique

- Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 284 p.
- Pellerin S., Bamière L., Pardon L. (Coords), 2015. *Agriculture et gaz à effet de serre. Dix actions pour réduire les émissions*, Versailles, éditions Quæ, 200 p.
- Pellerin S., Bamière L., Savini I., Réchauchère O. (Coords), 2021. *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel et à quel coût?*, Versailles, éditions Quæ, 232 p.
- Smit B., Burton I., Klein R.J.T., Street R., 1999. The science of adaptation: A framework for assessment, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 199-213, <https://doi.org/10.1023/A:1009652531101>.
- Soussana J.F. (Coord.), 2013. *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Versailles, éditions Quæ, 296 p.
- Spinoni J., Vogt J.V., Naumann G., Barbosa P., Dosio A., 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe?, *International Journal of Climatology*, 38, 1718-1736, <https://doi.org/10.1002/joc.5291>.
- Tao S., Xu Y., Liu K., Pan J., Gou S., 2011. Research progress in agricultural vulnerability to climate change, *Advances in Climate Change Research*, 2(4), 203-210, <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2011.00203>.
- Tremblay D., Ruiz J., 2022. Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires, rapport du CGAAER n° 21044, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 117 p.
- Urruty N., Tailliez-Lefebvre D., Huyghe C., 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 15, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>.

Partie 1

État des lieux du changement climatique

Chapitre 1

Aperçu du changement climatique en France

*Jean-Michel Soubeyroux, Brigitte Dubuisson, Lola Corre,
Mathieu Régimbeau, Iñaki García de Cortázar-Atauri*

Le 6^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec ou Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, 2021) a rappelé que les changements climatiques récents sont généralisés, rapides et s'intensifient, et qu'ils sont sans précédent depuis des milliers d'années. Le réchauffement climatique qui atteignait + 1,1 °C en 2020 à l'échelle planétaire est totalement imputable aux activités humaines, responsables de l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (GES). Au-delà de l'augmentation des températures moyennes, le changement climatique contribue à l'augmentation de nombreux extrêmes météorologiques et climatiques tels que les canicules, les pluies extrêmes et les sécheresses. Il se traduit également par des modifications profondes du cycle de l'eau.

Pour le futur, toutes nouvelles émissions de GES entraîneront un réchauffement supplémentaire. Dans tous les scénarios d'émissions considérés, la température à la surface du globe continuera à augmenter au moins jusqu'au milieu de ce siècle. Un réchauffement planétaire de + 1,5 °C et + 2 °C sera dépassé au cours du xxie siècle, sauf si des réductions importantes des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres GES ont lieu au cours des prochaines décennies. La fréquence et l'intensité des extrêmes augmentent dans les projections, pour chaque incrément supplémentaire de réchauffement planétaire. Ce premier chapitre présente le climat actuel et les projections climatiques en France hexagonale sur les valeurs moyennes et les extrêmes météorologiques affectant les activités agricoles, et notamment le bilan hydrique et le contenu en eau du sol.

► Climat actuel et tendances en France

La France bénéficie à ce jour d'un climat tempéré partagé entre les influences océaniques, méditerranéennes et continentales, modulées principalement selon la distance à la mer (océan Atlantique, Manche, mer du Nord et Méditerranée) et l'altitude (Alpes, Pyrénées, Jura, Vosges, Massif central et Corse).

Températures

Moyennes annuelles et saisonnières

La température moyenne annuelle en France se situe autour de 13 °C dans les régions de plaine, évoluant entre 11 °C sur la moitié nord et un peu plus de 15 °C près de la Méditerranée (figure 1.1).

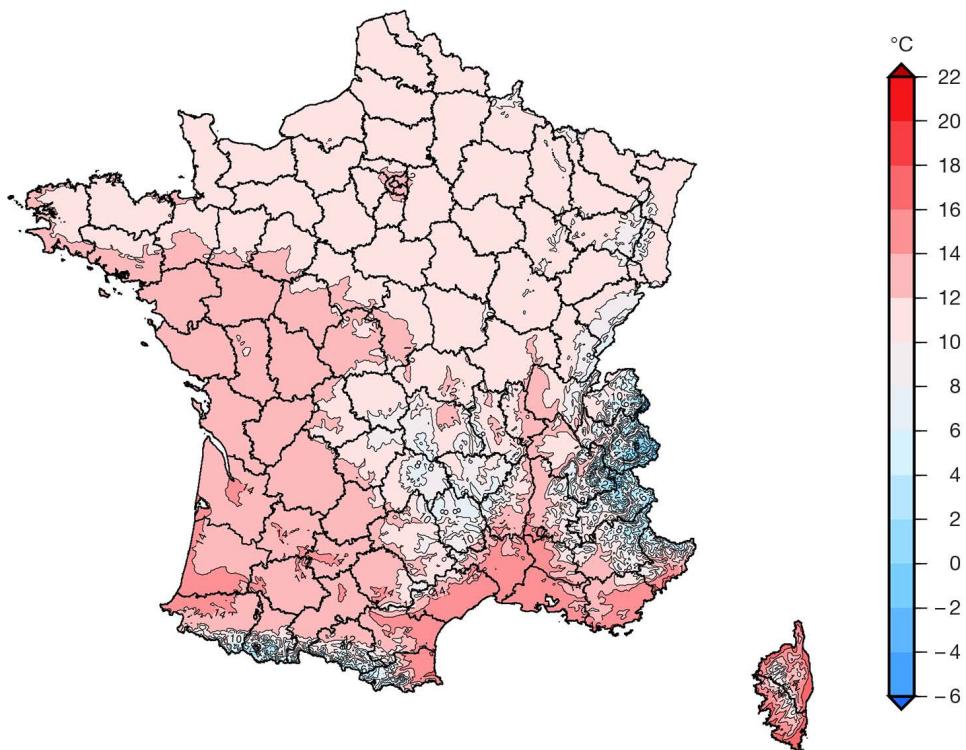


Figure 1.1. Température moyenne (°C) sur la période de 1991 à 2020. Source : Météo-France, climatologie selon la méthode Aurelhy.

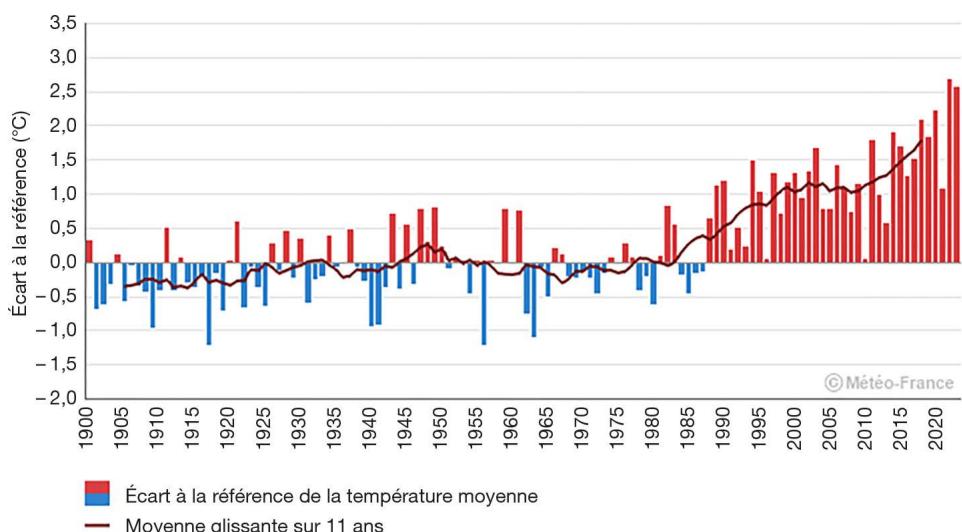


Figure 1.2. Évolution de l'indicateur thermique (écart à la température moyenne en °C, référence 1961-1990 en France métropolitaine) pour la France de 1900 à 2023. Source : Climat^{HD} de Météo-France.

L'augmentation des températures depuis 1900 a atteint + 1,8 °C sur la dernière décennie (2011-2020) par comparaison au début du xx^e siècle (1900-1930). La figure 1.2 montre l'accélération du réchauffement au cours des quatre dernières décennies se traduisant par une hausse quasi linéaire de la température moyenne de + 0,4 °C par décennie.

L'année la plus chaude depuis 1900 est à ce jour l'année 2022 (figure 1.2). Les dix années les plus chaudes se sont produites au cours des vingt dernières années, et les sept premières, après 2010.

Le réchauffement est modulé selon la saison avec un maximum en automne et en été, et un minimum en hiver et au printemps.

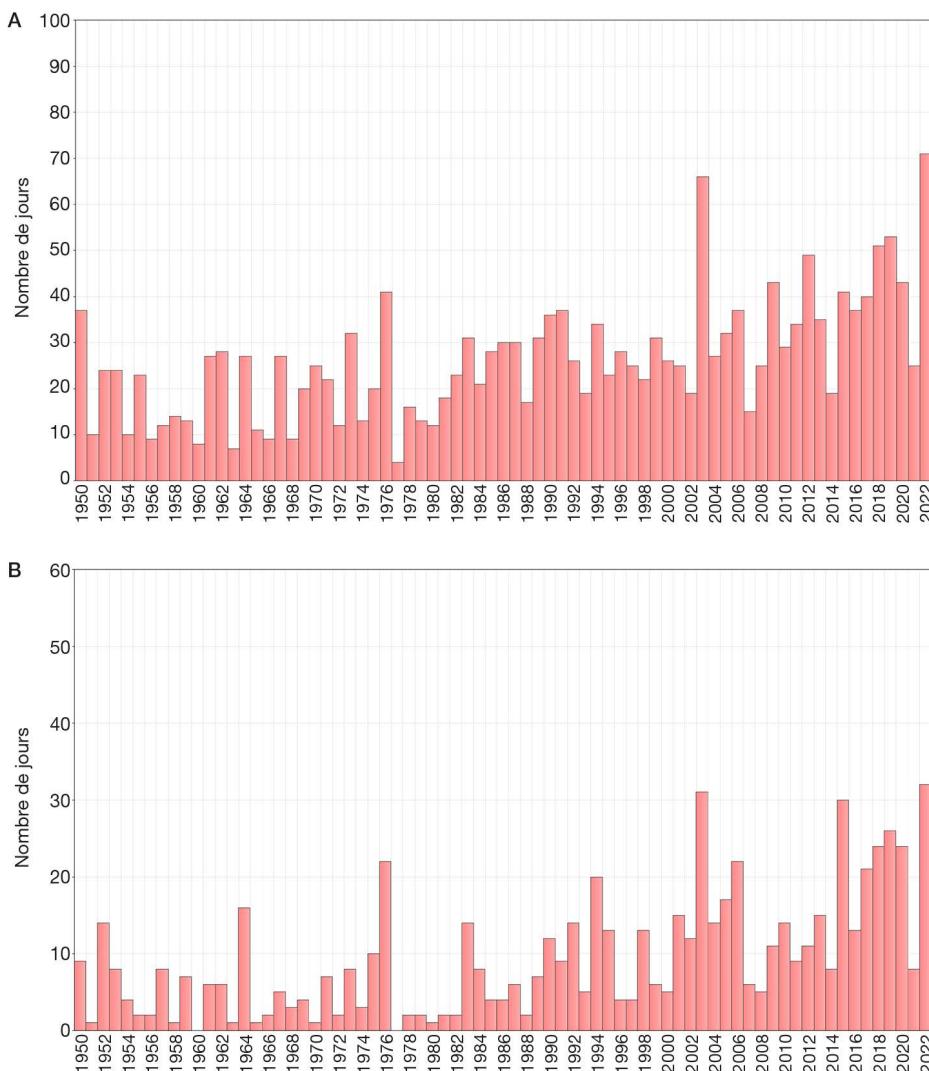


Figure 1.3. Évolution du nombre de jours de forte chaleur ($T_x > 30^\circ\text{C}$) de 1950 à 2022 (A) à Toulouse et (B) à Nancy.

Températures extrêmes et impacts

Cette évolution de la température moyenne se retrouve aussi au niveau des extrêmes de température. Le nombre moyen annuel de jours de vagues de chaleur est passé de 1 jour dans les années 1960 à plus de 10 jours dans la dernière décennie.

Le nombre de journées de forte chaleur (température maximale, $T_x > 30^\circ\text{C}$) a augmenté depuis 1950 d'environ 22 jours par an à Toulouse (17 à 39 jours) et de 13 jours par an à Nancy (de 5 à 18 jours) (figures 1.3A et 1.3B : écart entre la décennie 2011-2020 et la référence 1951-1980).

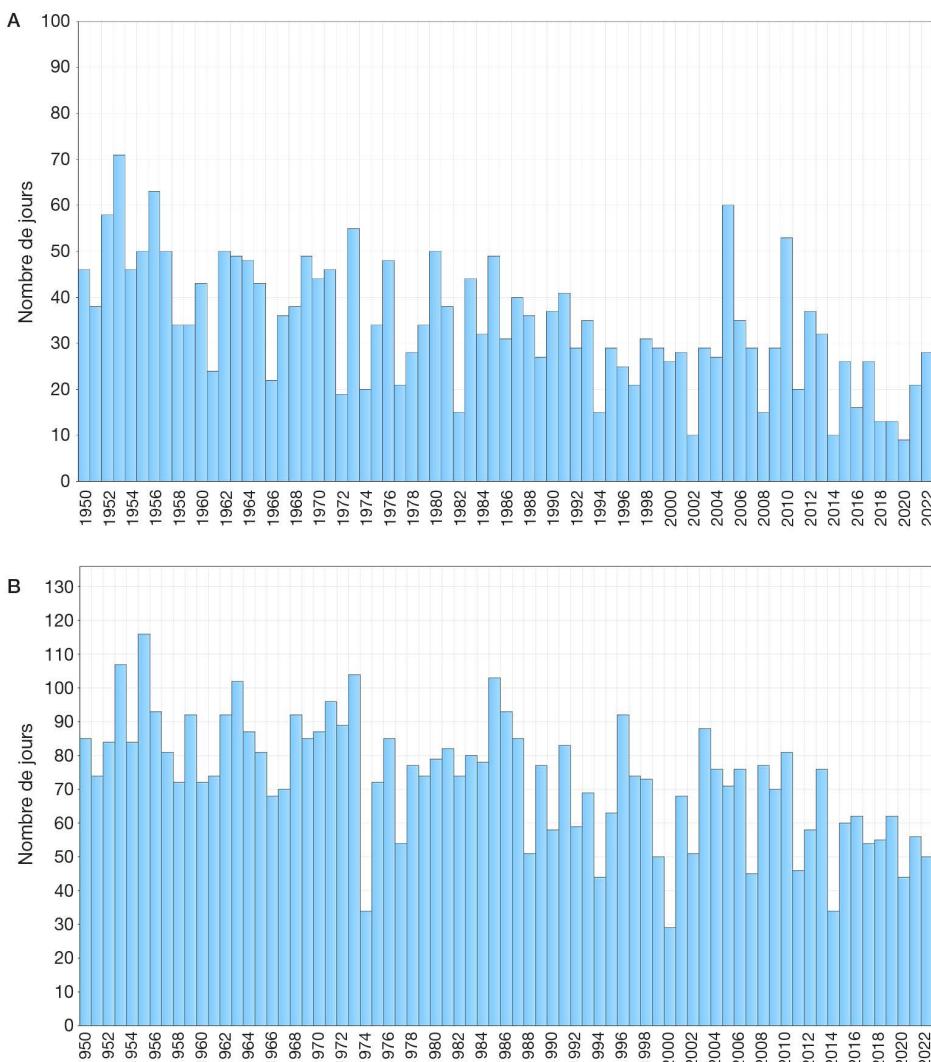


Figure 1.4. Évolution du nombre de jours de gelées ($Tn \leq 0^\circ\text{C}$) de 1950 à 2022 (A) à Toulouse et (B) à Nancy.

En même temps, le nombre de jours de gel (température minimale, $T_n < 0^\circ\text{C}$) a diminué depuis 1950 de 22 jours par an à Toulouse (42 à 20 jours) et 28 jours par an à Nancy (83 à 55 jours) (figures 1.4A et 1.4B : écart entre la décennie 1991-2020 et la référence 1951-1980).

Pour autant, l'impact des gelées sur l'agriculture n'a pas diminué comme l'ont rappelé les événements d'avril 2021 et 2022, car les derniers jours de gel qui causent le plus de dégâts pour les cultures se produisent à des niveaux plus avancés de stade végétatif (encadré 1.1).

Encadré 1.1. Le changement climatique est-il responsable des gelées tardives du printemps 2021 ?

Au début du mois d'avril 2021, plusieurs jours de gel sévère ont touché une grande partie de la France après un mois de mars anormalement chaud. Cela a entraîné des dégâts très importants en particulier sur la vigne et sur les arbres fruitiers où les jeunes feuilles s'étaient déjà déployées avec la chaleur du début du printemps.

Une étude d'attribution (Vautard *et al.*, 2023) a analysé comment le changement climatique induit par l'homme a affecté les températures froides aussi extrêmes que celles observées au printemps 2021 dans le centre de la France.

En analysant les observations de plusieurs centaines de longues séries de température et 172 simulations de modèles climatiques, il a été montré que, sans changement climatique d'origine humaine, ces températures en avril auraient été encore plus basses de $1,2^\circ\text{C}$ [$0,75^\circ\text{C}$; $1,9^\circ\text{C}$]⁽¹⁾ par rapport aux conditions préindustrielles.

Cependant, le réchauffement observé dû à l'homme a également affecté l'apparition plus précoce du débourrement, caractérisé ici par une somme des degrés-jours de croissance. À partir des observations, il apparaît que les gelées extrêmes qui surviennent après le début de la saison de croissance se sont refroidies d'environ 2°C [$0,6^\circ\text{C}$; $3,3^\circ\text{C}$] sur la période 1951-2020. Cette intensification observée des gelées en période de croissance est attribuable, du moins en partie, au changement climatique causé par l'homme. Chacun des cinq ensembles de modèles climatiques utilisés simule une diminution des minima de température annuelle en période de croissance de $0,41^\circ\text{C}$ [$0,22^\circ\text{C}$; $0,59^\circ\text{C}$] depuis l'ère préindustrielle, ce qui rend l'événement de 2021 50 % plus probable du fait du changement climatique d'origine humaine.

Il a été montré que les modèles simulent avec précision le réchauffement observé des températures printanières extrêmes les plus basses, mais sous-estiment les tendances observées dans les intensités de gel en période de croissance. Toutefois, les ensembles de modèles simulent tous une intensification des gelées pendant la période de croissance au cours des prochaines décennies. La probabilité d'un épisode exceptionnel de gel en période de croissance tel que celui de 2021 (avec une période de retour de sept ans dans le climat actuel) augmentera de manière significative d'environ 30 % [20 %; 40 %] dans un climat avec un réchauffement global de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle.

⁽¹⁾ Entre crochets, les valeurs hautes et basses de l'intervalle de confiance à 95 %.

Précipitations

Cumuls annuels et saisonniers

Le cumul annuel de précipitations en France (figure 1.5) est de l'ordre de 900 mm, mais présente de grandes disparités entre le littoral méditerranéen et la plaine d'Alsace où il atteint tout juste 500 mm contre souvent plus de 2000 mm en montagne (Massif central, Pyrénées occidentales, Vosges, Jura, Alpes du Nord).

La variabilité interannuelle est marquée (figure 1.6) avec des records humides de l'ordre de 1 100 mm (1960 et 1999) et des records secs proches de 700 mm (1989 et 2022). La série agrégée sur la France ne présente pas de tendance climatique, mais une variabilité naturelle d'un pas de temps d'environ trente ans.

À l'échelle locale (figure 1.7), l'analyse des 1 255 séries homogénéisées² de précipitations en France sur la période de 1960 à 2014 met en évidence une partition climatique nord-sud avec une majorité de tendances à la hausse sur la moitié nord et de tendances à la baisse sur la moitié sud.

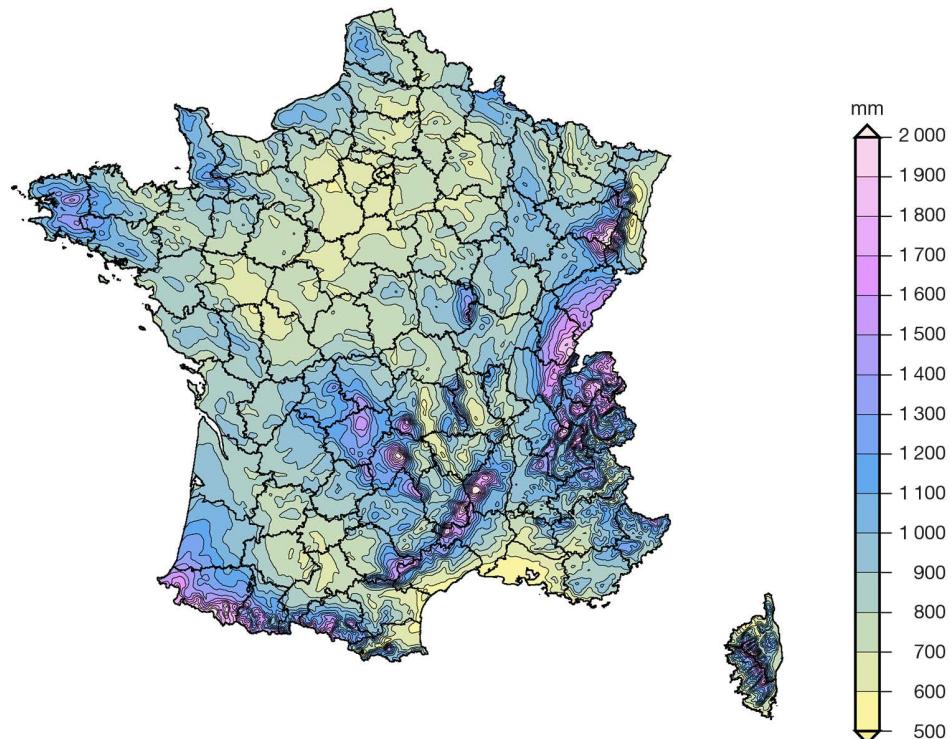


Figure 1.5. Cumul annuel de précipitations (mm) sur la période 1991-2020. Source : Météo-France, climatologie selon la méthode Aurelhy.

2. Le terme *homogénéisation* désigne la correction de séries de données climatiques contaminées par des ruptures artificielles dues à des modifications dans les réseaux d'observation (déplacement de station, changement d'instrument de mesure, changement dans l'environnement immédiat d'une station, changement d'observateur, etc.).

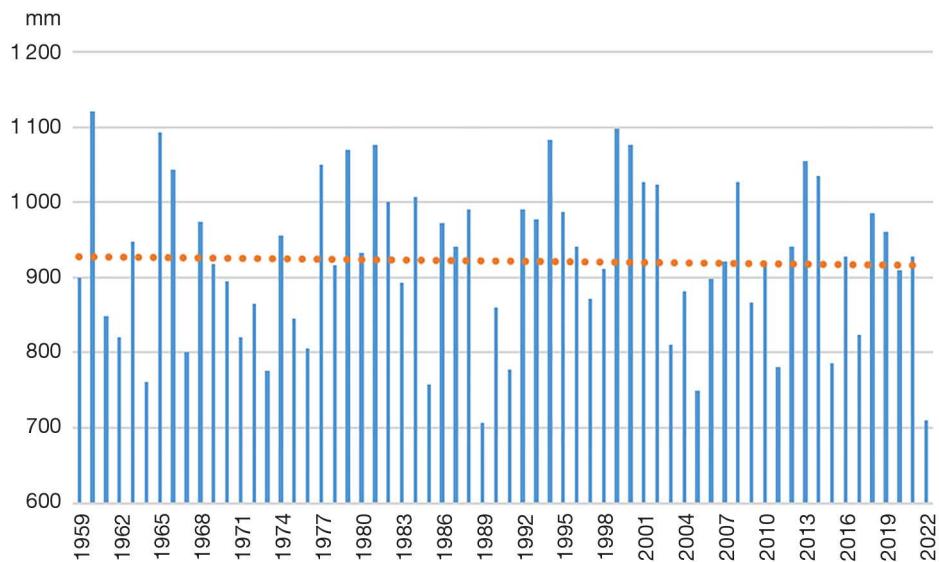


Figure 1.6. Évolution du cumul annuel de précipitations (mm) de 1959 à 2022. Source : Météo-France, données Safran.

En orange : tendance linéaire sur la période 1959-2022.

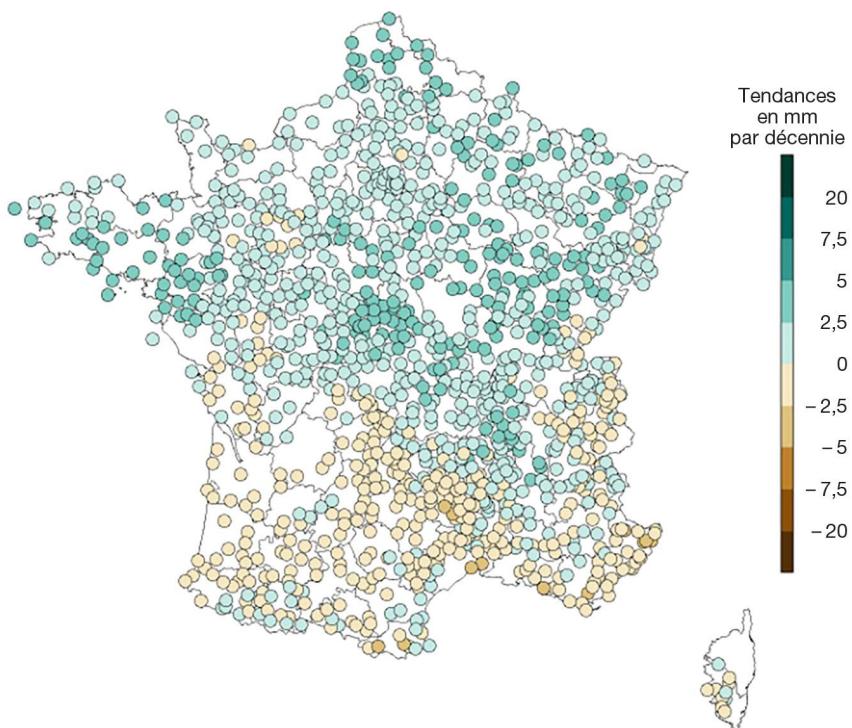


Figure 1.7. Tendances du cumul annuel de précipitations (en millimètres par dix ans) en France sur la période 1960-2014 sur la base de 1 255 longues séries homogénéisées.

Pluies intenses et sécheresses météorologiques

Une hausse des pluies extrêmes quotidiennes a pu être mise en évidence dans plusieurs régions ou zones climatiques en France (Méditerranée, Bretagne, Nord-Est) avec des évolutions entre + 10 % et + 30 % sur la période 1960-2012 (Dubuisson *et al.*, 2020) (figure 1.8).

En matière de séquence sèche ou de sécheresse météorologique (déficit de précipitations sur plusieurs mois), aucun signal n'a pu être mis en évidence à ce jour.

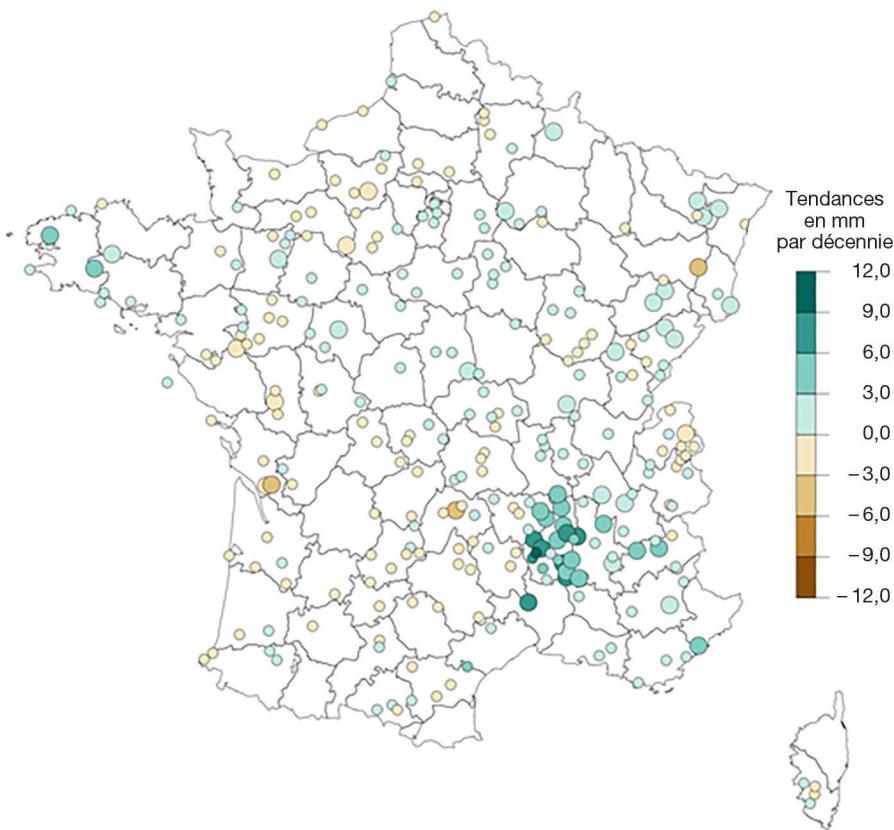


Figure 1.8. Tendances des pluies extrêmes quotidiennes (en millimètres par dix ans) sur la période 1960-2014. Source : Dubuisson *et al.*, 2020.

► Évapotranspiration, bilan hydrique et sécheresse du sol

L'évapotranspiration potentielle (ETP ou ET0 en anglais) qui représente l'évaporation maximale d'une pelouse rase bien alimentée en eau est une grandeur de référence pour l'établissement de bilan hydrique en agriculture. Différentes formules peuvent être utilisées, mais les plus courantes tiennent compte notamment des températures moyennes, du rayonnement solaire et de la force du vent (formule Penman-Monteith; Allen *et al.*, 1998).

En France, l'augmentation des températures est associée à une hausse sensible du rayonnement solaire (de l'ordre de +5%) depuis les années 1990, tandis qu'aucune tendance de long terme n'apparaît pour le vent moyen.

Ainsi, l'ETP agrégée sur la France, représentée sur la figure 1.9, montre une hausse régulière d'environ +15 % depuis 1970 avec un record établi en 2022, devant l'année 2003.

Cette hausse de l'ETP, non compensée par un apport de précipitations, se traduit aussi par une diminution du contenu en eau de la couche racinaire du sol (environ 2 m) et d'une multiplication par deux de la surface moyenne du territoire national en sécheresse du sol entre la dernière décennie et les années 1960 (figure 1.10).

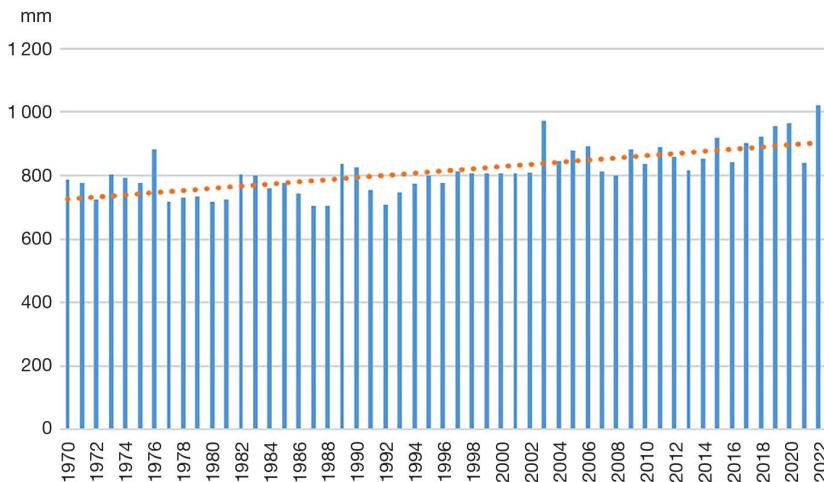


Figure 1.9. Évolution du cumul annuel d'ETP agrégée sur la France sur la période 1970-2022.
Source : Météo-France.

En orange : tendance linéaire sur la période 1970-2022.

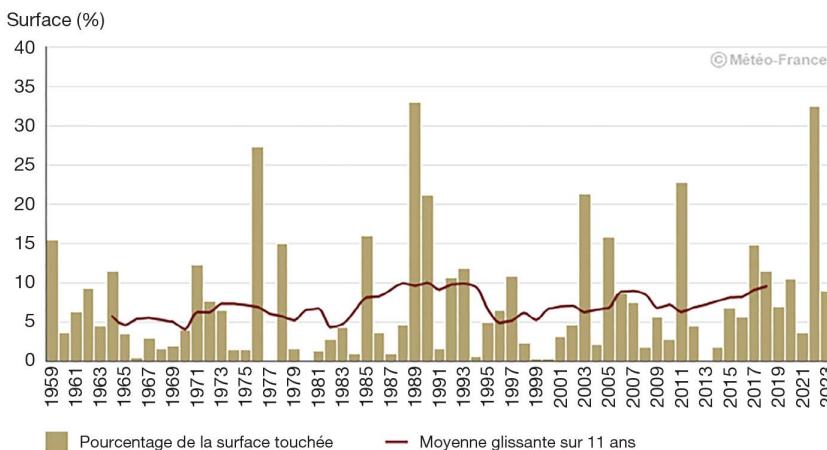


Figure 1.10. Évolution de la part de la surface du territoire (%) touchée par la sécheresse des sols (temps de retour de dix ans). Source : Climat^{HD}, Météo-France³.

3. <https://meteofrance.com/climathd>

► Climat futur et projections des variables agroclimatiques

Les simulations climatiques de référence pour la France s'appuient sur des projections climatiques régionalisées, sélectionnées à partir de la base européenne Euro-Cordex (Jacob *et al.*, 2014 et 2020) à résolution de 12 km, ajustées sur la France à partir des observations Safran et disponibles pour plusieurs scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) d'évolution des émissions de GES : RCP2.6 (émissions faibles), RCP4.5 (émissions modérées), RCP8.5 (émissions fortes). C'est notamment le cas du nouvel ensemble « Explore2-2024 » (encadré 1.2) de simulations réalisées dans le cadre du projet Explore2⁴, constituant une extension du jeu Drias-2020 analysé dans le rapport éponyme (Soubeyroux *et al.*, 2021).

Encadré 1.2. Les projections climatiques régionalisées Explore2

Les projections climatiques régionalisées Explore2 s'appuient sur des simulations issues de l'ensemble Euro-Cordex qui contient plus d'une centaine de projections climatiques couvrant l'Europe à la résolution de 12 km. Ces projections sont basées sur des modèles régionaux (RCM) forcés par différents modèles globaux (GCM) du projet CMIP5, utilisés notamment dans le 5^e rapport du Giec (2013). Douze de ces couples GCM/RCM avaient déjà été sélectionnés et corrigés par la méthode Adamont pour former le jeu Drias-2020 distribué sur le portail Drias, les futurs du climat⁽¹⁾. L'objectif était alors de proposer un nombre réduit de simulations, tout en conservant la gamme des changements simulés par l'ensemble total Euro-Cordex.

Dans le cadre du projet Explore2, l'ensemble des simulations sélectionnées pour Drias-2020 a été enrichi pour répondre à de nouveaux critères imposés par l'exploitation de ces projections par le projet. Les critères supplémentaires ont été les suivants :

- inclure les simulations Euro-Cordex les plus récentes avec les forçages en aérosols évolutifs;
- permettre l'utilisation de la méthode de décomposition des incertitudes Qualypso (Evin *et al.*, 2021), qui nécessite que chaque GCM et RCM soit présent plusieurs fois;
- vérifier la cohérence des changements en température et en précipitations en France au pas de temps saisonnier (hiver et été) avec l'ensemble des simulations CMIP6. À la suite de ce test, deux simulations présentes dans le jeu Drias-2020 (IPSL-WRF et CNRM-RACMO) ont été retirées pour un comportement trop frais et trop humide en été par rapport à l'ensemble CMIP6.

Finalement, l'ensemble des projections climatiques Explore2 compte dix-sept simulations historiques (tableau 1.1; GCM en gras), onze pour le scénario RCP2.6, dix pour le scénario RCP4.5 et dix-sept pour le scénario RCP8.5, toutes disponibles pour deux méthodes de correction de biais (Adamont et CDF-t). Les données au pas de temps quotidien sont disponibles au téléchargement sur le portail Drias ainsi que les articles décrivant le jeu de données.

4. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

Tableau 1.1. Ensemble des projections climatiques Explore2.

GCM/RCM	ALADIN63	HadREM3-GA7-05	RACMO22E	RCA4	HIRHAM5	CCLM4-8-17	RegCM4-6	REMO	WRF381P
CNRM-CM5	×	×							
EC-EARTH		×	×	×					
IPSL-CM5A-MR				×	×				
HadGEM2-ES	×	×				×	×		
MPI-ESM-LR						×	×	×	
NorESM1-M					×		×	×	×

Une analyse complète de ces simulations produite dans le cadre du projet Explore2 est disponible sur le site du projet⁽²⁾.

(1) <http://www.driias-climat.fr/>

(2) <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/file.xhtml?persistentId=doi:10.57745/K8YKCD>

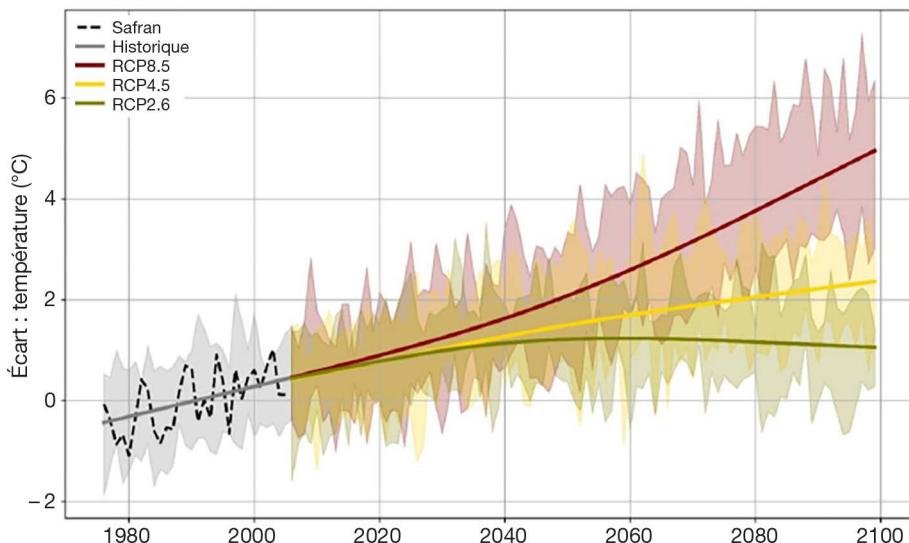


Figure 1.11. Évolution de l'écart de température moyenne annuelle au cours du xxI^e siècle, 2006-2100 (par rapport à la moyenne de référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6 en vert, RCP4.5 en jaune et RCP8.5 en rouge.

Le trait continu correspond à la médiane lissée (moyenne glissante sur dix ans). L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre l'écart minimal et l'écart maximal de la distribution de l'ensemble Explore2-2024. L'enveloppe en gris illustre l'intervalle entre l'écart minimal et l'écart maximal de la distribution de l'ensemble des simulations; la médiane est en trait continu; le trait discontinu noir est l'écart des valeurs annuelles non lissé Safran par rapport à la moyenne Safran 1976-2005.

Évolution des températures

En l'absence d'une réduction importante des émissions de GES au niveau planétaire, on peut s'attendre en milieu de siècle à un réchauffement en France de l'ordre de + 2 °C en moyenne annuelle par rapport à la référence 1976-2005⁵ (figure 1.11). En fin de siècle, le réchauffement pourrait même dépasser + 4 °C (référence 1976-2005) dans un scénario de fortes émissions RCP8.5 (figure 1.12). L'augmentation des températures sera plus forte sur la moitié sud-est, ainsi qu'en été par rapport à l'hiver.

En matière d'extrêmes, les vagues de chaleur et les événements caniculaires continueront à se multiplier. À l'inverse, le nombre de journées de gel va diminuer mais, du fait de la douceur des hivers, les gelées pourront se produire à des stades végétatifs plus avancés, pouvant avoir de forts impacts pour les cultures.

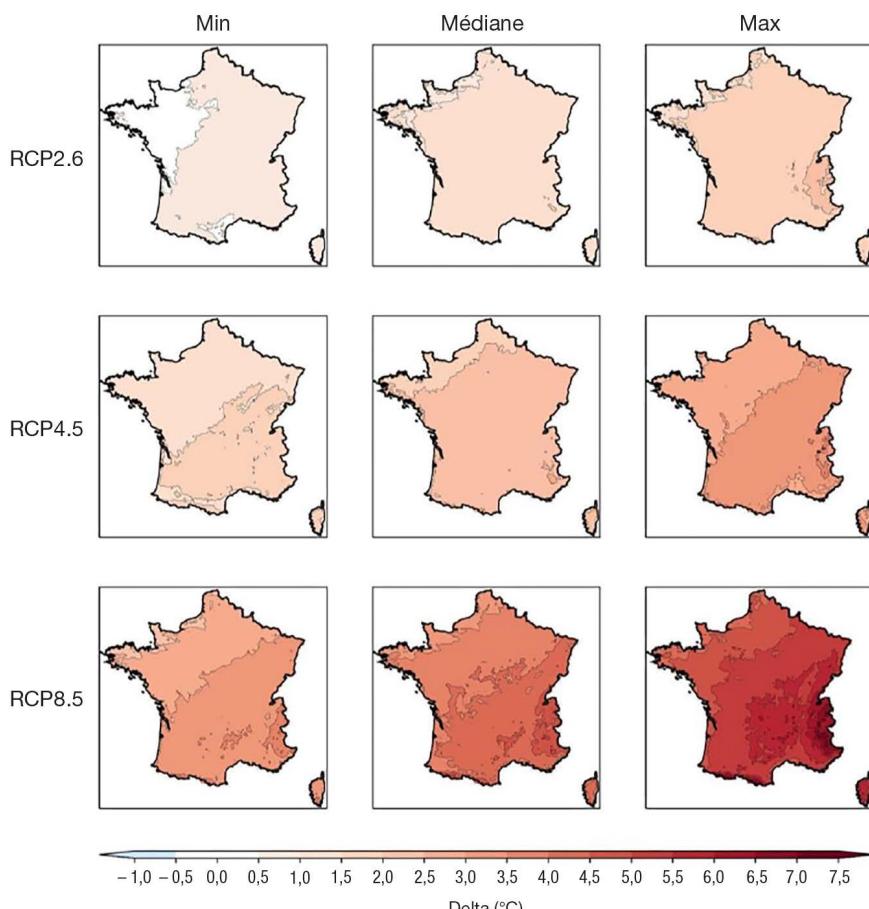


Figure 1.12. Valeurs minimales, médianes et maximales de l'écart de température moyenne annuelle (°C) en fin de siècle par rapport à la période 1976-2005 pour trois scénarios d'émission de GES (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) et pour l'ensemble de projections Explore2-2024.

5. L'écart de température moyenne annuelle entre la période 1976-2005 et le début du xx^e siècle en France est d'environ + 0,6 °C.

Évolution des précipitations

L'évolution des précipitations annuelles à l'échelle de la France présente une grande incertitude, dépassant souvent une amplitude supérieure à 10 % du cumul annuel tant à l'horizon du milieu de siècle qu'en fin de siècle et pour les trois scénarios climatiques RCP (figure 1.13). À l'échelle régionale (figure 1.14), on note très peu de cohérence dans le signe de l'évolution du cumul annuel, à l'exception du scénario de forte émission RCP8.5 avec une majorité de hausses sur l'extrême nord-est du pays et de baisses sur l'extrême sud.

À l'échelle saisonnière, les tendances sont inversées entre l'hiver qui voit une majorité attendue de hausses de l'ordre de + 10 % en milieu de siècle et l'été, une majorité de baisses du même ordre de grandeur. Ces évolutions, assez incertaines dans l'horizon des prochaines décennies, se renforcent en seconde moitié de siècle, avec des amplitudes différentes selon le niveau de réchauffement atteint.

Les précipitations extrêmes sont aussi attendues en hausse sur une grande majorité du territoire avec des incertitudes plus importantes sur les régions méridionales.

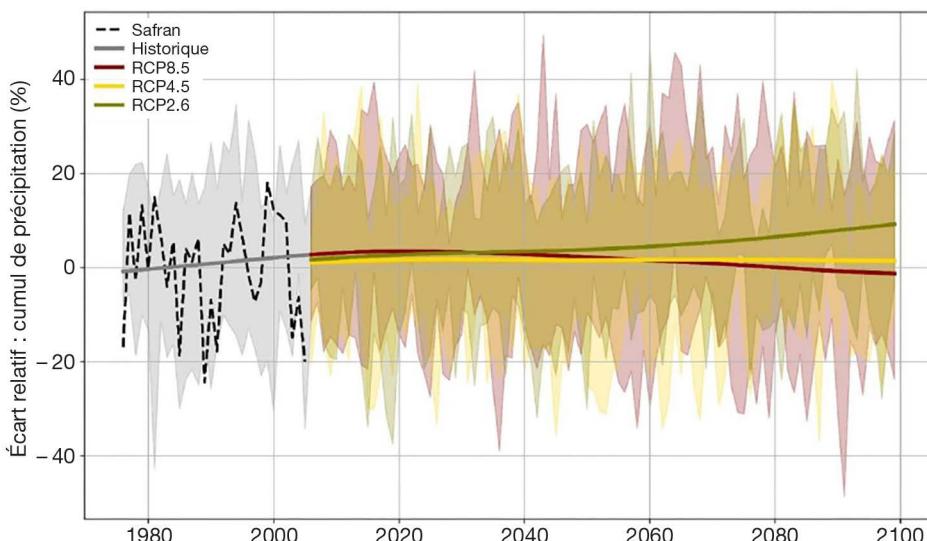


Figure 1.13. Évolution de l'écart de cumul annuel de précipitations au cours du xxie siècle, 2006-2100 (par rapport à la moyenne de référence 1976-2005) pour les trois scénarios RCP2.6 en vert, RCP4.5 en jaune et RCP8.5 en rouge.

Le trait continu correspond à la médiane lissée (moyenne glissante sur dix ans). L'enveloppe de couleur illustre l'intervalle entre l'écart minimal et l'écart maximal de la distribution de l'ensemble Explore2-2024. L'enveloppe en gris illustre l'intervalle entre l'écart minimal et l'écart maximal de la distribution de l'ensemble des simulations ; la médiane est en trait continu et le trait discontinu noir est l'écart des valeurs annuelles non lissé Safran par rapport à la moyenne Safran 1976-2005.

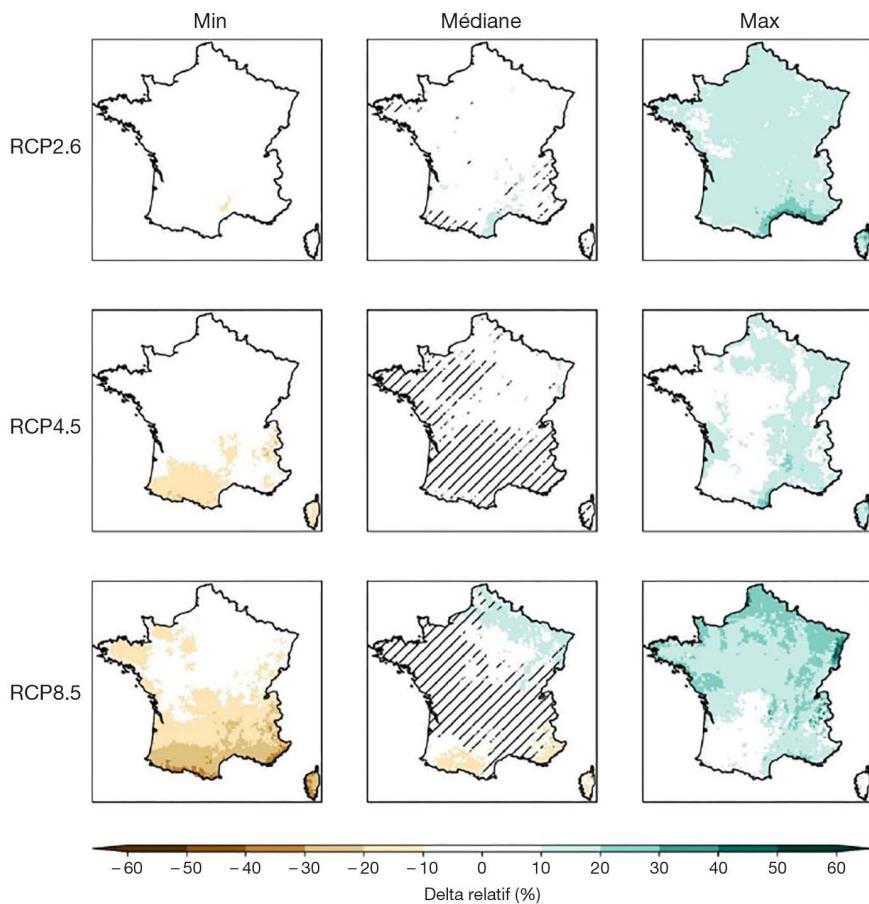


Figure 1.14. Valeurs minimales, médianes et maximales de l'écart relatif de cumul annuel de précipitations en fin de siècle par rapport à la période 1976-2005 en scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 pour l'ensemble de projections Explore2-2024.

En motif hachuré, les zones pour lesquelles il n'y a pas d'accord de signe (tendance positive ou négative) dans au moins 80 % des simulations de l'ensemble Explore2-2024.

Évolution de l'évapotranspiration et du bilan hydrique

Sous un climat futur, l'évolution de l'ETP est attendue en cohérence avec le réchauffement moyen avec une hausse en fin de siècle pouvant atteindre + 20 % de manière assez générale sur le territoire dans un scénario de forte émission RCP8.5 (figure 1.15).

La ressource en eau disponible pour la végétation est souvent évaluée en ce qui concerne le bilan hydrique en faisant la différence entre les précipitations et l'ETP. Sur la figure 1.16, on voit que le bilan hydrique est attendu globalement en baisse dans le climat futur avec une intensité en lien avec le réchauffement et avec un gradient du sud-ouest au nord-est. L'incertitude sur le signe de l'évolution n'est présente que dans le nord-est du pays, tandis que l'intensité de la baisse est très forte pour les régions méridionales, avec des valeurs médianes en scénario de forte émission RCP8.5 de l'ordre de - 100 mm en milieu de siècle et - 200 mm en fin de siècle.

Dans ce contexte hydrique, les simulations hydrologiques réalisées dans le cadre du projet Explore2 (Rousset *et al.*, 2022) confirment la baisse attendue de l'humidité du sol notamment en été, avec une augmentation sensible du nombre de jours de sol sec et l'intensification des événements de sécheresse du sol (Soubeyroux *et al.*, 2023).

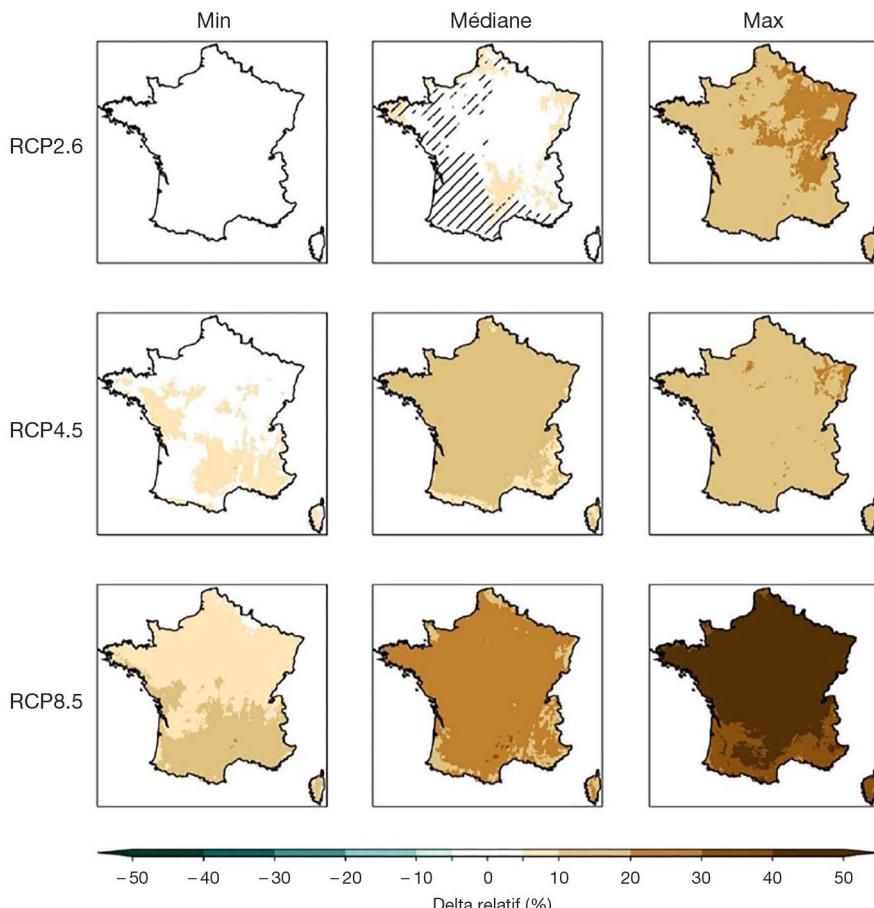


Figure 1.15. Écart relatif à l'horizon lointain (2070-2099) de l'évapotranspiration potentielle annuelle (mm) pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.

La première colonne correspond par point de grille à l'écart minimal de l'ensemble Explore2-2024, la deuxième, à l'écart médian et la troisième, à l'écart maximal. En motif hachuré sont représentées les zones pour lesquelles il n'y a pas d'accord de signe d'au moins 80 % des simulations de l'ensemble Explore2-2024.

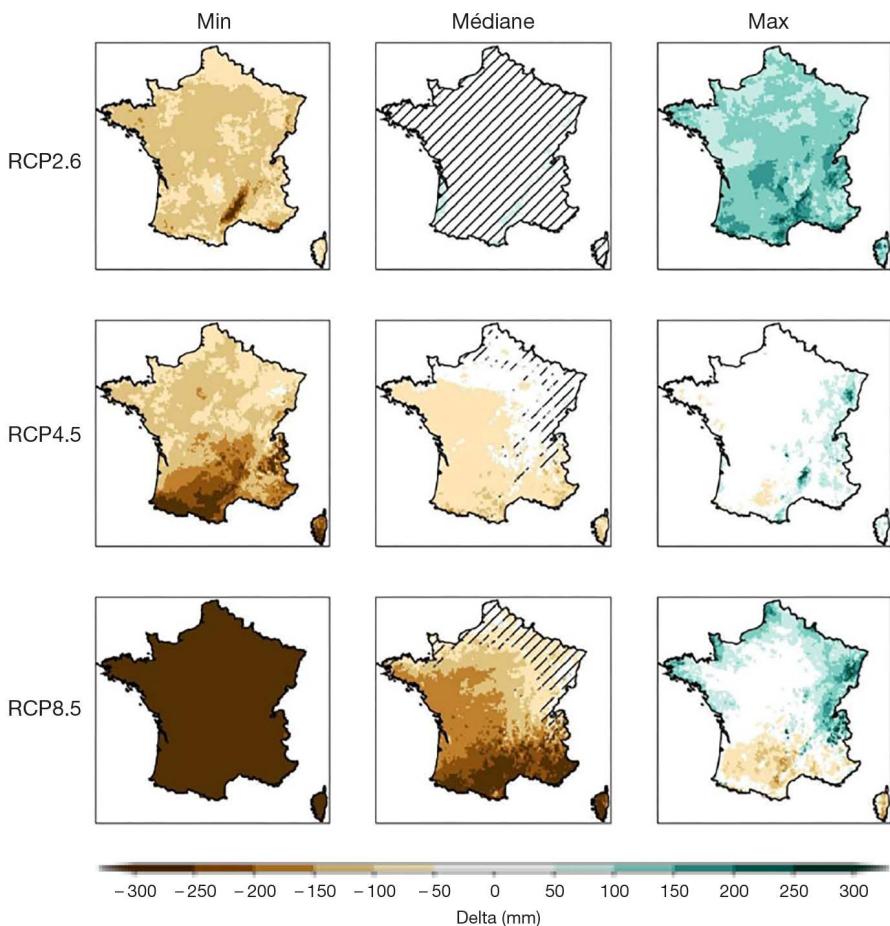


Figure 1.16. Écart à l'horizon lointain (2070-2099) du bilan hydrique annuel (mm) pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.

L'écart médian est calculé sur 10 couples en RCP2.6, 9 couples en RCP4.5 et 17 couples en RCP8.5. La première colonne correspond par point grille à l'écart minimal de l'ensemble Explore2-2024, la deuxième, à l'écart médian et la troisième, à l'écart maximal. En motif hachuré sont représentées les zones pour lesquelles il n'y a pas d'accord de signe d'au moins 80 % des simulations de l'ensemble Explore2-2024.

► Conclusion

Les activités agricoles, très sensibles au climat moyen et aux extrêmes météorologiques, sont déjà confrontées depuis plusieurs décennies dans notre pays aux effets du changement climatique tels qu'ils sont décrits et analysés dans le dernier rapport du Giec. La hausse des températures qui intensifie le fonctionnement du cycle de l'eau augmente la vulnérabilité des cultures à la sécheresse et aux pluies extrêmes.

Ces évolutions vont se poursuivre et se renforcer dans les prochaines décennies en lien avec les niveaux de réchauffement qui seront atteints. Malgré des incertitudes encore fortes sur le signe de l'évolution de certaines variables atmosphériques comme les précipitations, les simulations climatiques convergent pour prédire un renforce-

ment des contrastes saisonniers et géographiques, et *in fine* une transformation des pratiques agricoles actuelles. La définition et l'évaluation des stratégies d'adaptation s'appuient sur la mise à disposition large de jeux de données climatiques et agroclimatiques et sur le développement de services climatiques généralistes tels que le portail Drias⁶, ou spécialisés comme Climadiag Agriculture⁷ (encadré 1.3).

Encadré 1.3. Quels services climatiques pour l'agriculture en France ?

Le terme *services climatiques* désigne l'ensemble des informations et des prestations qui permettent d'évaluer et de qualifier le climat passé, présent ou futur, d'apprécier les impacts des changements climatiques sur l'activité économique, la société et l'environnement, et de fournir des éléments pour entreprendre des mesures d'atténuation et d'adaptation (source Allenvi⁽¹⁾).

Depuis le Cadre mondial des services climatiques lancé par l'Organisation mondiale de la météorologie en 2009, les services climatiques pour l'agriculture en France ont pu prendre différentes formes.

Sans prétention d'exhaustivité, trois services importants méritent d'être cités :

- les observatoires Oracle régionaux⁽²⁾ qui compilent un grand nombre de données agroclimatiques constatées sur les quarante à cinquante dernières années (dates de récolte, jours de gel, jours échaudants, etc.). Ces observatoires ont pour objectif d'identifier les tendances climatiques et agricoles en cours, d'aider à comprendre les relations entre le changement climatique et l'évolution des pratiques agricoles, et d'aider à identifier les voies d'action pour l'agriculture régionale;

- le portail Drias⁽³⁾ qui vise à mettre à disposition les données du climat futur en France ainsi que l'ensemble des informations pour leur bonne utilisation. Des indicateurs spécifiques aux impacts et notamment dans le secteur agricole ont été ajoutés au fil des années, en particulier sur le jeu Drias-2020. Ces indicateurs ont vocation à être enrichis à l'avenir pour mieux couvrir les enjeux et les impacts de l'adaptation des activités agricoles. À noter également l'ouverture en 2023 d'un portail Drias-Eau⁽⁴⁾ dédié à la mise à disposition des données sur les projections hydrologiques produites par le projet Explore2;

- l'application Climadiag Agriculture⁽⁵⁾, ouverte en 2023, permet une visualisation rapide et en ligne de plus d'une centaine d'indicateurs agroclimatiques (IAC) couvrant les besoins des différentes filières agricoles. Chaque IAC est calculable localement sur l'ensemble de la France métropolitaine pour la période du futur proche (période 2021-2050) et du futur lointain (2051-2100), selon une approche multimodèle et la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (Tracc), permettant de cerner une plus grande variabilité des évolutions climatiques à venir et à prendre en compte pour les stratégies d'adaptation.

⁽¹⁾ <https://www.allenvi.fr/>.

⁽²⁾ Voir par exemple les cahiers *Oracle* pour la région Occitanie : <https://www.occitanie.chambre-agriculture.fr/agroenvironnement/changement-climatique/oracle-occitanie/>

⁽³⁾ <http://www.drias-climat.fr/>

⁽⁴⁾ <https://www.drias-eau.fr/>

⁽⁵⁾ <https://climadiag-agriculture.fr/>

6. <http://www.drias-climat.fr/>

7. <https://climadiag-agriculture.fr/>

► Références

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome, Italie, ISBN 978-92-5-104219-9.
- Dubuisson B., Bernus S., Corre L., Drouin A., 2020. Évolution des précipitations en France métropolitaine au cours des dernières décennies, 33^e Colloque de l'Association internationale de climatologie (AIC), Rennes, p. 247-252, <http://www.climate.be/aic/colloques/actes/Rennes2020/actes.pdf>.
- Evin G., Somot S., Hingray B., 2021. Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble, *Earth System Dynamics*, 12(4), 1543-1469, <https://doi.org/10.5194/esd-12-1543-2021>.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 31 p., <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M. *et al.*, 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change*, 14, 563-578, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Jacob D., Teichmann C., Sobolowski S., Katragkou E., Anders I., Belda M. *et al.*, 2020. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community, *Regional Environmental Change*, 20, 51, <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>.
- Rousset F., Tocquer F., Soubeyroux J.-M., 2022. Les simulations hydroclimatiques DRIAS 2020-SIM2, 35^e Colloque annuel de l'Association internationale de climatologie (AIC), Météo-France, Toulouse, http://www.meteo.fr/cic/meetings/2022/aic/resumes/montagne_eau_rousset.pdf.
- Soubeyroux J.-M., Bernus S., Corre L., Drouin A., Dubuisson B., Etchevers P. *et al.*, 2021. Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS-2020 pour la Métropole, Météo-France, 98 p., <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>.
- Soubeyroux J.-M., Grigis L., Rousset F., Corre L., Boe J., 2023. Évolution des sécheresses météorologiques et agricoles en France en contexte de changement climatique, 36^e Colloque annuel de l'Association internationale de climatologie (AIC), 252-255, Bucarest, Roumanie.
- Vautard R., van Oldenborgh G.J., Bonnet R., Li S., Robin Y., Kew S. *et al.*, 2023. Human influence on growing-period frosts like in early April 2021 in central France, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 1045-1058, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1045-2023>.

Chapitre 2

L'eau, les sols et le changement climatique

*Éric Sauquet, Annette Bérard, Claude Doussan,
Yves Tramblay, Fabienne Rousset*

Le changement climatique a modifié et modifiera encore le cycle naturel de l'eau car il s'intensifie. De manière très qualitative, il est attendu des événements plus extrêmes (crues et sécheresses), des processus d'évaporation et d'évapotranspiration amplifiés, des dynamiques saisonnières des débits ou de la recharge des aquifères modifiées par réduction, voire disparition du manteau neigeux, des évolutions du régime des pluies, etc. Ces changements vont affecter le fonctionnement de tous les compartiments du cycle de l'eau : sols, aquifères, rivières avec directement ou indirectement des impacts sur l'agriculture, par exemple sur l'accès à l'eau pour l'irrigation. Ils sont déjà en cours et ont déjà été identifiés. Ainsi, en 2022, la sixième limite planétaire sur les neuf identifiées (Richardson *et al.*, 2023) a été franchie, en lien avec l'activité humaine : celle concernant le cycle de l'eau douce, induite par l'utilisation de l'eau bleue (présente dans les nappes et les rivières et facilement disponible pour l'homme) et les changements affectant l'eau verte (contenue/retenue dans le sol et utilisée par la végétation). En 2023, environ 16 % des terres du globe montraient des variations de teneur en eau du sol (eau verte) nettement en dehors de la variabilité naturelle observée pendant la période préindustrielle comme conséquences des activités humaines, dont le changement climatique.

Ce chapitre est composé de deux grandes sections : la première section est consacrée à l'eau verte, avec une première partie consacrée aux processus modifiés par le changement climatique à une échelle locale, et une seconde aux sécheresses des sols projetées avec l'ensemble des climats Explore2-2024 décrits dans le chapitre 1 à plus grande échelle (France hexagonale) ; la seconde section résume les travaux de détection de changements dans les séries de débits et présente les principales conclusions du projet Explore2 sur la disponibilité de la ressource en eau.

► L'eau verte

Changement climatique et sécheresse des sols

Dans le cadre du projet Explore2⁸, le modèle Sim2 forcé par l'ensemble Explore2-2024 a fourni des séries d'humidité des sols sur le maillage Safran 8 × 8 km. Tramblay *et al.* (2024) ont calculé un indicateur agrégé spatialement de la moyenne annuelle du nombre

8. <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>

mensuel de mailles en état de sécheresse du sol, qualifié de période de retour de dix ans sous climat actuel. Les résultats montrent une augmentation régulière de la surface des sécheresses dans le scénario RCP4.5 (émissions modérées) à partir de 2040 et surtout en RCP8.5 (émissions fortes), avec un doublement de la surface touchée dès 2050 et un triplement à l'horizon 2100. Une sécheresse du niveau de 2022, soit 35 % du territoire en moyenne annuelle, apparaît avec une probabilité d'occurrence de l'ordre de 1 % jusqu'en 2000, de 5 % vers 2022, 10 % vers 2050 (risque multiplié par deux par rapport à 2022) et près de 50 % en fin de siècle (risque multiplié par dix). Le signal de changement climatique sur les sécheresses du sol est plus marqué que sur les sécheresses météorologiques, car ici l'impact de la hausse des températures et de l'évapotranspiration est combiné avec les baisses de précipitations observées dans certaines régions.

Au niveau saisonnier, pour les sécheresses hivernales du sol (figure 2.1), on projette peu de changements en milieu et en fin de siècle, hormis une aggravation en fin de siècle notamment dans la moitié sud sous RCP8.5. La sécheresse estivale du sol (figure 2.2) s'intensifie pour les deux scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5, mais l'évolution est plus marquée pour le RCP8.5. Ainsi, un événement d'une occurrence moyenne d'une année sur dix (fréquence égale à 0,1) dans le climat historique apparaît trois à six années sur dix (fréquence jusqu'à 0,6) dans le climat futur en fin de siècle. Les changements ne sont pas uniformes ; ils héritent des évolutions du climat structurées (en particulier des précipitations ; voir chapitre 1) selon un axe nord-sud : ils sont plus conséquents dans le sud de la France, comparativement à ceux projetés dans le nord de la France. On distingue également un signal net à la hausse des sécheresses en été dans les Alpes et dans les Pyrénées, dans les deux scénarios et dès 2041-2070, conséquence notamment de la réduction ou de la disparition du manteau neigeux.

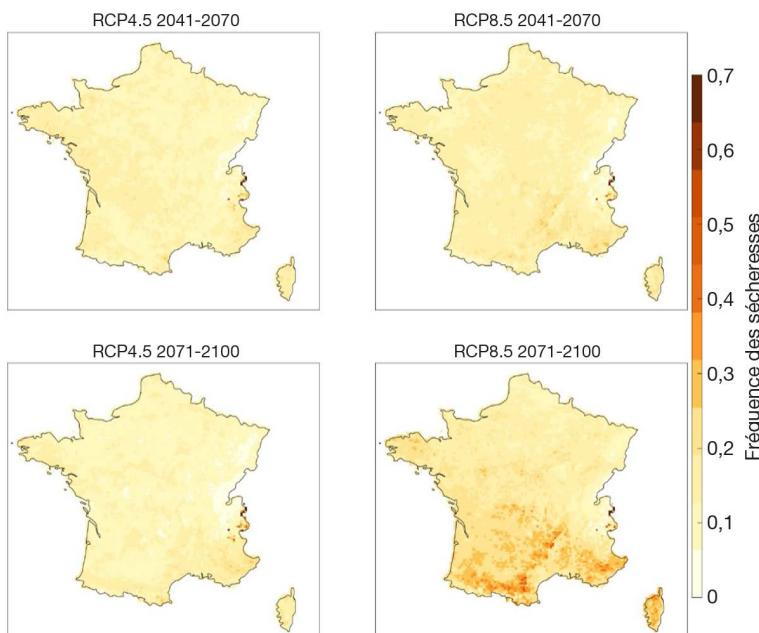


Figure 2.1. Fréquence des sécheresses hivernales du sol de période de retour décennale pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

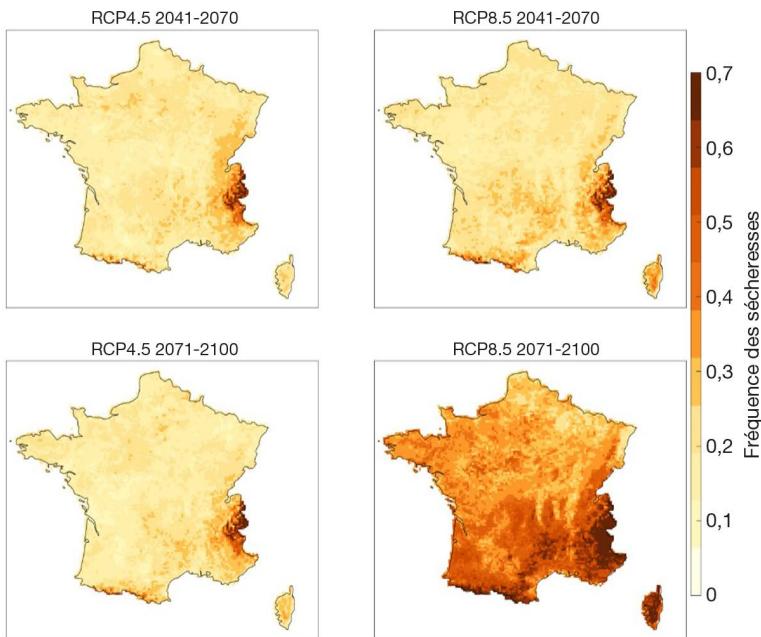


Figure 2.2. Fréquence des sécheresses estivales du sol de période de retour décennale pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Changement climatique et propriétés physiques des sols

La formation du sol et ses propriétés résultent des interactions bio-physico-chimiques entre la roche mère, le climat et l'activité biologique (plantes et organismes du sol), tandis que l'activité humaine va moduler ces interactions par l'usage des terres. Facteurs humains et pédoclimatiques interagissent donc sur les propriétés du sol, sur des échelles de temps plus ou moins longues, et il est difficile de démêler les deux facteurs pour analyser des évolutions.

Le climat intervient sur les propriétés physiques des sols de façon directe, avec l'évolution du régime des pluies et des températures, et indirecte, avec l'effet de l'évolution de la matière organique du sol et de la végétation. Comprendre ces impacts indirects nécessite donc une meilleure connaissance du devenir de la matière organique dans le sol et de sa dynamique. Celle-ci présente des enjeux fondamentaux, en matière d'objectifs de neutralité carbone à travers la séquestration du carbone dans le sol (par exemple l'«initiative 4 pour 1 000»; Pellerin *et al.*, 2021) (voir chapitre 14, section «La séquestration de carbone dans des compartiments à temps de résidence long (sol et biomasse ligneuse)», p. 347), mais aussi en ce qui concerne la qualité des sols (comme la limitation de l'érosion, le soutien à l'activité biologique et à la biodiversité) et la production végétale (par exemple l'effet sur la rétention en eau, les apports continus de nutriments pour les plantes, etc.). Actuellement, les données disponibles sur les effets directs, individuels et combinés, du changement climatique sur le carbone organique du sol sont très limitées et montrent des effets contradictoires entre facteurs (ainsi l'augmentation de la dégradation microbienne *versus* l'augmentation de la production primaire), et il n'est pas aisés de dégager des tendances. Cependant, des résultats de modélisation pour

la France métropolitaine montrent une décroissance marquée du stock de carbone organique dans le sol, très fortement influencée par le changement climatique en particulier dans les milieux cultivés. Cette décroissance est d'autant plus marquée que la texture du sol est grossière et sableuse (Meersmans *et al.*, 2016).

De façon globale, on peut déduire une possible évolution des sols en fonction des variations de température et de pluie à partir des propriétés zonales actuelles des sols, issues des climats passés. Ainsi, une augmentation du turnover de la matière organique (en lien avec un effet température) combinée à une augmentation de la pluie peut mener en zone tempérée à un lessivage des sels solubles et à plus d'altérations des minéraux du sol, tandis qu'en milieu plus sec, à l'inverse, une accumulation de sels pourrait s'établir. La texture des sols, déterminant essentiel des propriétés des sols (incluant les teneurs en argile et en carbonates), est peu susceptible d'évoluer rapidement avec le changement climatique, mais elle déterminera en revanche la sensibilité du sol à ces changements. Des sols déjà déprimés en argile et en carbonates risquent de montrer peu de résilience au changement climatique, avec une perte de cations basiques, d'éléments fins, de structure et une tendance à l'acidification. C'est le cas des luvisols, très présents dans le nord de la France et en Europe du Nord (Cornu *et al.*, 2023).

La porosité (c'est-à-dire la distribution des pores dans le sol) et la structure du sol (formation d'agrégats et pores d'origine biologique) sont des facteurs évolutifs dans le temps, qui peuvent être affectés par le changement climatique. Cela peut l'être indirectement par la modification du fonctionnement biologique du sol (activité des micro, méso et macro-organismes créant de la structure et de la porosité), plus ou moins directement par un effet de la matière organique et directement par les facteurs climatiques. Ainsi, en surface du sol, des pluies plus intenses peuvent induire la destruction et la dispersion des agrégats suivant leur stabilité, avec comme conséquences une battance accrue avec plus de ruissellement et d'érosion. L'intensité de cet effet dépendra de la texture, les sols limoneux étant les plus sensibles, et de la teneur en matières organiques.

La stabilité des agrégats dépend du changement climatique surtout par son effet sur la quantité et sur les formes de carbone organique dans le sol, produites en particulier par les plantes et les micro-organismes du sol. Ainsi, l'augmentation du CO₂ atmosphérique peut favoriser la productivité végétale, son apport de carbone au sol et l'activité fongique, résultant en une plus grande stabilité des agrégats en lien avec une augmentation de la teneur en glycoprotéines fongiques dans le sol (Rillig *et al.*, 1999). L'intensité de cette augmentation ou non de stabilité avec le CO₂ dépend de l'espèce cultivée et du niveau d'azote dans le système. À l'inverse d'un effet CO₂, un régime de température plus élevée peut nuire à la stabilité des agrégats, en particulier dans des sols secs (Lavee *et al.*, 1996), en lien avec une chute de la matière organique.

La température présente également un effet direct, décroissant, sur la porosité et sur la distribution des tailles de pores du sol par la dilatation des particules de sol entre elles. Cet effet thermique est plus fort dans les sols fins et argileux (Gao et Shao, 2015) et s'affirme d'autant plus qu'il est conjugué à une diminution de la quantité de carbone organique, pouvant conduire à une augmentation de la masse volumique du sol et de sa résistance à la pénétration, et donc à une plus grande difficulté d'enracinement. Un autre paramètre physique lié à la masse volumique et à l'impédance mécanique (résistance du sol à la pénétration et à la déformation par une force appliquée), mais également au régime hydrique du sol, est la portance du sol. Dans les zones où un accroissement du nombre de jours de pluie automnale est probable (à partir de 15 % en

plus), la période où la portance du sol sera insuffisante pour supporter le trafic d'engins agricoles (avec un risque de compaction du sol) augmentera également, limitant la période favorable pour entrer dans les parcelles à cette saison (voir chapitre 6, section « Effets sur les calendriers culturaux et les jours disponibles », p. 146).

Une évolution des propriétés de structure et/ou de l'état poral du sol, ou encore de ses propriétés physico-chimiques, en lien avec le changement climatique, peut aussi se traduire par une modification de ses propriétés hydrauliques (propriétés gouvernant la rétention et le transfert de l'eau dans le sol). Une première propriété est la mouillabilité du sol, c'est-à-dire le fait que celui-ci soit plus ou moins hydrophile ou hydrophobe. À partir d'une étude sur divers sols (sous prairies) européens, Sándor *et al.* (2021) montrent que le degré d'hydrophobie du sol est surtout lié au climat et à la texture, avant la quantité de carbone organique. Des zones avec des épisodes secs longs et fréquents, combinés à des textures grossières, peuvent mener à des niveaux d'hydrophobie du sol très élevés. Du fait de l'augmentation de la fréquence des épisodes secs en France et en Europe, le niveau d'hydrophobie des sols pourrait augmenter, avec comme conséquence une limitation de l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol, favorisant le ruissellement et l'érosion après des épisodes secs et, de plus, générant une forte hétérogénéité spatiale de l'infiltration et de la répartition de l'eau dans le sol (par écoulements préférentiels).

La rétention de l'eau dans le sol, autre propriété hydraulique, est également affectée par le changement climatique. De façon directe, l'augmentation de température diminue globalement la capacité de rétention en eau du sol : pour une même teneur en eau, la succion (c'est-à-dire les forces qui retiennent l'eau dans le sol) décroît avec la température (Wang *et al.*, 2023). Au-delà d'un effet direct de la température, la rétention en eau du sol peut être impactée indirectement à travers des changements de structure et de porosité des agrégats du sol, eux-mêmes dirigés par l'activité biologique et par l'évolution de la matière organique. Ainsi, une augmentation du CO₂ seul montre une tendance à la baisse de la rétention de l'eau, associée à une baisse de l'eau utile (quantité d'eau du sol disponible pour les plantes) ; tandis que, combinée à un apport d'azote, la rétention de l'eau augmente, ainsi que l'eau utile, en lien avec une évolution de structure des agrégats (Caplan *et al.*, 2017). Des pluies plus abondantes induisent sur une dizaine d'années une évolution de la porosité du sol, avec une tendance à l'augmentation de la rétention (Caplan *et al.*, 2019) et de l'eau utile. Cela rejoint les observations d'une plus grande réserve utile pour un climat « subhumide et frais » par rapport à un même type de milieu en condition de climat « chaud et sec » (García-Fayos et Bochet, 2009).

Des facteurs directs et indirects du changement climatique peuvent également se répercuter sur une dernière propriété hydraulique importante des sols : la conductivité hydraulique (capacité du sol à laisser l'eau s'écouler sous l'effet d'une différence de pression ou succion). La température influe directement sur la viscosité de l'eau, avec une décroissance de la viscosité quand la température augmente. Cela explique en partie l'augmentation de la conductivité hydraulique qui est constatée quand le sol se réchauffe (elle est multipliée par un facteur d'environ 1,3 à 3 pour un doublement de température selon Wang *et al.* (2023), une autre partie étant expliquée par des effets de la température sur la porosité. Au champ, des expérimentations montrent des effets indirects possibles du changement climatique. Une mété-analyse d'essais d'infiltrations (Blanchy *et al.*, 2023) tend à montrer que la conductivité hydraulique, assez proche de la saturation en eau du sol, est plus liée aux facteurs climatiques (amplitude de température, évapotranspiration, etc.) qu'aux caractéristiques du sol (texture, matière organique).

Cet effet climatique serait lié à une relation indirecte entre le climat et le développement de la macroporosité d'origine biologique ou pédogénétique. Ainsi, dans un essai mimant un climat plus humide (pluviométrie augmentée de 35 %) sur des prairies, un effet assez rapide est observé : en une dizaine d'années, on assiste à une réduction de 20 % à 30 % de la conductivité hydraulique pour des valeurs de succion faibles, quand une partie de la macroporosité se désature, mais pas de la conductivité à saturation (Caplan *et al.*, 2019). Cette diminution serait liée d'une part au bouchage de pores par les racines, à la suite d'un meilleur développement racinaire, et d'autre part, à une diminution des processus de retrait/gonflement du sol générant des pores et des fissures plus petits quand le milieu reste plus humide. Inversement, une augmentation de la conductivité hydraulique a été identifiée avec une augmentation de la température, et reliée (en plus de la viscosité) à un processus de contraction des racines générant une nouvelle porosité connectée (Wang *et al.*, 2023). À une autre échelle, et en lien avec la texture et la structure du sol, des alternances plus fréquentes d'épisodes d'humectation et de dessiccation sur des sols argileux gonflants facilitent grandement la formation de fissures dans le sol, à l'origine d'écoulements préférentiels court-circuitant la matrice du sol avec un transport rapide d'eau, de particules et de polluants potentiels en profondeur.

En définitive, bien que le nombre de preuves expérimentales directes de l'évolution des propriétés physiques des sols sous les effets du changement climatique soit encore faible, et qu'il y ait de fortes interactions avec l'usage et la gestion des sols, il semble se dégager

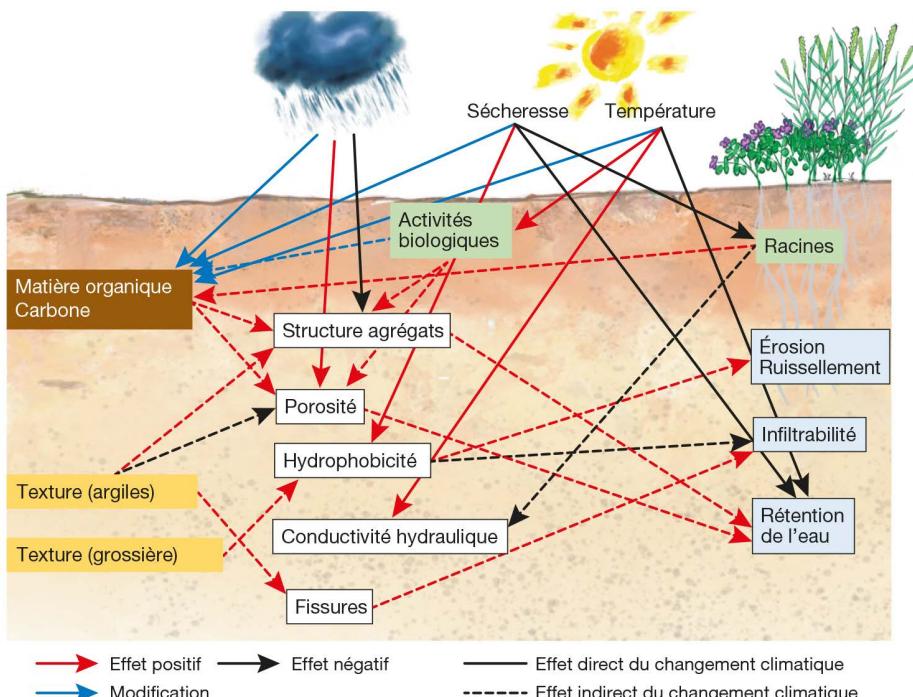


Figure 2.3. Effets du changement climatique sur certaines des propriétés physiques des sols.

Si ces propriétés peuvent être influencées directement par des effets de température et de pluviométrie, une grande partie des impacts passe par des effets indirects liés à une évolution de la matière organique du sol, de l'activité biotique du sol et de la végétation (racines), toutes trois affectées par le changement climatique.

que les processus à l'œuvre directs et indirects résultent en des évolutions plus rapides (de l'ordre de la dizaine d'années) que les processus pédogénétiques purs (de l'ordre de la centaine d'années). Une grande part de ces effets est liée à l'évolution de la matière organique et des processus biotiques du sol. La figure 2.3 récapitule ces interactions complexes possibles entre changement climatique et propriétés physiques des sols.

Changement climatique et fonctions biologiques du sol

Les sols sont des acteurs fondamentaux des services rendus par les écosystèmes, non seulement en matière de production agricole, mais aussi de régulation, par exemple au travers des cycles géochimiques (dont le carbone) et de celui de l'eau (Helming *et al.*, 2018). Le bon fonctionnement des sols est donc un enjeu fondamental, et dépend des interactions entre les compartiments biotiques et abiotiques. Au sein des compartiments biotiques, nous prenons ici comme exemple les communautés microbiennes du sol : elles jouent un rôle central dans les fonctions du sol (Philippot *et al.*, 2024).

La sécheresse affecte la vie du sol (en particulier les micro-organismes) et cela non seulement au travers des processus d'assèchement, mais aussi au travers des processus de réhumidification (« après le beau temps vient la pluie... ») : ces deux phénomènes sont toujours couplés et contribuent à des perturbations microbiennes et à des processus biogéochimiques du sol. La figure 2.4 synthétise les effets des stress climatiques sur les communautés microbiennes et leurs conséquences fonctionnelles.

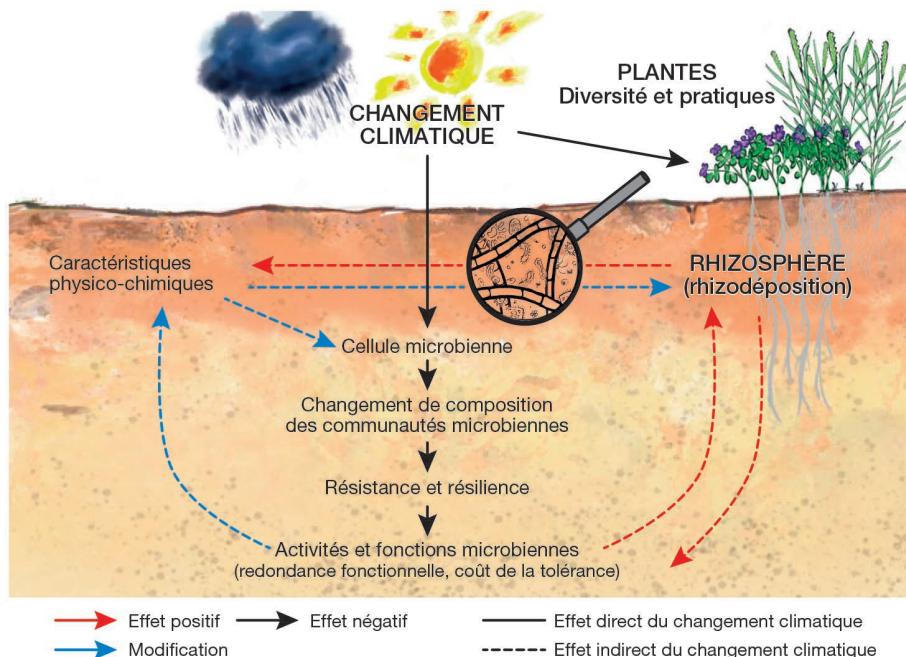


Figure 2.4. Effets du changement climatique sur les micro-organismes du sol.

À l'échelle cellulaire, avec des effets indirects induits par les interactions avec la physico-chimie du sol. À l'échelle des communautés, avec des changements de composition taxonomique, leur résistance et leur résilience face aux stress et les conséquences sur leurs fonctions en interaction avec la physico-chimie et la biologie (rhizosphère) du sol.

Certaines de ces fonctions peuvent être redondantes et l'impact du changement climatique sera alors moins visible. Elles peuvent être indirectement affectées quand la tolérance engagée dans les processus de réponse au stress présente un coût énergétique. En retour, ces fonctions microbiennes modifient la physico-chimie du sol (dont les cycles géochimiques, la structure du sol et le devenir de l'eau dans le sol), et jouent un rôle primordial vis-à-vis des plantes à travers la rhizosphère. Les plantes sont elles-mêmes directement touchées par le changement climatique et elles influencent le milieu et sa biologie (dont les micro-organismes) dans leur rhizosphère par leur diversité et par les modes de culture.

La sécheresse affecte les communautés microbiennes du sol de manière très directe en modifiant la physiologie des micro-organismes. Quand le sol s'assèche, la succion de l'eau dans le sol augmente ainsi qu'à l'intérieur de la cellule microbienne, entraînant des dégâts sur l'ADN, des changements de conformation des protéines (ce qui réduit l'efficacité des enzymes), l'accumulation de radicaux libres, pouvant conduire à la lyse cellulaire. De plus, les membranes cellulaires sont affectées par le stress lié au déficit hydrique, ce qui peut avoir des conséquences létales au cours du processus de réhydratation après la sécheresse. Les micro-organismes utilisent diverses stratégies physiologiques pour survivre au stress hydrique. Par exemple, ils rééquilibrent leur potentiel osmotique cellulaire en accumulant des solutés, comme certains sucres, ou ils forment des parois cellulaires imperméables, mais ils ne peuvent alors plus absorber facilement d'autres ressources. Enfin, la sporulation et la dormance sont également des stratégies importantes utilisées pour surmonter des conditions environnementales défavorables. Ces stratégies constituent la forme ultime de contrôle de la croissance et de régulation du cycle cellulaire en cas de stress hydrique. La sécheresse affecte aussi les micro-organismes de manière indirecte en provoquant des changements dans les caractéristiques physico-chimiques du sol qui modifient l'environnement chimique des micro-organismes du sol (par exemple, changement de l'état redox et du pH du milieu, pouvant jouer sur le stress osmotique des micro-organismes). Une réhumidification brutale du sol favorise l'activité des bactéries à réponse rapide qui métabolisent rapidement les molécules carbonées facilement disponibles, accumulées durant la période sèche (Barnard *et al.*, 2015). Comme indiqué plus haut, les propriétés physiques du sol (porosité, capacité de rétention d'eau, etc.) étant affectées par les cycles «secs/humides», cela modifierait les habitats physiques des micro-organismes et pourrait limiter de manière accrue l'accès-sibilité à l'eau. Ainsi, une méta-analyse (Manzoni *et al.*, 2012) a montré une corrélation entre l'augmentation de la succion de l'eau dans le sol et la chute de l'activité microbienne dans les sols. Les auteurs suggèrent que les réponses microbiennes à cette augmentation de la succion au cours d'une sécheresse seraient probablement déterminées par des processus physiques (chute du transfert par diffusion) plutôt que physiologiques.

Les communautés microbiennes sont des moteurs des processus écologiques. Les écologues utilisent le concept de stabilité (résistance et résilience) pour décrire les effets de perturbations (ici, la sécheresse et les températures élevées) sur les communautés biologiques. Une communauté microbienne plus stable pourrait refléter une plus grande capacité à remplir un certain nombre de fonctions malgré des perturbations (Griffiths et Philippot, 2012). Par conséquent, une façon de prévoir le fonctionnement de l'écosystème dans le cadre du changement climatique est d'examiner la résistance et la résilience des fonctions des communautés microbiennes pendant les vagues de chaleur (Tardy *et al.*, 2014).

Les impacts d'épisodes de canicule (50 °C, avec un potentiel hydrique de 10 MPa — conditions pouvant être observées *in situ* dans les premiers centimètres du sol, où l'activité microbienne est la plus intense) ont été étudiés expérimentalement sur les communautés microbiennes de sols méditerranéens et sur leur résilience. L'intensité de l'effet sur les biomasses microbiennes, sur leur diversité et sur leurs fonctions cataboliques est d'autant plus élevée que la durée de l'épisode climatique augmente, avec parfois un effet décalé dans le temps : on constate non seulement l'absence de résilience, mais aussi une perte de diversité et d'activité qui augmente un mois après la fin de l'épisode climatique (Bérard *et al.*, 2011). De plus, les effets mesurés de la température associée à la sécheresse sont beaucoup plus décisifs pour les communautés microbiennes que l'effet de la sécheresse seule (Ben Sassi *et al.*, 2012). Ces résultats suggèrent des impacts variables des canicules sur les sols, selon que celles-ci adviennent brusquement ou après un épisode de sécheresse ; en d'autres termes, une sécheresse préalable induit une tolérance des communautés microbiennes et de leurs fonctions cataboliques face à une canicule (Bérard *et al.*, 2012). Ces résultats expérimentaux d'impacts de canicules sur les structures et sur les fonctions microbiennes ont été confirmés *in situ*, à la suite des événements extrêmes de plus en plus fréquents de ces dernières années (par exemple Bei *et al.* (2023), en Allemagne, et leur étude expérimentale simulant certains scénarios climatiques futurs et les canicules des étés 2018 et 2019, en utilisant une approche de métagénomique et de métatranscriptomique). À noter que les communautés microbiennes des sols de prairies ont montré une plus grande résistance au changement climatique que celles des systèmes de grande culture.

Les sécheresses sévères et les canicules affectent les fonctions microbiennes en matière d'émissions de CO₂, de dégradation de la matière organique, de cycle et de mobilisation des nutriments ou de séquestration du carbone. Si en condition sèche la respiration microbienne est réduite, l'humidification d'un sol sec peut conduire à une augmentation de la disponibilité de la matière organique par des processus biologiques ou physiques, induisant un dégagement de CO₂ et modifiant ainsi le cycle du carbone dans le sol (Schimel, 2018).

Un rôle fondamental des micro-organismes du sol dans le fonctionnement des écosystèmes, en particulier dans les agrosystèmes, est leur contribution à la diversité et à la productivité des plantes. Inversement, les plantes sont connues pour contrôler directement ou indirectement les interactions multitrophiques dans le sol, notamment la boucle microbienne. Ainsi de Vries *et al.* (2023) suggèrent que les plantes et les communautés microbiennes ayant un historique de sécheresse commun présenteraient des interactions et des rétroactions entre plante et sol plus positives dans le cas d'une sécheresse ultérieure. Ils insistent sur l'importance de prendre en compte la coadaptation potentielle entre les plantes et les micro-organismes du sol pour comprendre les réponses du système «sol/plante» à la sécheresse. Par exemple, la composition de la communauté végétale peut induire des différences dans la résistance et dans la résilience des communautés microbiennes à une perturbation climatique. L'association d'espèces végétales (une céréale et une légumineuse) simulant une culture intercalaire conférerait une plus grande stabilité aux activités microbiennes (cycles du carbone et de l'azote) du sol face à une perturbation thermique, par rapport aux espèces en monocultures (de Oliveira *et al.*, 2020).

La zone où ces interactions entre les plantes et les communautés microbiennes du sol ont lieu est la rhizosphère (zone de sol influencée par les racines). La rhizosphère est

un environnement où les agrégats du sol sont plus stables et où la densité apparente, la porosité et les transferts d'eau et de nutriments sont modifiés par rapport au sol moyen (Hinsinger *et al.*, 2009). Ces propriétés spécifiques du sol rhizosphérique sont liées à l'exsudation de composés carbonés tels que les exopolymères par les racines (rhizodéposition) et par les micro-organismes, eux-mêmes stimulés par les racines (Bérard *et al.*, 2020; Le Gall *et al.*, 2021). On a mis en évidence des différences de rhizodéposition et de propriétés hydrophysiques dans la rhizosphère, selon les espèces et les variétés végétales (Le Gall *et al.*, 2021 et 2024), mais aussi selon le degré de déficit hydrique (Chaparro *et al.*, 2014). Ces changements dans l'exsudation des composés carbonés peuvent ensuite affecter la dynamique et les fonctions des communautés microbiennes (Sanaullah *et al.*, 2011). Ainsi, les conditions physico-chimiques particulières de la rhizosphère pourraient induire des comportements spécifiques des micro-organismes et des plantes face aux stress climatiques. Les associations mutualistes entre des plantes et des communautés rhizomicrobiennes (mycorhizes et rhizobactéries) en sont un exemple. Ces communautés rhizomicrobiennes sont connues pour être tolérantes aux stress climatiques, et des études démontrent leur capacité à soutenir le développement des plantes sous stress *via* les exsudations racinaires (Coleman-Derr et Tringe, 2014).

La compréhension de ces interactions rhizosphériques entre les propriétés hydriques locales du sol et le comportement microbien en réponse à la sécheresse et dans différents systèmes de culture pourrait permettre de mieux appréhender le fonctionnement des agroécosystèmes et la manière dont ils doivent être gérés dans un climat changeant (de Vries *et al.*, 2020; figure 2.3).

► L'eau bleue

Études de stationnarité : un regard sur les évolutions passées

Le régime hydrologique connaît une variabilité temporelle intrinsèque, avec chaque année des écoulements conditionnés par la succession d'événements météorologiques. Dans le contexte actuel, des changements d'origine climatique ou anthropique peuvent apparaître dans les séries. L'application de tests statistiques vient en partie apporter les preuves objectives d'une évolution temporelle dans les échantillons. Ces tests examinent la vraisemblance d'une hypothèse étant donné les observations. Ici, ils conduisent à choisir entre l'hypothèse de stationnarité («absence de changement») et son alternative («présence de changement»).

À l'échelle mondiale, il n'y a pas de tendance claire sur l'évolution des débits des cours d'eau (Caretta *et al.*, 2022). Toutefois, des tendances peuvent émerger à l'échelle régionale et sont d'origine climatique dans la plupart des bassins. Dans l'ensemble, le changement climatique est considéré comme l'un des moteurs de l'évolution des débits des cours d'eau à l'échelle mondiale («degré de confiance moyen», selon les travaux du Giec). La faible couverture spatio-temporelle des réseaux de surveillance des eaux souterraines et l'absence de données de captage sont un frein à la compréhension des effets du changement climatique sur les eaux souterraines. Malgré tout, les travaux collectés signalent une réduction de la piézométrie dans de nombreuses régions du monde, notamment depuis le début du xx^e siècle, en raison du développement de l'irrigation.

L'étude fondatrice de stationnarité en hydrologie à l'échelle nationale est celle de Renard *et al.* (2006) et Lang et Renard (2007); d'autres études ont suivi avec un cadre

méthodologique similaire (Renard *et al.*, 2008 ; Bard *et al.*, 2012 et 2015 ; Giuntoli *et al.*, 2012 et 2013). En France, la pratique est de considérer un minimum de trente années d'observation pour s'affranchir de la variabilité naturelle « décennale » et pour identifier la tendance de fond. La difficulté d'accès à de longues séries est réelle : les mesures des débits sont récentes et concernent bien souvent de grands bassins-versants avec de forts enjeux socio-économiques, ayant subi des modifications du régime naturel. Au signal naturel, sur les bassins influencés, se greffe alors une perturbation anthropique qui biaise les analyses et les conclusions. Sur la base des précédentes études, INRAE a mis en place la plateforme Makaho⁹ (Mann-Kendall Analysis of Hydrological Observations) qui constitue un système de visualisation cartographique interactif permettant d'examiner les tendances présentes dans les données des stations hydro-métriques aux débits peu influencés par les actions humaines. La figure 2.5 est un résultat de Makaho présentant les tendances sur les débits annuels observés dans les stations du Réseau de référence pour la surveillance des étiages (RRSE ; Giuntoli *et al.*, 2013). Le test statistique choisi est celui de Mann-Kendall, le plus utilisé dans la communauté hydrologique et jugé très efficace. La pente calculée est l'estimateur de Sen (médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points formant la série temporelle). Cette pente (voir la légende en bas à droite de la figure 2.5) est divisée par la moyenne des débits considérés sur la période d'analyse, pour permettre une comparaison entre stations sur les cartes (%/an). La carte permet d'identifier un contraste nord-sud avec une baisse quasi généralisée dans la partie sud des débits

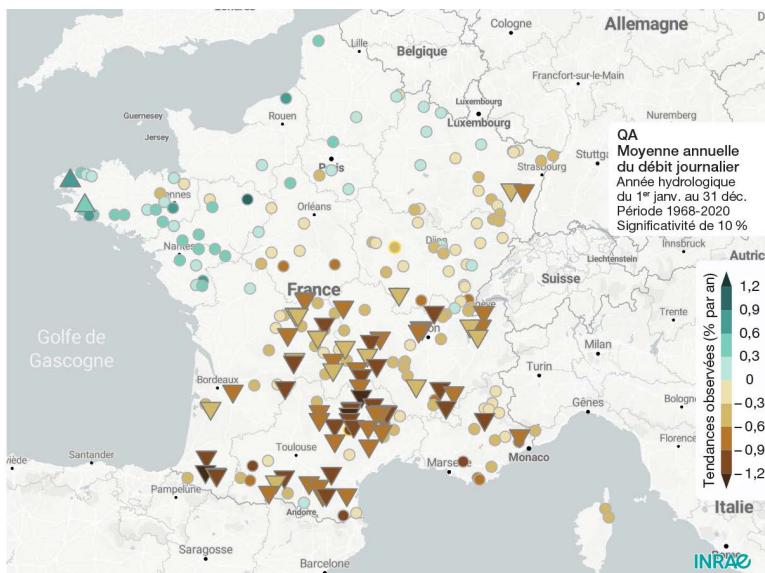


Figure 2.5. Tendance sur les débits annuels en France sur la période 1968-2020. Source : Réseau de référence pour la surveillance des étiages (RRSE), <https://hydro.eaufrance.fr/>.

Les symboles ▲ et ▼ indiquent respectivement une tendance significative à la hausse ou à la baisse. La couleur renseigne sur la valeur de la pente de Sen calculée sur la fenêtre temporelle. Le symbole ● indique une tendance non significative.

9. <https://makaho.sk8.inrae.fr/>

annuels sur la période 1968-2020. Même si une démarche d'attribution au changement climatique n'a pas été engagée, le caractère quasi général laisse soupçonner un phénomène d'emprise régionale et le signe des pentes est compatible avec les effets attendus du changement climatique.

Études d'impact

La France apparaît, bien évidemment, dans des études globales : on trouvera dans les différents supports du Giec des informations sous forme de cartes¹⁰ ou des évolutions de variables hydrologiques sur une ou plusieurs stations hydrométriques françaises, données à titre d'illustration. Des projections hydrologiques ont été élaborées à l'échelle européenne et, pour nombre d'entre elles, ont impliqué le service scientifique interne de la Commission européenne (Joint Research Centre¹¹) pour apporter un éclairage sur l'impact du changement climatique en soutien aux politiques de l'Union européenne. L'intérêt de telles études est de mettre en perspective les changements affectant l'Hexagone comparativement à ceux des pays européens voisins. Les travaux les plus récents sont présentés par niveau de réchauffement, sans placer ces niveaux dans une temporalité. Ainsi, Bisselink *et al.* (2020) mettent en évidence une réponse hydrologique organisée par bande de latitude avec des pays d'Europe du Sud vraisemblablement confrontés à une diminution de la disponibilité annuelle de l'eau et à l'inverse, les pays d'Europe centrale et septentrionale bénéficiant d'une disponibilité annuelle en eau accrue, quel que soit le niveau de réchauffement. Cammalleri *et al.* (2020) concluent à une aggravation des débits d'étiage dans le sud de l'Europe, d'autant plus forte que le réchauffement est élevé. L'Europe occidentale sera en grande partie confrontée à des conditions de sécheresse de plus en plus fréquentes et intenses. Cela contraste avec la Scandinavie et le nord-est de l'Europe, où les projections suggèrent une réduction du risque de sécheresse. Pour la France avec un réchauffement de +1,5 °C, la fréquence des sécheresses augmentera sur la moitié de son territoire, et cette augmentation concernera la quasi-intégralité des cours d'eau avec un réchauffement de +3 °C. Concernant les crues, selon Roudier *et al.* (2016), dans l'hypothèse d'un réchauffement global de +2 °C en Europe, la latitude de 60° N définit une frontière avec une zone, au nord, de diminution de la sévérité des crues et une zone, au sud (incluant l'intégralité de la France), de hausse de la sévérité des crues. L'analyse portait sur les quantiles de débits journaliers maximaux annuels de période de retour de dix et cent ans. Ces résultats sont très dépendants des projections climatiques comme le démontrent Di Sante *et al.* (2021).

Les modèles appliqués dans les études paneuropéennes le sont bien souvent avec une paramétrisation globale ajustée sur un nombre trop réduit de stations hydrométriques (faute d'un accès aux données), comparativement à l'extension spatiale du domaine modélisé. De ce fait, des spécificités locales échappent forcément aux modèles et de telles études ne peuvent donner qu'un aperçu des tendances à mésoéchelle. Une analyse et une modélisation plus détaillées à une échelle plus fine sont indispensables pour comprendre pleinement tous les changements.

C'est ce qui a motivé l'émergence d'Explore2070, première étude prospective nationale sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau à l'horizon 2046-2065.

10. <https://interactive-atlas.ipcc.ch>

11. <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>

En France hexagonale, les résultats obtenus indiquent : (1) une diminution significative globale des débits moyens annuels, de l'ordre de -40% à -10% selon les projections hydrologiques, particulièrement prononcée en Seine-Normandie et en Adour-Garonne, (2) pour une grande majorité des cours d'eau, une diminution des débits en étiage encore plus prononcée que la diminution à l'échelle annuelle et (3) des évolutions plus hétérogènes des crues (Chauveau *et al.*, 2013). Le projet Explore2070 donnait également à voir la piézométrie sur un ensemble morcelé d'aquifères ou de karsts. À l'échelle du bassin de la Somme (Amraoui *et al.*, 2019), la baisse de la recharge calculée à partir des résultats des sept projections climatiques d'Explore2070 est de l'ordre de -19% . Dans la plaine alluviale d'Alsace, toutes les projections climatiques conduisent à une baisse de la recharge qui se traduit par une baisse modérée des niveaux piézométriques. Dans les nappes du Jurassique du Poitou-Charentes, la situation est très contrastée selon les projections climatiques. La recharge est la seule variable disponible à l'échelle nationale : une baisse quasi générale de la recharge comprise entre -25% et -10% est projetée entre 1961-1990 et 2046-2065.

Depuis la fin de cette étude, de nouvelles générations de projections ont émergé dans le cadre de CMIP5 et CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) et ont nourri le 5^e rapport du Giec (AR5). Ces données CMIP5 ont été exploitées dans le cadre des travaux de Dayon (2015) qui a examiné les différentes facettes du régime hydrologique, et de ceux de Sauquet *et al.* (2021), centrés sur l'évolution des caractéristiques d'intermittence sur les têtes de bassin. D'autres études ou projets à portée régionale concernant l'hydrologie de surface ou souterraine ont émergé sous l'impulsion des services de l'État ou des agences de l'eau à la suite d'Explore2070. Un recensement complet a été réalisé par Sauquet *et al.* (2024a). Le projet Explore2, coordonné par INRAE et par l'Office international de l'eau (OIEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore2070. Officiellement lancé en juillet 2021, cofinancé par les partenaires du projet, le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a mis à jour les connaissances de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la France hexagonale et a facilité l'appropriation par les acteurs de l'eau des données élaborées, des incertitudes inhérentes à l'exercice et des résultats. Les climats obtenus sont ceux décrits dans le chapitre 1. Ils ont alimenté intégralement ou partiellement jusqu'à neuf modèles hydrologiques pour décrire le futur des débits des cours d'eau, et la plate-forme Aqui-Fr, le modèle hydrodynamique Mona et le modèle de recharge potentielle Recharge pour décrire le devenir des eaux souterraines.

Sans surprise, les effets du changement climatique seront d'autant plus sévères que les émissions de gaz à effet de serre seront plus importantes. Les exercices de modélisation (Sauquet *et al.*, 2024b) ont conclu, sous le scénario d'émissions fortes (RCP8.5) et en fin de siècle, comparativement à la période 1976-2005 :

- des évolutions incertaines des débits annuels à l'échelle de la France qui résultent d'une forte incertitude sur l'évolution de la pluviométrie annuelle. Les projections ne s'accordent pas sur le signe du changement du débit annuel moyen, à quelques exceptions qui présentent des baisses importantes (Pyrénées et ses contreforts, Alpes du Sud), là où les projections climatiques convergent sur la réduction de la pluviométrie annuelle ;
- une majorité de projections qui convergent vers une baisse des débits moyens estimatifs (une majorité entre -50% et -15%). Les diminutions les plus sensibles concernent le Sud-Ouest, les Alpes et le secteur méditerranéen (entre -50% et -40%) ;

- une augmentation de la recharge hivernale des aquifères, hormis le Sud et une partie de la Bretagne;
- une baisse des niveaux de nappes moyens annuels en Bretagne, en Poitou-Charentes et dans le Tarn-et-Garonne et inversement une hausse sur la partie nord modélisée (Bassin parisien, Hauts-de-France, Basse-Normandie) (à noter que la modélisation ne concerne pas l'entièreté de la France hexagonale);
- des sécheresses hydrologiques plus sévères avec une forte convergence des modélisations dans le sud de la France.

Les analyses sont réalisées ici sur un ensemble de 2 500 points de simulations issues d'au moins quatre modèles hydrologiques différents parmi les neuf (démarche multi-modèle). Chaque point sur les deux cartes est un point de simulation.

Les résultats sont illustrés à l'aide d'un indicateur d'étiage estival. Chaque année, on ne conserve que le débit moyen sur dix jours minimal dans l'année (VCN10) échantillonné de mai à novembre, pour chaque projection hydrologique individuelle entre 1976 et 2100.

La figure 2.6 met en lumière la cohérence de signe du changement. Chaque série de VCN10 est résumée par une tendance linéaire calculée sur la chronique de l'indicateur.

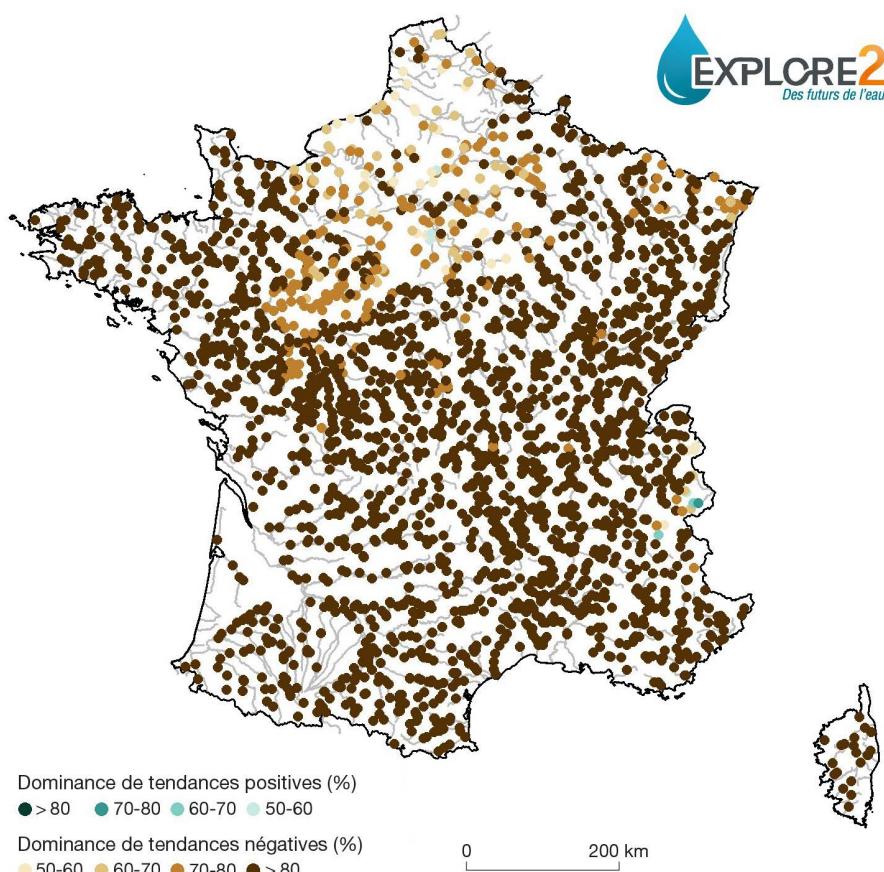


Figure 2.6. Signe majoritaire et proportion associée des tendances sur l'ensemble du xxie siècle pour le débit d'étiage estival VCN10 sous scénario RCP8.5.

Ici, l'estimateur de la pente est celui de Sen (1968), classiquement utilisé dans les analyses de stationnarité (voir ci-dessus).

Les pentes calculées, on en déduit la proportion de valeurs de pente positives ou négatives pour retenir le signe dominant de l'évolution. Les points avec des nuances de vert sont ceux pour lesquels la tendance à la hausse est dominante parmi toutes les projections ; à l'inverse, les points avec des nuances de marron sont ceux pour lesquels la tendance à la baisse est dominante parmi toutes les projections.

Les points prennent des teintes de marron, particulièrement prononcées sur la partie sud du territoire, évidence d'une baisse quasi généralisée et progressive de ce débit d'étiage. Il y a consensus et cohérence des signes à l'échelle de la France métropolitaine. Les teintes les moins prononcées se situent dans le Bassin parisien. Dans ce secteur, le régime des cours d'eau est gouverné par les interactions avec les nappes et la sévérité future des étiages est conditionnée par l'évolution des précipitations hivernales et de la recharge potentielle hivernale. Une augmentation de cette recharge hivernale présente dans certaines projections peut induire des débits d'étiage plus importants que ceux de la période actuelle.

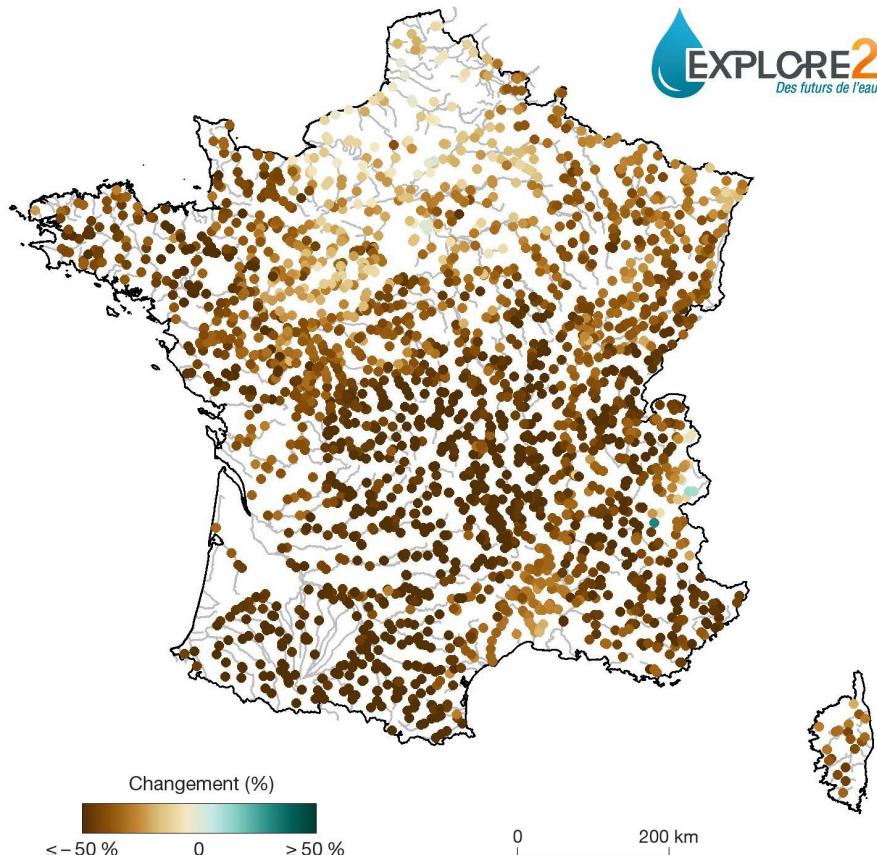


Figure 2.7. Changements projetés pour la moyenne des débits d'étiage VCN10 estival sous scénario RCP8.5 en fin de siècle (référence : 1976-2005) (estimation médiane, tous modèles hydrologiques confondus).

En complément, le changement de la valeur moyenne des VCN10 entre la fin de siècle (2070-2099) et la période récente (1976-2005) est tracé en figure 2.7. Sans surprise, les valeurs sont majoritairement à la baisse et la structure spatiale est proche de celle de la carte précédente. Notons les baisses sensibles puisqu'un grand nombre de valeurs se situe sous -50 % (une majorité entre -55 % et -20 %) : en moyenne, le débit est divisé par deux par rapport à la référence actuelle (1976-2005).

► Conclusion

Nous avons abordé ici les effets du changement climatique sur le fonctionnement du sol avec comme exemple les réponses des micro-organismes des sols, en illustrant également la complexité des interactions et des rétroactions dans le sol et avec les plantes pouvant avoir des conséquences sur les réponses des plantes elles-mêmes aux stress climatiques. Il existe encore trop peu d'études sur les effets du changement climatique sur d'autres groupes taxonomiques de la macrofaune et de la mésofaune édaphique, alors que ces groupes présentent aussi des rôles fondamentaux pour le fonctionnement trophique, géochimique, hydrologique et physique du sol, et qu'ils sont sensibles au changement climatique (par exemple, Aupic-Samain *et al.*, 2021; Zeiss *et al.*, 2023). De manière générale, le sol, sa vie, sa diversité et ses fonctions sont sensibles au changement climatique, mais c'est aussi par le sol que des solutions d'adaptation des systèmes de culture au changement climatique sont à développer (par exemple, Doussan *et al.*, 2024), d'où la nécessité de développer des travaux impliquant de concert des disciplines diverses telles que l'écologie, la chimie, la physique, l'hydrophysique et la pédologie en interaction avec l'agronomie. Les dernières modélisations en France hexagonale concluent à une forte augmentation des sécheresses des sols en été et une absence de changement notable des sécheresses des sols en hiver sous le scénario de fortes émissions en gaz à effet de serre.

Des changements dans les régimes hydrologiques ont pu être constatés. D'autres changements concernant l'eau bleue d'une ampleur plus importante sont attendus au cours du xxie siècle, en particulier en cas d'émissions fortes de gaz à effet de serre. Selon les projections Explore2, le changement climatique conduira à une réduction de la ressource en eau estivale et à une intensification de divers événements extrêmes sur les domaines modélisés. Ainsi, les simulations projettent une intensification des sécheresses du sol et hydrologiques avec une confiance forte. Comme de nombreuses études le montrent, quand plusieurs scénarios d'émission de GES et plusieurs horizons temporels sont considérés, les intensités de changement sont plus importantes en l'absence de politique d'atténuation ou d'adaptation et en fin de siècle. Les gestions territoriales de l'eau d'hier et de demain seront nécessairement différentes pour s'adapter au changement des régimes hydrologiques.

► Références

- Amraoui N., Sbai M.A., Stollsteiner P., 2019. Assessment of climate change impacts on water resources in the Somme River Basin (France), *Water Resources Management*, 33, 2073-2092, <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02230-x>.
- Aupic-Samain A., Baldy V., Delcourt N., Henning Krogh P., Gauquelin T., Fernandez C., Santonja M., 2021. Water availability rather than temperature control soil fauna community structure and prey-predator interactions, *Functional Ecology*, 35, 1550-1559, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13745>.

- Bard A., Renard B., Lang M., 2012. Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin, *La Houille Blanche*, 1, 38-43, <https://doi.org/10.1051/lhb/2012006>.
- Bard A., Renard B., Lang M., Giuntoli I., Korck J., Koboltschnig G. *et al.*, 2015. Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers, *Journal of Hydrology*, 529, 1823-1837, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.052>.
- Barnard R., Osborne C., Firestone M.K., 2015. Changing precipitation pattern alters soil microbial community response to wet-up under a Mediterranean-type climate, *The ISME Journal*, 9, 946-957, <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.192>.
- Bei Q., Reitz T., Schnabel B., Eisenhauer N., Schädler M., Buscot F., Heintz-Buschart A., 2023. Extreme summers impact cropland and grassland soil microbiomes, *The ISME Journal*, 17(10), 1589-1600, <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01470-5>.
- Ben Sassi M., Dollinger J., Renault P., Tlili A., Bérard A., 2012. The FungiResp method: An application of the MicroRespTM method to assess fungi in microbial communities as soil biological indicators, *Ecological Indicators*, 23, 482-490, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.002>.
- Bérard A., Bouchet T., Sévenier G., Pablo A.L., Gros R., 2011. Resilience of soil microbial communities impacted by severe drought and high temperature in the context of Mediterranean heat waves, *European Journal of Soil Biology*, 47(6), 333-342, <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.08.004>.
- Bérard A., Ben Sassi M., Renault P., Gros R., 2012. Severe drought-induced community tolerance to heat wave. An experimental study on soil microbial processes, *Journal of Soils and Sediments*, 12, 513-518, <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0469-1>.
- Bérard A., Clavel T., Le Bourvellec C., Davoine A., Le Gall S., Doussan C. *et al.*, 2020. Exopolysaccharides in the rhizosphere: a comparative study of extraction methods. Application to their quantification in Mediterranean soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 149, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107961>.
- Bisselink B., Bernhard J., Gelati E., Adamovic M., Guenther S., Mentašchi L. *et al.*, 2020. Climate change and Europe's water resources, EUR 29951 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-10398-1, <https://doi.org/10.2760/15553>, JRC118586.
- Blanchy G., Albrecht L., Bragato G., Garré S., Jarvis N., Koestel J., 2023. Impacts of soil management and climate on saturated and near-saturated hydraulic conductivity: analyses of the Open Tension-disk Infiltrometer Meta-database (OTIM), *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(14), 2703-2724, <https://doi.org/10.5194/hess-27-2703-2023>.
- Cammalleri C., Naumann G., Mentašchi L., Bisselink B., Gelati E., De Roo A., Feyen L., 2020. Diverging hydrological drought traits over Europe with global warming, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 5919-5935, <https://doi.org/10.5194/hess-24-5919-2020>.
- Caplan J.S., Giménez D., Subroy V., Heck R.J., Prior S.A., Runion G.B. *et al.*, 2017. Nitrogen-mediated effects of elevated CO₂ on intra-aggregate soil pore structure, *Global Change Biology*, 23(4), 1585-1597, <https://doi.org/10.1111/gcb.13496>.
- Caplan J.S., Giménez D., Hirmas D.R., Brunsell N.A., Blair J.M., Knapp A.K., 2019. Decadal-scale shifts in soil hydraulic properties as induced by altered precipitation, *Science Advances*, 5(9), eaau6635, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau6635>.
- Caretta M.A., Mukherji A., Arfanuzzaman M., Betts R.A., Gelfan A., Hirabayashi Y. *et al.*, 2022. Water, 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 551-712, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>.
- Chaparro J.M., Badri D.V., Vivanco J.M., 2014. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development, *The ISME Journal*, 8(4), 790-803, <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.196>.
- Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.-Y., Sauquet É., Vidal J.-P. *et al.*, 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?, *La Houille Blanche*, 4, 5-15, <https://doi.org/10.1051/lhb/2013027>.
- Coleman-Derr D., Tringe S.G., 2014. Building the crops of tomorrow: advantages of symbiont-based approaches to improving abiotic stress tolerance, *Frontiers in Microbiology*, 5, 1-6, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00283>.

- Cornu S., Montagne D., Boca A., 2023. The effect of global change on the soil body, in Goss M.J., Oliver M. (Eds), *Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)*, Academic Press, Oxford, p. 360-368, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00102-6>.
- Dayon G., 2015. Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies, thèse de doctorat, université Toulouse-III Paul Sabatier, 209 p.
- De Oliveira A.B., Cantarel A.A.M., Seiller M., Florio A., Bérard A., Hinsinger P. et al., 2020. Short-term plant legacy alters the resistance and resilience of soil microbial communities exposed to heat disturbance in a Mediterranean calcareous soil, *Ecological Indicators*, 108, 105740, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105740>.
- 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(6488), 270-274, <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>.
- De Vries F., Lau J., Hawkes C., Semchenko M., 2023. Plant-soil feedback under drought: does history shape the future?, *Trends in Ecology & Evolution*, 38(8), 708-718, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.03.001>.
- Di Sante F., Coppola E., Giorgi F., 2021. Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations, *International Journal of Climatology*, 41, 3203-3221, <https://doi.org/10.1002/joc.7014>.
- Doussan C., Le Gall S., Ruy S., Bérard A., 2024. Utiliser les racines pour moduler les impacts des déficits en eau et améliorer la gestion de l'eau dans les agrosystèmes, *Sciences Eaux & Territoires*, 45, 8144, <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2024.45.8144>.
- Gao H., Shao M., 2015. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties, *Soil and Tillage Research*, 153, 145-154, <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.05.003>.
- García-Fayos P., Bochet E., 2009. Indication of antagonistic interaction between climate change and erosion on plant species richness and soil properties in semiarid Mediterranean ecosystems, *Global Change Biology*, 15(2), 306-318, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01738.x>.
- Giuntoli I., Renard B., Lang M., 2012. Floods in France, in *Changes in flood risk in Europe*, Kundzewicz Z.W. (Ed.), IAHS Special Publication, 10, 199-211.
- Giuntoli I., Renard B., Vidal J.-P., Bard A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices, *Journal of Hydrology*, 482, 105-118, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>.
- Griffiths B.S., Philippot L., 2012. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community, *FEMS Microbiology Reviews*, 37, 112-129, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00343.x>.
- Helming K., Daedlow K., Paul C., Techel A., Bartke S., Bartkowski B. et al., 2018. Managing soil functions for a sustainable bioeconomy – assessment framework and state of the art, *Land Degradation & Development*, 29(9), 3112-3126, <https://doi.org/10.1002/lde.3066>.
- Hinsinger P., Bengough A.G., Vetterlein D., Young I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance, *Plant and Soil*, 321, 117-152, <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>.
- Lang M., Renard B., 2007. Analyse régionale sur les extrêmes hydrométriques en France : détection de changements cohérents et recherche de causalité hydrologique, *La Houille Blanche*, 6, 83-89, <https://doi.org/10.1051/lhb:2007087>.
- Lavee H., Sarah P., Imeson A.C., 1996. Aggregate stability dynamics as affected by soil temperature and moisture regimes, *Geografiska Annaler : Series A, Physical Geography*, 78(1), 73-82, <https://doi.org/10.1080/04353676.1996.11880453>.
- Le Gall S., Lapie C., Cajot F., Doussan C., Corridor L., Bérard A., 2024. Chemical diversity of crop root mucilages: Implications for their maximal water content and decomposition, *Rhizosphere*, 29, 100858, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100858>.
- Le Gall S., Bérard A., Page D., Lanöe L., Bertin N., Doussan C., 2021. Increased exopolysaccharide production and microbial activity affect soil water retention and field performance of tomato under water deficit, *Rhizosphere*, 19, 100408, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100408>.
- Manzoni S., Schimel J., Porporato A., 2012. Responses of soil microbial communities to water-stress: Results from a meta-analysis, *Ecology*, 93(4), 930-938, <https://doi.org/10.1890/11-0026.1>.

- Meersmans J., Arrouays D., Van Rompaey A.J.J., Pagé C., De Baets S., Quine T.A., 2016. Future C loss in mid-latitude mineral soils: climate change exceeds land use mitigation potential in France, *Scientific Reports*, 6, 35798, <https://doi.org/10.1038/srep35798>.
- Pellerin S., Bamière L., Savini I., Rechauchère O., 2021. *Stocker du carbone dans les sols français*, Versailles, éditions Quæ, 230 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3149-2>.
- Philippot L., Chenu C., Kappler, A., Rillig M.C., Fierer N., 2024. The interplay between microbial communities and soil properties, *Nature Reviews Microbiology*, 22, 226-239, <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>.
- Renard B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre O., Niel H. *et al.*, 2006. Évolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées, *La Houille Blanche*, 6, 48-54, <https://doi.org/10.1051/lhb:2006100>.
- Renard B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre O., Niel H. *et al.*, 2008. Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency, *Water Resources Research*, 44(8), W08419, <https://doi.org/10.1029/2007WR006268>.
- Richardson K., Steffen W., Lucht W., Bendtsen J., Cornell S.E., Donges J.F. *et al.*, 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries, *Science Advances*, 9, 37, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>.
- Rillig M.C., Wright S.F., Allen M.F., Field C.B., 1999. Rise in carbon dioxide changes soil structure, *Nature*, 400, 628, <https://doi.org/10.1038/23168>.
- Roudier P., Jafet A.C.M., Donnelly C., Feyen L., Gruell W., Fulco L., 2016. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming, *Climatic Change*, 135, 341-355, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>.
- Sanaullah M., Blagodatskaya E., Chabbi A., Rumpel C., Kuzyakov Y., 2011. Drought effects on microbial biomass and enzyme activities in the rhizosphere of grasses depend on plant community composition, *Applied Soil Ecology*, 48(1), 38-44, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.02.004>.
- Sándor R., Iovino M., Lichner L., Alagna V., Forster D., Fraser M. *et al.*, 2021. Impact of climate, soil properties and grassland cover on soil water repellency, *Geoderma*, 383, 114780, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114780>.
- Sauquet É., Beaufort A., Sarreméjane R., Thirel G., 2021. Predicting flow intermittence in France under climate change, *Hydrological Sciences Journal*, 66, 2046-2059, <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444>.
- Sauquet É., Thirel G., Vergnes J.-P., Habets F., 2024a. Étude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique en France métropolitaine – synthèse bibliographique, *Recherche Data Gouv*, V1, 43 p., <https://doi.org/10.57745/XKMLMG>.
- Sauquet É., Evin G., Siauve S., Bornancin-Plantier A., Jacquin N., Arnaud P. *et al.*, 2024b. Messages et enseignements du projet Explore2, *Recherche Data Gouv*, <https://doi.org/10.57745/J3XIPW>.
- Schimel J.P., 2018. Life in dry soils: effects of drought on soil microbial communities and processes, *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 49, 409-32, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolys-110617-062614>.
- Sen P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389, <https://doi.org/10.2307/2285891>.
- Tardy V., Mathieu O., Lévéque J., Terrat S., Chabbi A., Lemanceau P. *et al.*, 2014. Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity, *Environmental Microbiology Reports*, 6(2), 173-183, <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12126>.
- Tramblay Y., Sauquet É., Arnaud P., Rousset F., Soubeyroux J.-M., Jeantet A. *et al.*, 2024. Scénarios d'extrêmes hydrologiques, *Recherche Data Gouv*, <https://doi.org/10.57745/2XDJ5H>.
- Wang H., Chen R., Leung A.K., Huang J., 2023. Temperature effects on the hydraulic properties of unsaturated rooted soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 60(6), 936-945, <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0475>.
- Zeiss R., Dahlke J., Eisenhauer N., Briones M.J.I., Mathieu J., Lomba A. *et al.*, 2023. Effects of climate on the distribution and conservation of commonly observed European earthworms, *Conservation Biology*, 38(2), e14187, <https://doi.org/10.1111/cobi.14187>.

Partie 2

Méthodes d'analyse et de projection des impacts du changement climatique en agriculture

Chapitre 3

Indicateurs et observatoires pour mettre en évidence et comprendre les impacts du changement climatique en France

Iñaki García de Cortázar-Atauri, Maël Aubry, Éric Ceschia, Isabelle Chuine, Dominique Courault, Carina Furusho-Percot, Marie Launay, Renan Le Roux

Dès le milieu des années 1990, la recherche agronomique française a commencé à s'interroger sur les effets du réchauffement climatique sur l'agriculture à l'échelle nationale (Delécolle *et al.*, 1995). Les premiers travaux du Giec (ou IPCC en anglais) avaient commencé à explorer de manière très limitée les effets futurs de l'augmentation des températures sur certaines productions agricoles dans certains territoires. Les questions de productivité (rendements) étaient alors privilégiées en relation avec la sécurité alimentaire (voir chapitre 6). Des travaux s'attachant à caractériser rétrospectivement les changements observés en lien avec le réchauffement ont alors démarré.

La phénologie a été identifiée dès les premiers travaux du Giec comme un indicateur biologique particulièrement pertinent pour tracer les évolutions dues au changement climatique (Menzel *et al.*, 2006). En effet, la phénologie décrit les cycles saisonniers du vivant (les floraisons des arbres, les migrations des oiseaux, l'apparition des insectes comme les coccinelles), lesquels dépendent majoritairement des conditions climatiques (et en premier lieu de la température). Cette information permet de caractériser la capacité d'adaptation (ou non) d'une espèce à son environnement.

Parallèlement à ces observations de phénologie, des travaux permettant de caractériser l'évolution du climat passé, présent et futur ont démarré afin de quantifier localement et globalement les changements observés. Ces travaux se sont appuyés sur une palette d'indicateurs climatiques qui avaient été développés d'une part pour caractériser les climats régionaux et d'autre part pour y associer les productions agricoles de ces territoires (alors appelés indicateurs agroclimatiques). Ainsi, un ensemble d'indicateurs avait pu être mis en place pour caractériser les zones climatiques de la vigne en prenant en compte les conditions thermiques et la pluviométrie à différentes périodes de l'année (Riou, 1994; Tonietto et Carboneau, 2004). Ces travaux se sont largement développés au cours des deux dernières décennies. Néanmoins, des limites méthodologiques ont été pointées récemment quant à la construction même de ces indicateurs. En particulier, l'avancée des stades phénologiques liée au réchauffement rend caduc le calcul d'indicateurs sur des périodes

calendaires. En effet, ces périodes calendaires ne coïncident plus avec les stades phénologiques sensibles pour lesquels ces indicateurs avaient été calculés, du fait des changements importants des conditions de développement des espèces cultivées classiquement dans chaque territoire.

Dans ce chapitre, nous allons donc nous intéresser tout d'abord à l'évolution historique de l'observation de la phénologie en France et à la façon dont ces données d'observation ont contribué à améliorer la compréhension des impacts déjà observés et de leurs conséquences à venir. Nous décrirons ensuite le développement des indicateurs écoclimatiques qui permettent d'intégrer à l'information fournie par les indicateurs agroclimatiques le caractère non stationnaire de la phénologie des espèces. Cette approche permet de mieux caractériser les effets du changement climatique sur la faisabilité climatique des cultures et de mieux anticiper les besoins en matière d'adaptation. Enfin, les approches de modélisation seront quant à elles développées plus en détail dans le chapitre 4 de cet ouvrage.

► L'observation de la phénologie, une histoire de données et de réseaux

L'étymologie du mot *phénologie* vient du grec (*phaenien*), et cela se traduit par « l'étude des apparitions ». Celle-ci a été identifiée comme l'une des variables essentielles de la biodiversité (Pereira *et al.*, 2013). Les événements phénologiques sont pilotés par les conditions météorologiques, principalement par la température, et c'est pour cette raison que le changement climatique est en train de bouleverser les rythmes saisonniers de l'ensemble du monde vivant.

L'observation de la phénologie, même si cette science n'existe en tant que telle que depuis le milieu du XIX^e siècle, traduit une démarche empirique d'observation de l'environnement proche afin de le comprendre et éventuellement, après un certain nombre d'années, de le caractériser (par exemple au travers de sa variabilité interannuelle). C'est ainsi que l'on a pu construire un calendrier des saisons pour les différentes espèces végétales cultivées dans un lieu donné (Mazoyer, 2002). Cela a permis de définir les meilleures périodes de semis et de récolte afin de maximiser la capacité de production, tout en essayant d'esquiver au maximum les risques climatiques comme le gel à la sortie de l'hiver. Ainsi, et depuis tout temps, des observateurs amateurs ou professionnels ont recueilli des centaines de milliers de données d'observation dans leurs jardins, exploitations ou lieux de récréation (WMO, 2009). Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que plusieurs sociétés savantes ont tenté d'organiser ce recueil d'informations aux échelles nationale et internationale afin de mieux comprendre l'effet du climat sur les systèmes naturels et agricoles (les agroécosystèmes). Pour la France, Angot (1883) fut le premier à solliciter les différents acteurs locaux afin de compiler les observations des dates de semis, de floraison et de feuillaison des végétaux, ou même l'apparition de certains animaux après hibernation, pour plus d'une centaine d'espèces. Ces données étaient ensuite rassemblées au niveau des communes puis des départements. Dans les communes viticoles, Angot (1883) demanda également de recueillir les dates des vendanges. D'autres initiatives ont été lancées dans différents sites afin de caractériser la phénologie à l'échelle locale (voir par exemple les données d'observation du jardin de Saint-Maur-des-Fossés; Riposte *et al.*, 2021a). Au début des années 1920, des initiatives d'observation à l'échelle internationale

sont aussi lancées pour caractériser des secteurs (iso)climatiques pour les espèces végétales avec l'idée que chaque espèce végétale est associée à un type de climat donné (Clark *et al.*, 1924). Ainsi, plusieurs espèces ont été observées pendant plus de cinquante ans dans un jardin spécifiquement créé dans cet objectif au centre INRAE de Versailles (Ripoche *et al.*, 2021b). En parallèle, des observations dans les sites d'expérimentation agricole ont toujours été réalisées pour mieux caractériser les cycles de développement de différentes variétés cultivées, et pour ainsi choisir celles qui sont les plus adaptées aux différentes conditions locales. Enfin, contrairement à la France, d'autres pays européens (Allemagne, Suisse) ont constitué des réseaux d'observation de la phénologie portés par des citoyens et qui fonctionnent parfois depuis plus de soixante-dix ans de façon continue.

Toute cette masse de données identifiée ou suspectée a mobilisé des scientifiques d'INRAE dès le début des années 2000 pour les compiler et les structurer dans différentes bases de données permettant leur analyse. La base de données Phenoclim (Seguin *et al.*, 2004) vise à rassembler les données de différents stades phénologiques (notamment des dates de floraison) issues des unités expérimentales d'INRAE. L'analyse de ces données a mis en lumière à quel point le changement climatique avait déjà affecté la phénologie de plusieurs espèces fruitières et de la vigne en France. Ces premiers résultats ont montré la nécessité d'approfondir ces travaux de recherche et de poursuivre la compilation de ces données pour de nombreuses espèces. En parallèle, à la fin de l'année 2005, le groupement de recherche 2968 « Système d'information phénologique pour l'étude et la gestion des changements climatiques » voit le jour et rassemblait alors vingt-quatre laboratoires de recherche publique (dont les travaux étaient principalement centrés sur les arbres fruitiers et les forêts), deux réseaux scientifiques d'observation et douze associations travaillant dans le domaine de l'environnement, de l'éducation et de la santé. Ce collectif avait pour ambition de coconstruire un observatoire national des rythmes saisonniers du monde vivant. Pour cela, un programme de sciences et recherches participatives, l'Observatoire des saisons¹² (porté par le CNRS et animé par Tela Botanica¹³) a été lancé. Après plusieurs années de fonctionnement, la dynamique autour de la base de données Phenoclim a commencé à s'arrêter. Afin de lui donner un nouvel élan, le projet Perpheclim a été financé en 2012 par INRAE avec pour objectif de construire l'infrastructure nécessaire pour gérer les données de phénologie des espèces pérennes étudiées par l'institut et regroupant environ vingt-sept laboratoires de recherche. Ce projet a permis de coordonner et de structurer sur la durée l'activité d'INRAE autour de la phénologie, ainsi que de se coordonner avec les autres initiatives existantes et portées par le CNRS (notamment le programme de l'Observatoire des saisons). C'est aussi dans le cadre de Perpheclim que le dispositif Divae (dispositif de verger observatoire INRAE) a vu le jour. Ce dispositif est un réseau de parcelles distribuées sur six sites en France métropolitaine : Angers (49), Bellegarde (30), Clermont-Ferrand (63), Gotheron (26), Mauguio (34) et Toulenne (33). Ce réseau permet de couvrir des conditions environnementales contrastées et ainsi il contribue à la compréhension et à la prédiction de l'effet du climat sur la biologie de différentes espèces fruitières (abricotier, cerisier, pêcher, pommier) avec cinq variétés représentant la gamme de précocité pour

12. <https://www.obs-saisons.fr/>

13. <https://www.tela-botanica.org/>

chacune de ces quatre espèces. Ce n'est que fin 2016, un an après la fin du projet Perpheclim, que le réseau Tempo a vu le jour. Ce réseau se donne un objectif plus ambitieux : « Comprendre et prédire comment le changement climatique impacte la phénologie des organismes vivants et les conséquences en termes de productivité des systèmes, survie et répartition des populations ». Ainsi, ce réseau fédère l'ensemble des initiatives scientifiques et citoyennes qui s'intéressent à l'observation de la phénologie de l'ensemble du vivant, et pas seulement celle des plantes, en relation avec l'évolution du climat (figure 3.1).

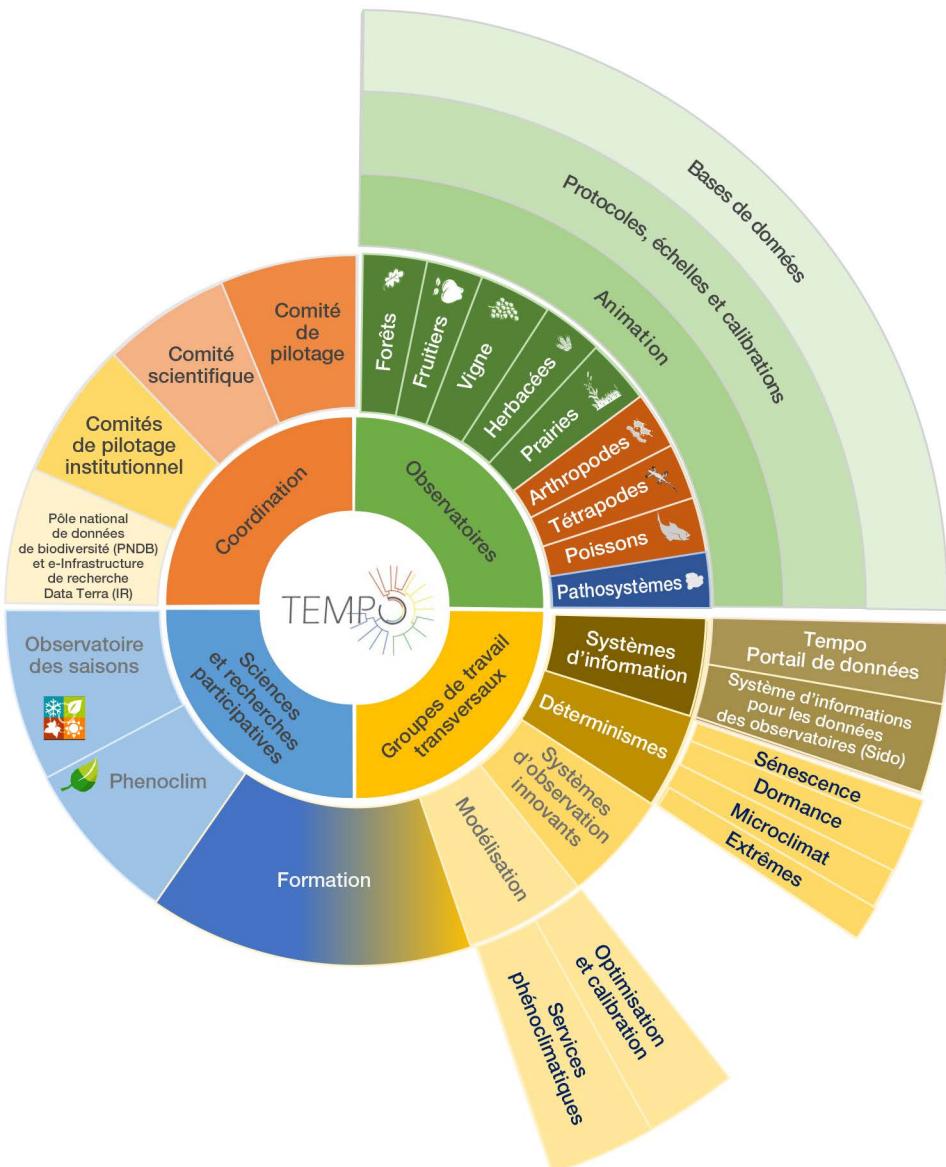


Figure 3.1. Organigramme du fonctionnement du réseau Tempo en 2024.

► Les données d'observation de la phénologie : des indicateurs de l'évolution du climat et de la biodiversité

L'étude de l'évolution du climat passé est contrainte par le manque de disponibilité de données observées des différentes variables décrivant le climat avant les années 1880. Seules quelques stations existent depuis la deuxième moitié du XVII^e siècle : Central England (Royaume-Uni) depuis 1659 et De Bilt (Pays-Bas) depuis 1706, ou Paris depuis 1757. Pour pallier ce déficit et comprendre les évolutions du climat passé, différents « proxys climatiques¹⁴ » ont été développés. Ces proxys (carottes glaciaires, Petit *et al.*, 1999 ; cernes d'arbres, Lavergne *et al.*, 2018, etc.) nous permettent d'accéder à des informations indirectes sur les conditions climatiques du passé. Parmi ce large éventail, la phénologie des plantes et des animaux a été rapidement identifiée comme une source d'information non négligeable pour reconstruire l'évolution du climat (notamment la température) et sa variabilité au cours des derniers siècles. La série la plus importante connue à ce jour est celle des dates de floraison du cerisier au Japon, une série qui est observée et notée depuis le IX^e siècle (Aono et Kazui, 2008). En Europe, plusieurs séries historiques existent comme celle du marronnier d'Inde à Genève qui remonte à 1808 ou les enregistrements climatologiques et phénologiques de la famille Marsham à Norwich, en Angleterre. En France, les dates de vendanges de la vigne ont aussi été relevées depuis plusieurs siècles. Plusieurs études ont permis de les compiler (Chuine *et al.*, 2004 ; Daux *et al.*, 2012 ; Labbé *et al.*, 2019) (figure 3.2) et d'explorer leur intérêt pour reconstruire le climat de la France depuis le XIV^e siècle environ (Chuine *et al.*, 2004 ; Yiou *et al.*, 2012).

La phénologie est aussi un caractère biologique qui permet de décrire la biodiversité et la capacité d'adaptation d'une espèce à un environnement donné. Ainsi, ce trait est décrit comme l'un des principaux facteurs qui expliquent la distribution actuelle des espèces (végétales ou animales) (Chuine, 2010), car si le cycle saisonnier d'une espèce donnée ne peut pas se réaliser (reproduction, floraison, germination, diapause, etc.), elle ne pourra pas s'adapter localement et elle sera donc vouée à disparaître. Au sein d'une même espèce cultivée, il est possible d'observer une très large variabilité de la phénologie différenciant les variétés (cultivars, accessions) et se traduisant par des précocités (ou des tardivités) plus ou moins fortes des différents stades phénologiques. Plusieurs travaux ont été conduits sur la vigne (Parker *et al.*, 2011, 2013 et 2020), lesquels ont permis de classer un très grand nombre de variétés entre elles. Cela est classiquement réalisé en France par le Geves¹⁵ lors de l'évaluation variétale des espèces cultivées en vue de leur inscription au catalogue. Des travaux récents ont montré que l'utilisation de ces différences de précocité entre les variétés d'une même espèce est une stratégie d'adaptation importante face au changement climatique (Morales-Castilla *et al.*, 2020).

Ce travail de récupération de données anciennes se poursuit dans le cadre du réseau Tempo et a permis ainsi de capitaliser de nouvelles séries d'observations (correspondant à plusieurs dizaines de milliers de données) qui seront valorisées dans les prochaines années¹⁶.

14. Un proxy climatique est une caractéristique physique, biologique, géochimique ou sédimentaire conservée qui permet de reconstituer des conditions climatiques du passé (travaux de paléoclimatologie).

15. Geves : groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences.

16. Voir le portail des données de Tempo : <https://tempo.pheno.fr>; et l'entrepot de données de Tempo : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/TEMPO>.

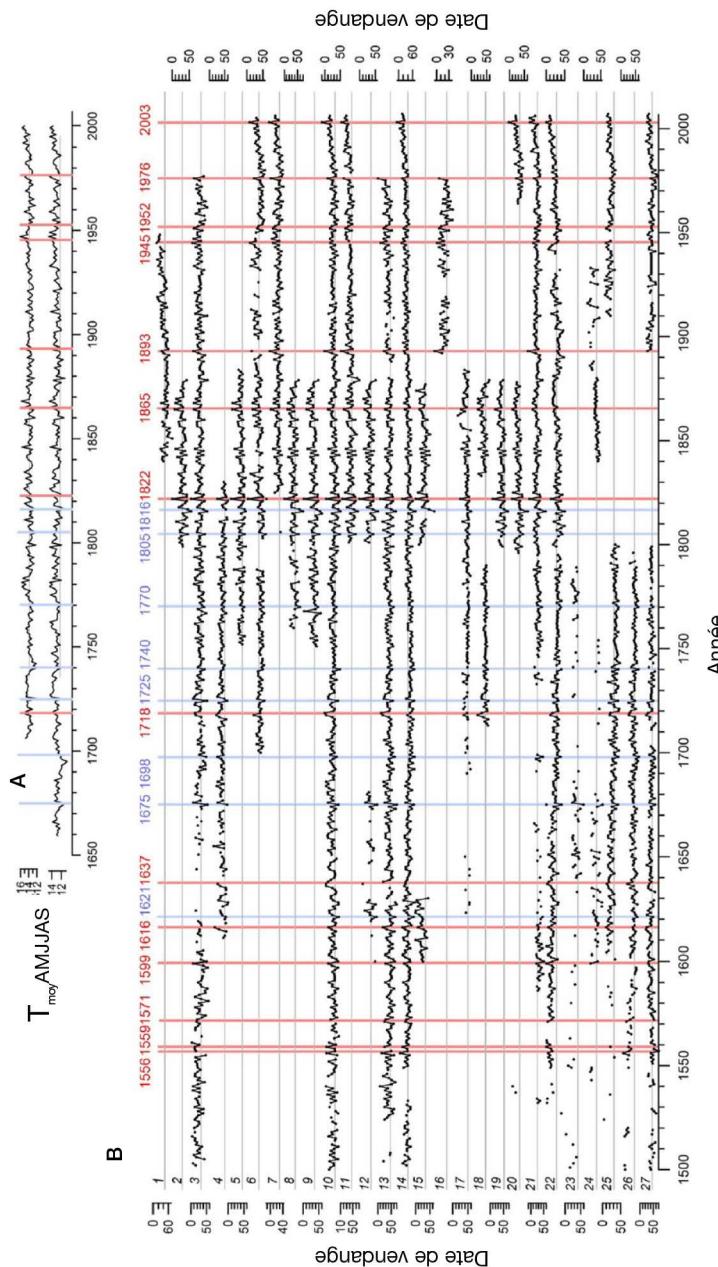


Figure 3.2. Les valeurs des températures moyennes des mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre (Tmoy AMJAS) des stations de De Bilt (Pays-Bas) et au centre de l'Angleterre sont présentées dans la figure 3.2A. Dates de vendanges à partir du 1^{er} septembre entre 1500 et 2007 (figure 3.2B).

Source : Daux *et al.*, 2012.

1 : Luxembourg; 2 : Champagne 1; 3 : île-de-France; 4 : Allemagne; 5 : le nord de la Lorraine; 6 : Alsace; 7 : Champagne 2; 8 : sud de la Lorraine; 9 : Auxerre, Avalon; 10 : Bourgogne; 11 : basse vallée de la Loire; 12 : haute vallée de la Loire; 13 : Jura; 14 : Suisse; 15 : Vendée, Poitou-Charentes; 16 : Beaujolais et Mâconnais; 17 : nord de l'Italie; 18 : Savoie; 19 : Auvergne; 20 : nord de la vallée du Rhône; 21 : Bordeaux; 22 : vallée du Rhône; 23 : Gaillac, Sud-Ouest; 24 : divers dans le sud-est; 25 : Languedoc; 26 : Alpes maritimes; 27 : Espagne. Les barres verticales correspondent aux années avec des températures extrêmement élevées (rouges) et très basses (bleues). Les lignes horizontales correspondent à la valeur moyenne de chaque série.

► La modélisation de la phénologie ou comment représenter simplement un processus complexe

Les liens entre les événements phénologiques et les conditions météorologiques ont été mis en évidence par Réaumur (1735) dès le début du XVIII^e siècle. Parmi les différentes variables météorologiques, la température est celle qui détermine principalement la phénologie d'une espèce dans un lieu donné. D'autres facteurs comme la photopériode (durée du jour), l'état hydrique ou azoté des plantes, ou la conduite de culture (par exemple la profondeur de semis qui influe sur la durée de la levée) jouent un rôle plus ou moins important selon les espèces et les systèmes de culture.

Des modèles mathématiques ont été alors développés à partir de ces observations, formalisant les relations entre observations phénologiques et variables météorologiques, principalement la température. Les différents modèles décrits dans la littérature s'intéressent à l'apparition des principaux stades de développement observés (voir la synthèse proposée par Chuine *et al.*, 2013). Ainsi, pour les plantes, ils simulent le débourrement ou la feuillaison, la floraison, l'elongation de certains organes, la véraison (période de changement de couleur ou de ramollissement du raisin sur la grappe) ou le changement de couleur de certains organes comme les fruits, la sénescence foliaire, ou même des stades précis de la maturité des fruits. Pour les insectes, les modèles estiment principalement le début, le milieu et la fin d'observation de leur présence dans un territoire donné ou leurs dates de migrations (Chuine et Régnière, 2017).

D'autres stades invisibles à l'œil nu sont aussi simulés à partir de ces modèles, comme les états de dormance, de vernalisation ou d'induction florale pour les plantes (ligneuses ou pérennes), ou la diapause pour les insectes. Par ailleurs, dans les climats tempérés, les températures basses (inférieures à 5-10 °C) jouent essentiellement un rôle sur l'état de dormance des espèces pérennes ligneuses et sur la vernalisation des espèces herbacées pendant les périodes automnale et hivernale. D'autre part, les températures élevées modulent la vitesse de développement à la sortie de l'hiver et pendant le printemps et l'été. Ces réponses à la température ont été étudiées expérimentalement puis formalisées dans des modèles. Elles sont représentées par un ensemble de fonctions linéaires ou non linéaires, avec ou sans interaction avec d'autres facteurs (photopériode), d'autres processus (stress, vernalisation, etc.), et selon différents pas de temps (journaliers ou horaires) (figure 3.3).

La plupart de ces modèles mathématiques ont eu comme objectif de formaliser les connaissances acquises expérimentalement. Une grande partie de ces modèles sont mécanistes, basés sur la connaissance de processus écophysiologiques et agronomiques observés ou théoriques (Wenden *et al.*, 2022). Ils cherchent ainsi à décrire formellement les relations de cause à effet, autrement dit l'interaction entre la variable environnementale d'intérêt (ici, la température) et le processus biologique observé (ici, le développement). Plusieurs dizaines de fonctions et de modèles ont été développés à ce jour pour représenter le cycle de développement de nombreuses espèces herbacées ou ligneuses (Chuine *et al.*, 2013). D'autre part, les paramètres de ces modèles sont parfois difficilement mesurables directement. Deux approches sont donc classiquement utilisées afin d'obtenir les valeurs de ces paramètres : l'approche expérimentale qui tente de représenter la réponse de la plante à la température (ainsi qu'à d'autres variables d'intérêt), ou l'approche numérique *via* l'optimisation de paramètres.

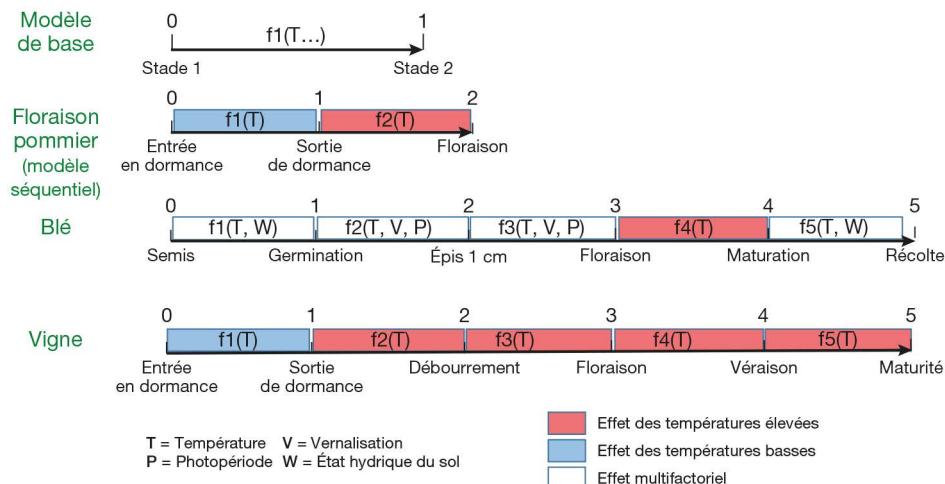


Figure 3.3. Représentation synthétique de différents modèles de phénologie.

Le premier modèle (« Modèle de base ») représente une seule phase phénologique, dont la fonction de réponse à l'environnement est basée exclusivement sur la température, et permet de calculer un stade (« Stade 2 ») en commençant le calcul depuis le stade précédent (« Stade 1 »). Le modèle « Floraison pommier » décrit deux phases phénologiques de façon séquentielle. Chaque phase phénologique dépend d'un type de température (températures basses pour la période de dormance et températures élevées pour la période de postdormance). Le modèle « Blé » décrit le cycle complet de développement du blé en fonction de différentes variables : T, température ; W, état hydrique du sol ; V, vernalisation ; P, photopériode. Enfin, le modèle « Vigne » décrit aussi le cycle complet de développement de cette culture (cinq phases) en prenant en compte les différents types de températures (Chuine *et al.*, 2013).

L'accessibilité croissante à de nouvelles bases de données d'observation de la phénologie a permis un développement très important de ces modèles. Le programme informatique Phenological Modelling Platform (Chuine *et al.*, 2013) permet ainsi d'optimiser les paramètres de différentes fonctions représentant une ou plusieurs phases de développement d'une espèce. De nouveaux algorithmes d'optimisation sont en cours de développement afin de gagner en précision et robustesse. Néanmoins, une approche combinant l'expérimentation et les algorithmes d'optimisation semble la meilleure solution pour rendre compte de la complexité des processus et améliorer leur représentation (Hanninen *et al.*, 2019).

Comme nous le verrons par la suite, l'utilisation de ces modèles de phénologie dans les études d'impact ouvre de nouvelles perspectives pour mieux caractériser les effets du changement climatique sur la localisation des cultures et le niveau des productions agricoles.

► Les indicateurs agroclimatiques : des informations synthétiques pour caractériser les impacts du changement climatique

Les indicateurs agroclimatiques ont été largement utilisés pour évaluer les effets du climat sur les cultures d'une zone donnée et pour fournir des informations aux agriculteurs, gestionnaires, conseillers ou sélectionneurs quant aux meilleures stratégies

à mettre en place pour améliorer les potentialités agricoles d'une exploitation ou d'un territoire. Ces indicateurs résument de manière synthétique les conditions météorologiques subies au cours d'une période donnée, et renseignent sur les conditions climatiques lorsqu'ils sont étudiés sur de longues périodes (au minimum 20-30 ans). Ces indicateurs sont calculés sur des périodes calendaires, par exemple le nombre de jours de gel en janvier ou la quantité de précipitations cumulées pendant l'année. Non seulement ces informations synthétiques caractérisent les conditions climatiques d'une région donnée, mais elles permettent également la comparaison entre différentes régions et l'identification des principaux risques existants (gel, sécheresse). Ces informations dérivées de variables météorologiques sont alors susceptibles d'informer sur la faisabilité climatique des cultures dans chaque territoire. La faisabilité climatique d'une culture (ou d'une variété) peut être définie comme la combinaison des conditions climatiques permettant d'assurer le cycle complet de son développement et un certain niveau de production et de qualité. Cela permet de définir l'aire de culture d'une production donnée (Caubel *et al.*, 2015).

Comme décrit par Caubel *et al.* (2015), depuis le début des années 2000, plusieurs études ont utilisé ces indicateurs pour évaluer les effets du climat sur la productivité et la gestion des cultures dans différentes régions agricoles du monde (voir notamment Trnka *et al.*, 2011 pour l'évolution des événements extrêmes en Europe) et pour étudier les changements déjà observés dans la répartition des espèces à des échelles très larges. Ainsi, Santos *et al.* (2012) montrent l'évolution des potentialités de la viticulture en Europe. L'intérêt de ces indicateurs réside dans leur simplicité leur permettant d'être utilisés à de grandes échelles, car ils nécessitent très peu d'informations et de variables (souvent uniquement la température et la pluviométrie à un pas de temps journalier ou mensuel). Certaines études ont aussi proposé de combiner plusieurs indicateurs (par exemple un indicateur décrivant les conditions thermiques avec un indicateur décrivant les conditions hydriques) pour apporter une information intégrée de la faisabilité climatique d'une culture ou d'un territoire (Brown *et al.*, 2008 ; Malheiro *et al.*, 2010 ; Tuan *et al.*, 2011 ; Holzkämper *et al.*, 2013). La majorité de ces travaux s'est attachée à caractériser les évolutions déjà observées, mais aussi les évolutions potentielles futures, calculées à partir des projections climatiques issues des scénarios d'émission proposés par le Giec.

En France, ces travaux se sont focalisés dans un premier temps sur la viticulture (Seguin et García de Cortázar-Atauri, 2004) en utilisant l'indice héliothermique d'Huglin afin de mettre en lumière l'évolution climatique (notamment les conditions thermiques) des différents vignobles. À la suite de la canicule de 2003, la question des conséquences agricoles d'événements climatiques de grande ampleur a été posée. Pour y répondre, INRAE (par l'intermédiaire de son unité de service AgroClim) a proposé de mettre en place un outil de suivi, la Veille AgroClimatique (VAC) (Huard *et al.*, 2005) qui s'appuyait sur les données du réseau agroclimatologique de l'institut et des simulations réalisées à partir du modèle de culture Stics (Beaudoin *et al.*, 2023). Cette approche purement climatique permettait un suivi de l'évolution de la croissance et du développement de plusieurs cultures en prenant en compte la variabilité climatique sur dix-huit sites en France. Plusieurs types d'indicateurs ont été proposés décrivant les conditions agroclimatiques et agronomiques de huit cultures : la somme de températures depuis une date de semis pour les cultures d'hiver (le 1^{er} octobre) et de printemps (le 1^{er} avril) ; le nombre de jours de gel ; le nombre de jours échaudants

(température maximale supérieure à 25 °C), etc. Cette Veille AgroClimatique a subi plusieurs transformations en parallèle de l'évolution des outils informatiques et de l'accès à des données climatiques spatialisées, jusqu'à donner lieu à un nouveau service en 2019, AgroMetInfo¹⁷. Ce service développé par INRAE et Météo-France fournit en temps quasi réel une représentation spatialisée à partir de la réanalyse Safran (Vidal *et al.*, 2010) de vingt-cinq indicateurs agroclimatiques, de leur état au cours des trente dernières années ainsi que de leur anomalie moyenne ou par rapport à une année historique de référence. Le même type d'analyse est fourni pour des indicateurs de suivi des cultures (blé et maïs) à partir du modèle de culture Stics, et une projection des résultats en fin de saison agricole est calculée sur la base d'une approche fréquentielle (on termine l'année en cours avec le climat observé des trente dernières années).

Par la suite, le projet ANR Oracle (2011-2014) a eu comme objectif de prévoir les opportunités et les risques pour les agroécosystèmes et les forêts, en réponse aux changements climatiques, socio-économiques et politiques en France. Ce projet a permis de définir et d'élaborer une bibliothèque d'indicateurs climatiques à partir d'une analyse exhaustive de la bibliographie et ainsi d'identifier plus de 90 indicateurs qui ont été intégrés dans un outil générique (GETARI) permettant leur calcul et leur combinaison (García de Cortázar-Atauri et Maury, 2019). C'est dans le cadre de ce projet que le développement d'indicateurs écoclimatiques a été formalisé et développé de manière générique pour différentes cultures et pour caractériser les impacts du changement climatique sur la faisabilité climatique des agroécosystèmes.

► Les indicateurs écoclimatiques : mieux prendre en compte la phénologie pour caractériser les impacts

Contrairement aux indicateurs agroclimatiques, calculés sur des périodes calendaires, les indicateurs écoclimatiques sont calculés en se basant sur des stades phénologiques (observés ou simulés à partir d'un modèle) de l'espèce d'intérêt. Le positionnement calendaire des phases, mais aussi leur durée, peuvent donc varier d'une année à l'autre. Cette méthode précise mieux les effets du climat sur la croissance et sur le développement des cultures, puisqu'elle synchronise la phase de calcul de l'indicateur avec la phase sensible de la plante (figures 3.4 et 3.5).

Caubel *et al.* (2015) ont proposé de tester les indicateurs écoclimatiques en utilisant la méthode développée par Holzkämper *et al.* (2011 et 2013) dans laquelle ces indicateurs sont normalisés et agrégés à partir d'informations issues de la littérature, de l'expertise ou de données expérimentales. La pertinence et la générnicité de la méthode ont ainsi été testées sur trois évolutions significatives au cours des dernières décennies : (1) pour tester la faisabilité climatique de la production du maïs dans deux régions de France (Midi-Pyrénées et Alsace) ; (2) pour évaluer la faisabilité climatique de plusieurs pratiques agronomiques sur blé (dates de semis et de récolte, et dates d'application des traitements phytosanitaires) ; et (3) pour déterminer les conditions climatiques pour la maturité de la vigne en Bourgogne. Par ailleurs, cette méthodologie permet d'identifier les variables qui ont joué un rôle important dans ces évolutions (voir figures 6 et 9, dans Caubel *et al.*, 2015).

17. <https://www.agrometinfo.fr/>

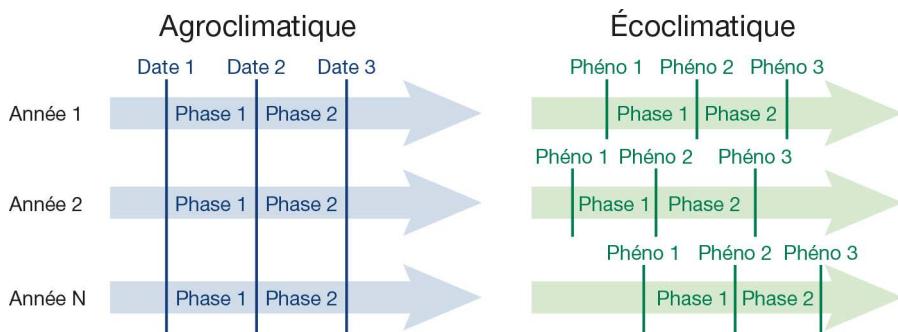


Figure 3.4. Schéma conceptuel d'un indicateur agroclimatique (à gauche) et d'un indicateur écoclimatique (à droite). Source : d'après P. Bertuzzi (INRAE).

Les indicateurs agroclimatiques décrivent une phase en utilisant deux dates calendaires (par exemple les 1^{er} et 31 janvier).

Par la suite, cette méthode a été mobilisée pour étudier les impacts du climat futur et pour explorer différentes stratégies d'adaptation des cultures. Par exemple, Caubel *et al.* (2018) ont appliqué la méthode dans deux régions françaises climatiquement contrastées, l'Île-de-France et la région Midi-Pyrénées, en prenant en compte deux variétés de maïs aux précocités distinctes. Les résultats de cette étude révèlent que, indépendamment du scénario, du modèle climatique ou de la variété, le maïs sera certainement semé de plus en plus tôt, notamment en Midi-Pyrénées. La hausse des températures à venir sera *a priori* plus favorable aux variétés tardives et les agriculteurs franciliens pourront cultiver des variétés avec une large gamme de longueurs de cycle de culture. Cependant, les stress thermiques et hydriques augmenteront dans les deux régions entre la floraison et la maturité, quels que soient la date de semis et le scénario d'émissions¹⁸, limitant ainsi la possibilité d'atteindre les rendements potentiels. En Midi-Pyrénées, il faudra trouver des compromis entre des semis précoces pour minimiser certains stress ultérieurs et des risques accrus de gel tardif lors de la levée, qui n'existent pas actuellement (Caubel *et al.*, 2018; Sgubin, 2018; Vautard *et al.*, 2023). Ce travail a confirmé les résultats d'autres études (Trnka *et al.*, 2011; Le Roux *et al.*, 2024) quant à l'importance du choix variétal (cycle court ou long) et de la date de semis comme leviers d'adaptation (voir chapitre 11).

Ce type d'approche a été testé en France sur d'autres espèces, comme le blé (Gouache *et al.*, 2015; Le Roux *et al.*, 2024) et la vigne. Par exemple, dans le cadre du projet Laccave (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2018; Ollat et Touzard, 2024), une étude a permis d'évaluer l'évolution de la faisabilité climatique des différents vignobles de France. Les principaux résultats de ce travail montrent : (1) une avancée généralisée de tous les stades de développement (débourrement, floraison, véraison); (2) une augmentation significative et généralisée des températures diurnes et nocturnes en particulier pendant la période de maturité; (3) des situations contrastées au regard de la contrainte hydrique, mais avec une importante dégradation dans les vignobles méditerranéens. L'intensité de

18. Dans ce travail, les auteurs avaient exploré les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios), A1B (scénario moyen), B1 (scénario à faibles émissions) et A2 (scénario à fortes émissions) du 4^e rapport du Giec paru en 2007.

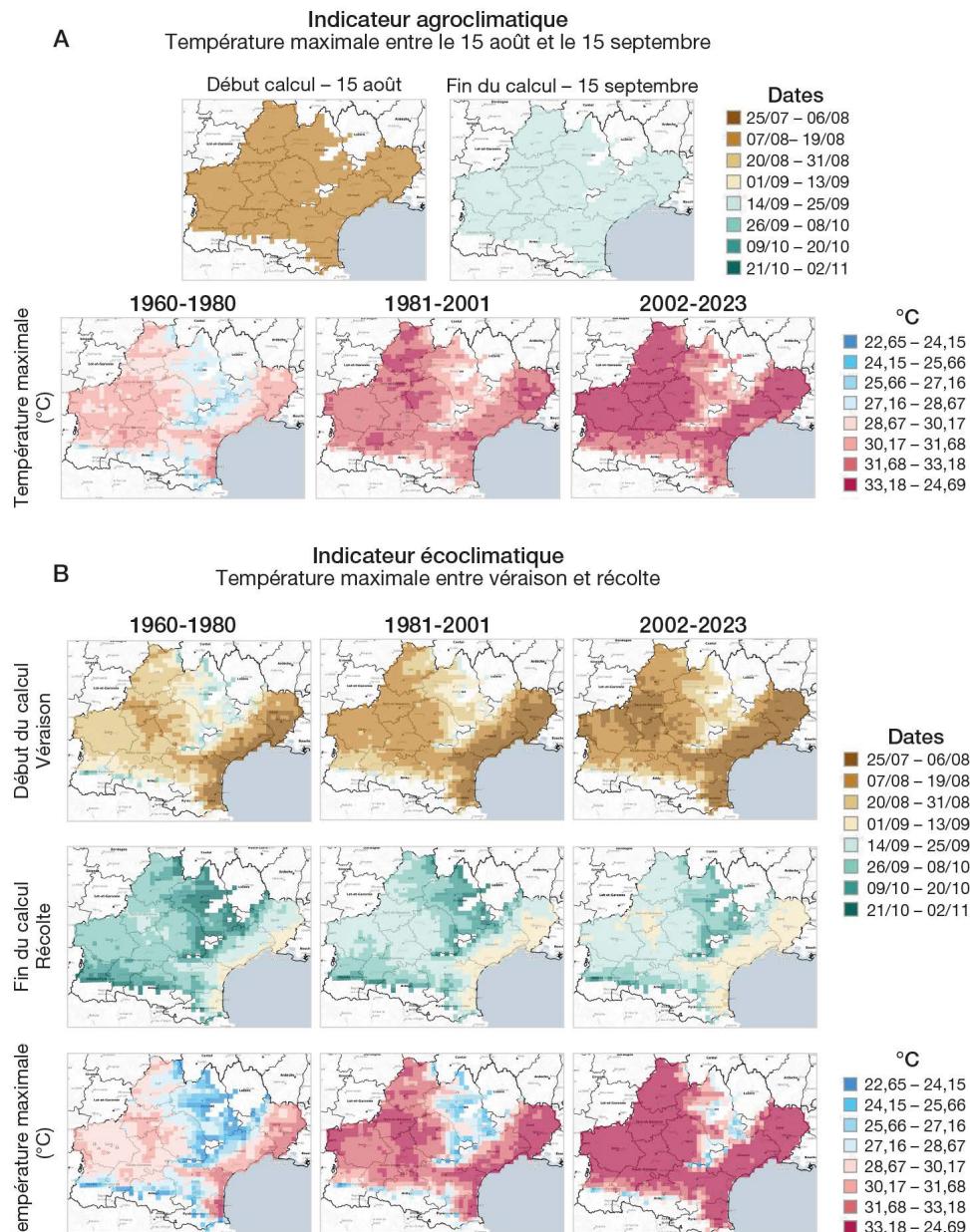


Figure 3.5. Différences entre les indicateurs agroclimatiques et écoclimatiques.

La figure 3.5A montre les résultats obtenus en calculant l'indicateur de température maximale pendant une période fixe (du 15 août au 15 septembre) pendant trois périodes (1960-1980, 1981-2001, 2002-2023). La figure 3.5B montre les résultats obtenus en calculant l'indicateur de température maximale pendant la phase de véraison et de récolte pendant les mêmes périodes (1960-1980, 1981-2001, 2002-2023). Nous observons que, dans ce dernier cas, les dates de véraison et de récolte ont avancé d'environ quinze jours au cours du temps et avec une certaine distribution spatiale. Cela a un effet direct dans le calcul de l'indicateur de température maximale qui montre une augmentation plus importante que l'indicateur agroclimatique, tout en gardant une distribution spatiale plus réaliste.

ces impacts potentiels dépend par ailleurs de l'horizon temporel choisi (2050 ou 2100), mais aussi du scénario d'émissions retenu (RCP), notamment après 2050.

D'autres analyses ont été réalisées à une échelle plus régionale, comme celle de Marjou et García de Cortázar-Atauri (2019) dans le vignoble du Ventoux. Comme dans les autres vignobles, la phénologie a suivi la même tendance d'avancement, plus ou moins importante selon les secteurs. Ces changements ont eu pour conséquence une évolution significative des conditions climatiques (forte augmentation des températures et légère augmentation du déficit hydrique) dans la plupart des secteurs de l'appellation pendant le cycle de croissance et la phase de maturation des baies de raisin. À l'avenir, l'évolution de la phénologie et des conditions climatiques sera très différente selon le scénario socio-économique retenu (figure 3.6). Ces résultats ont soulevé de nouvelles questions concernant l'organisation spatiale actuelle de l'appellation, mais aussi l'évolution de certains secteurs proches du vignoble actuel pouvant devenir de nouvelles aires de production pour l'appellation dans le futur. Pour cela, Huard (2021) a proposé une analyse des impacts potentiels (risques de gel et de canicule) à une résolution spatiale plus fine. L'ensemble de ces données est actuellement exploité par l'Organisation de défense et de gestion (ODG) du Ventoux pour explorer différents scénarios d'évolution et d'adaptation de ce vignoble¹⁹.

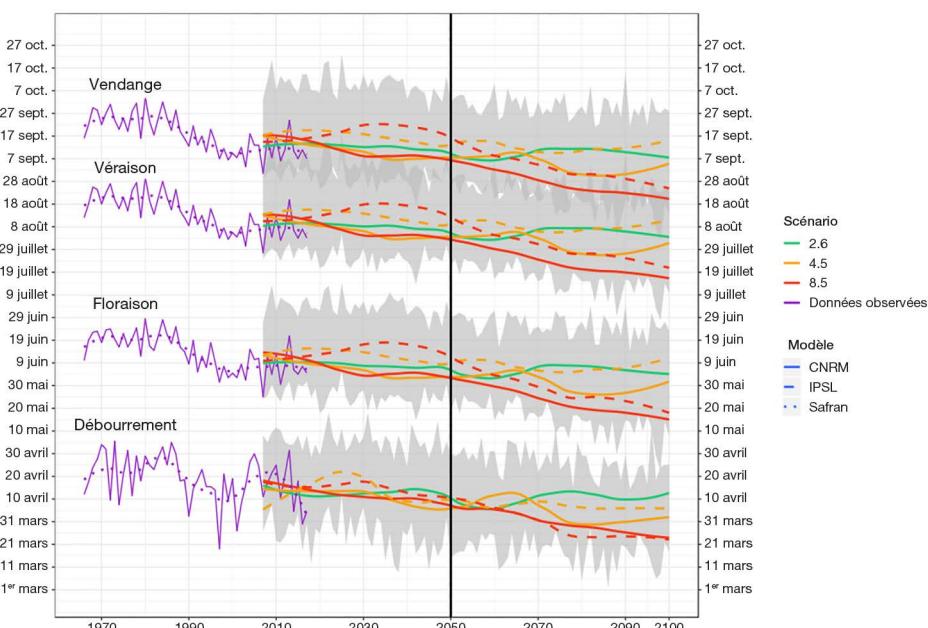


Figure 3.6. Évolution médiane de différents stades phénologiques et de la date de vendange (véraison +35 jours) pour le cépage syrah du vignoble du Ventoux en utilisant différents modèles climatiques et scénarios RCP.

Les couleurs représentent les différentes séries de données utilisées : données observées (violet), ou simulées (vert : scénario RCP2.6, orange : scénario RCP4.5, rouge : scénario RCP8.5). Les différents traits représentent les sources de données. Enfin, la zone grisée représente la variabilité calculée entre le 1^{er} et le 9^e décile pour l'ensemble des situations.

19. <https://aoc-ventoux.com/cartographie/>

Récemment, Le Roux *et al.* (2023) ont exploré l'évolution des conditions de production du vignoble de l'appellation Luberon, en intégrant un plus grand nombre de résultats de simulations issus de différents modèles climatiques afin de mieux représenter les incertitudes. Ce travail a confirmé la plupart des résultats déjà obtenus dans l'appellation d'origine contrôlée (AOC) Ventoux : (1) les températures devraient poursuivre leur hausse, accompagnées d'une augmentation notable du nombre de jours chauds et des périodes de canicule; (2) malgré ces évolutions, le risque de gel persistera; (3) la tendance à la baisse des précipitations entraînera un déficit hydrique accru qui va poser des défis pour la gestion de la ressource hydrique sur le territoire. L'impact de ces changements sera très dépendant de la précocité des cépages, et ces résultats confirment l'importance d'utiliser la diversité variétale (ici la vigne) comme stratégie d'adaptation au changement climatique. Néanmoins, la variabilité climatique inter et intra-annuelle et à l'échelle du territoire de l'appellation reste aussi très importante et une analyse sur un plus grand ensemble de modèles climatiques et avec une résolution plus fine semble nécessaire pour mieux comprendre les tendances et les variations possibles.

Enfin, l'ensemble de ces changements va se poursuivre au minimum jusqu'à l'année 2050. Au-delà, les modifications du climat pourraient être trop importantes face aux capacités d'adaptation envisageables dans certains secteurs.

► Quelques exemples de services construits à l'aide des indicateurs agroclimatiques et écoclimatiques

Au cours de ces dix dernières années, plusieurs outils ont vu le jour en France à la suite des travaux de recherche précédents. Parmi eux, nous avons mentionné plus haut le logiciel GETARI (Generic Evaluation Tool of AgRoclimatic Indicators) (García de Cortázar-Atauri et Maury, 2019) qui a permis de formaliser la méthodologie développée par Caubel *et al.* (2015) pour caractériser la faisabilité climatique d'une culture dans un lieu donné. Tout d'abord, GETARI intègre une importante librairie d'indicateurs journaliers (plus de 90) et horaires (presque une cinquantaine) qui s'enrichit au cours du temps. Ces indicateurs sont simples (par exemple le nombre de jours de gel ou la somme de pluies), complexes (comme le calcul des vagues de chaleur) ou issus de travaux de recherche spécifiques (comme le THI, ou l'indice hygrothermique utilisé pour évaluer le confort thermique des animaux, voir chapitre 9). Les seuils de ces indicateurs (par exemple le seuil de la température maximale produisant un effet néfaste sur une plante) peuvent être modifiés par l'utilisateur. Ensuite, GETARI permet de normaliser et d'agréger ces indicateurs *via* une interface afin d'obtenir une valeur globale de la faisabilité d'une culture. Depuis 2020, INRAE s'est doté de la chaîne de calcul Season (Maury *et al.*, 2021) qui lui permet de calculer des indicateurs agroclimatiques et écoclimatiques en utilisant des jeux de données climatiques, un bilan hydrique et des modèles phénologiques adaptés à différentes espèces cultivées (blé, maïs, pomme de terre et vigne) (encadré 3.1). Tous ces outils servent de base pour le développement de la nouvelle version de la plateforme AgroMetInfo décrite précédemment.

En parallèle de ces outils, les conseillers des chambres d'agriculture se sont aussi approprié ces méthodes depuis 2015 *via* les outils développés dans le cadre des réseaux

Oracle²⁰ et ClimA-XXI²¹ (Hannin *et al.*, 2024). Ces outils permettent aux agriculteurs et à leurs conseillers de prendre la mesure des évolutions climatiques et de tester la faisabilité des principales productions agricoles dans leur territoire. Les données qui en sont issues sont également mobilisées dans le cadre de formations ou lors de séances de sensibilisation et d'information concernant les risques climatiques et la vulnérabilité des exploitations ou des filières au sein des territoires concernés. Les résultats de ces travaux sont mis à la disposition des agriculteurs et des décideurs de chaque département ou région.

Enfin, depuis 2023, le portail Canari-France, désormais Climadiag Agriculture²² (Solagro et Météo-France), donne accès en ligne à un ensemble d'indicateurs agro-climatiques calculés pour représenter les impacts sur plusieurs types de cultures (cultures d'hiver et de printemps, vigne) ainsi que le confort thermique des animaux d'élevage. Les indicateurs sont calculés sur l'ensemble de la France métropolitaine jusqu'à la fin du siècle à partir de l'ensemble de données climatiques projetées de la base Drias-2020²³.

D'autres outils et services climatiques sont en cours de développement dans le cadre de plusieurs projets régionaux et nationaux afin de fournir les informations nécessaires pour établir les risques et les opportunités pour chaque culture et ainsi de définir les stratégies d'adaptation pour chaque filière et chaque territoire.

Enfin, le réseau mixte technologique ClimA²⁴, porté par les chambres d'agriculture en France et coanimé avec Arvalis, a pour objectif d'accélérer la conduite et le transfert des travaux de recherche et développement sur l'adaptation des exploitations agricoles au changement climatique. Dans ce cadre, une action de recensement, de diffusion et de mise en cohérence des systèmes d'information et des outils existants permet d'échanger sur les différents dispositifs de calcul d'indicateurs agro et écoclimatiques pour les améliorer afin de couvrir au mieux les besoins des acteurs.

Encadré 3.1. Évolution de l'exposition des cultures aux risques climatiques en France en prenant en compte l'évolution de la phénologie ainsi que les points de rupture

*Renan Le Roux, Maël Aubry, Carina Furusho-Percot,
Iñaki García de Cortázar-Atauri, Marie Launay*

Le Roux *et al.* (2024) ont proposé récemment une nouvelle méthode de classification spatiale des risques agroclimatiques pour le blé, en couplant des données de projections climatiques à haute résolution avec un modèle phénologique du blé. Cette classification a été mise en œuvre pour le blé tendre français avec trois couples de modèles GCM-RCM et deux scénarios d'émissions (figure 3.7). La méthode proposée fournit un niveau d'information qui permet d'élaborer des stratégies d'adaptation régionales : la nature du risque, son occurrence temporelle et spatiale,

20. Observatoire régional sur l'agriculture et le changement climatique.

21. Climat et agriculture au xxie siècle.

22. <https://climadiag-agriculture.fr/>

23. <https://www.drias-climat.fr/>

24. Le réseau mixte technologique ClimA : <https://rmt-clima.fr/>

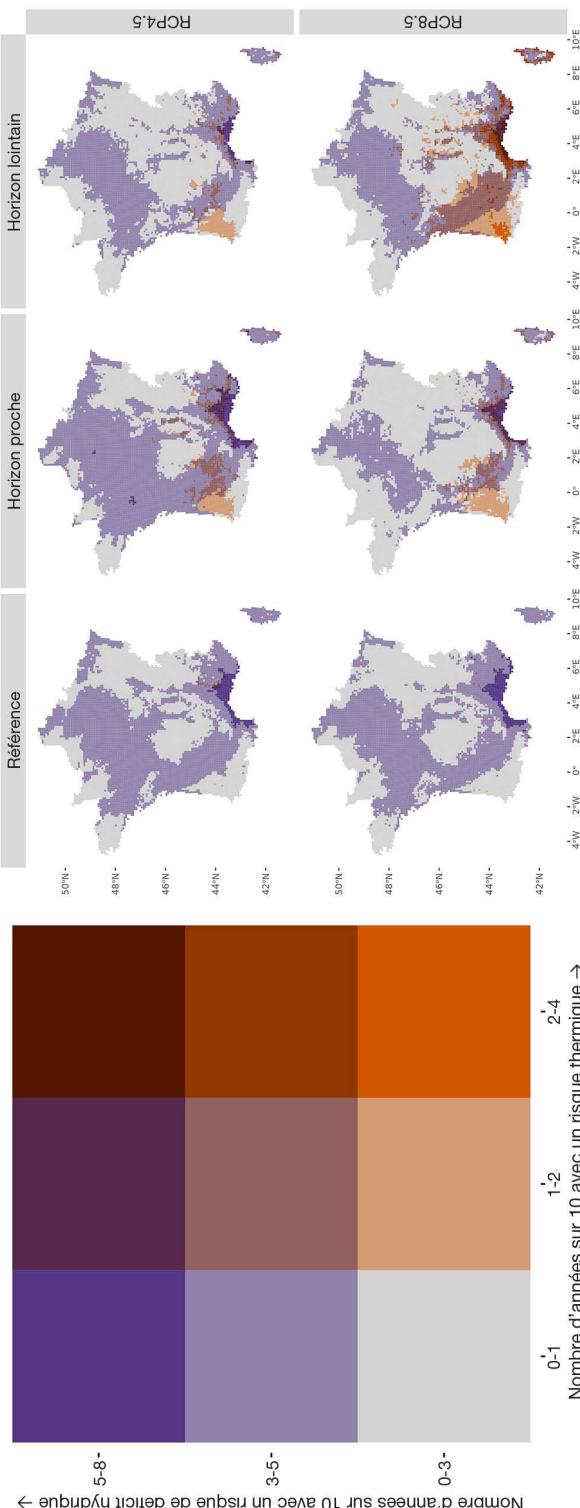


Figure 3.7. Cartes des risques de déficit hydrique et de stress thermique pour différentes périodes : référence (1991-2020), futur proche (2041-2070) et futur lointain (2071-2100). Source : figure adaptée de Le Roux *et al.* (2024).

Chaque cellule de la légende correspond à une classe de risque de déficit hydrique ou de stress thermique définie par le nombre d'années de déficit de chaleur ou d'eau sur une période de dix ans. Les cartes correspondent au risque médian de l'ensemble des modèles pour RCP4.5 (en haut) et RCP8.5 (en bas).

Encadré 3.1. (suite)

et sa combinaison potentielle avec d'autres risques. Les résultats montrent que la précocité des stades phénologiques permettra au blé d'éviter les périodes de déficit hydrique estivales dans un avenir proche. Néanmoins, à plus long terme, l'émergence du stress thermique et l'augmentation du déficit hydrique vont détériorer les conditions de culture du blé sur le territoire français. Les projections montrent l'apparition de risques combinés de chaleur et de déficit hydrique jusqu'à quatre ans par décennie dans le cadre du scénario RCP8.5. Il s'agit d'une première étape pour aider à identifier d'une part, les meilleures variétés (en matière de précocité, mais aussi de résistance à certains événements climatiques) adaptées à chaque territoire, mais aussi des sites représentatifs de certaines conditions climatiques en vue de mettre en place des programmes de sélection variétale.

D'autre part, l'unité AgroClim explore une nouvelle méthodologie appelée « compte à rebours », qui permettrait de cartographier les points de rupture quant à la faisabilité climatique des productions végétales. Tandis que la majorité des études préalables prédéfinissent des horizons fixes (2050, 2070, 2100) ou des niveaux de réchauffement pour identifier les impacts cumulés attendus, cette méthode propose d'estimer le temps restant avant chacun des principaux impacts climatiques nuisant à chaque filière de production. L'étude de cette dynamique permettra de mettre en évidence des points de rupture rédhibitoires pour la poursuite de la culture du blé et du maïs dans les bassins de production traditionnels. Cette méthode permettra aussi de mieux prendre en compte les incertitudes des modèles climatiques et des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs approches statistiques, comme la TCIE (Time of Climate Impact Emergence; Jägermeyr *et al.*, 2021) et l'analyse fréquentielle en contexte non stationnaire (Renard, 2008), seront testées. Cette approche facilitera l'établissement des priorités et la planification des leviers d'adaptation par les décideurs.

► Conclusion

L'étude des impacts du changement climatique a progressé très rapidement ces dernières années ainsi que les questions de recherche associées. Au début, les études se sont surtout intéressées à l'impact du changement climatique sur la production de certaines espèces (blé, maïs, vigne, etc.), alors qu'actuellement les questions se structurent davantage sur les territoires, les filières et les systèmes de production dans leur complexité.

Ce chapitre a fait la synthèse de l'évolution des connaissances dans deux domaines distincts de la science, la phénologie et l'agroclimatologie, pour converger vers des méthodes et des outils plus puissants et précis pour caractériser la faisabilité climatique des cultures. Néanmoins, il reste encore beaucoup de travail à accomplir pour caractériser les impacts et pour accompagner la mise en place de nouvelles politiques d'adaptation et d'atténuation dans un cadre de transition agroécologique. Comme nous avons pu le constater, la plupart des études se sont concentrées sur un groupe d'espèces très restreint : blé, maïs et vigne. Ces résultats ne permettent pas de caractériser la richesse et la diversité du système agricole français. Ainsi, apprécier la faisabilité climatique à court et moyen terme d'espèces (légumineuses, cultures intermédiaires, prairies, cultures exotiques) et de systèmes (par exemple le maraîchage) moins étudiés participe à l'évaluation de la diversification comme levier d'adaptation au changement climatique.

Dans ce contexte, l'évolution de l'informatique et le développement des bases de données, notamment ouvertes, devraient nous permettre de mieux représenter les différentes phases de développement de dizaines d'espèces cultivées. Ces nouvelles masses de données vont nous permettre aussi d'améliorer les simulations des stades phénologiques grâce à de nouveaux algorithmes d'optimisation. Néanmoins, nous avons encore besoin d'approfondir la compréhension de processus clés du développement chez certaines espèces. Cela est notamment le cas pour la phase de dormance des espèces ligneuses (arbres fruitiers ou vigne). Cette phase reste encore assez méconnue malgré les avancées scientifiques notables sur la caractérisation de ses déterminismes génétiques et physiologiques. Cela empêche d'obtenir des simulations robustes des stades clés pour la production comme la floraison (Chuine *et al.*, 2016; Wenden *et al.*, 2022) avec des conséquences pour l'appréciation des dommages liés au gel (Sgubin *et al.*, 2018; Vautard *et al.*, 2023).

Néanmoins, plusieurs enjeux méthodologiques ont été identifiés et doivent être traités à court et moyen terme pour améliorer l'appropriation et l'utilisation de ces résultats :

- il est encore parfois difficile de caractériser précisément l'impact du climat sur certaines variables comme le rendement, la pression sanitaire ou la qualité de la production (Cabel *et al.*, 2015). La plupart des travaux arrivent à bien représenter les effets du climat, notamment dans les situations de crises et de fortes pertes (Ben Ari *et al.*, 2018), mais cet effet est plus difficile à discerner dans des évolutions tendancielles moyennes. La combinaison avec d'autres outils comme les modèles de culture devient donc envisageable pour séparer les effets du climat de ceux liés aux pratiques agronomiques. Ce point sera abordé plus loin dans les chapitres 6 et 7;
- il est nécessaire de bien caractériser la qualité des données climatiques utilisées. Dans ce contexte, l'évaluation des incertitudes associées à ces données, mais aussi aux résultats produits à partir de ces données, devient capitale pour bien informer les utilisateurs. De nombreux travaux méthodologiques pour caractériser les incertitudes et les biais de ces données sont en cours (Allard *et al.*, 2023) et devraient permettre dans les années à venir de se doter de données climatiques à des échelles de plus en plus fines et robustes d'un point de vue spatial et temporel;
- il est nécessaire de mieux décrire les événements extrêmes (gel, canicule, sécheresse), mais aussi leurs impacts sur la production et sur la qualité des récoltes. Leur caractère aléatoire (dans l'espace et dans le temps), l'augmentation de leur récurrence et leur combinaison pendant le cycle de culture induisent une augmentation de la vulnérabilité des cultures dans chaque territoire.

Pour toutes ces raisons, un enjeu très important pour les années à venir sera de se doter de nouvelles bases de données (spatiales, temporelles et multiespèces) permettant de mieux évaluer et d'améliorer ces méthodes au-delà des seules variables phénologiques.

Afin d'aider les différents acteurs qui travaillent sur l'adaptation de l'agriculture, plusieurs services climatiques se sont développés depuis quelques années et d'autres verront le jour dans les années à venir (encadré 3.2). L'enjeu important pour les outils sous-jacents sera de bien restituer les informations nécessaires pour la définition des stratégies d'adaptation, tout en rendant compte des incertitudes associées aux données et aux méthodes. Le développement des approches pluridisciplinaires et participatives pour la coconstruction de ces services devrait améliorer et accélérer l'appropriation et l'utilisation de ces résultats à l'avenir.

Encadré 3.2. Quel est l'apport de la télédétection à la compréhension des agroécosystèmes dans un contexte de climat changeant ?

Iñaki García de Cortázar-Atauri, Éric Ceschia, Dominique Courault

La télédétection (*remote sensing*, en anglais) décrit l'ensemble des techniques qui sont utilisées depuis plus de cinquante ans pour acquérir à distance les données permettant de décrire les propriétés physiques de différents objets naturels ou artificiels à partir de leur rayonnement dans diverses longueurs d'onde. Cette discipline a des applications variées dans de nombreux domaines et en particulier pour l'étude et la gestion des sols, des ressources en eau, des forêts et des agroécosystèmes.

La télédétection permet de décrire et de suivre temporellement et spatialement certaines propriétés du sol en surface, comme les teneurs en carbone organique, en argile (y compris les argiles gonflantes), en fer, en carbonate de calcium et en sel. Ces techniques permettent aussi de surveiller des changements dus aux activités humaines (impact des pratiques agricoles sur la surface du sol, albédo, imperméabilisation du sol ou salinisation), l'évolution de l'occupation du sol et des pratiques agricoles (comme les dates de travail du sol, de semis ou de récolte), et de détecter les zones irriguées. Enfin, ces données peuvent aussi nous renseigner sur l'impact de l'urbanisation et du drainage agricole sur les sols. Une partie de ces informations (les données des propriétés du sol) sont actuellement intégrées dans le programme GlobalSoilMap qui offre des images détaillées des propriétés du sol sur une grille à haute résolution (90 × 90 m). Ces données combinées avec des modèles numériques de sol (DSM) permettent en outre de mieux estimer des propriétés profondes du sol ainsi que la réserve utile (la quantité d'eau qui est disponible pour les plantes).

La télédétection est également essentielle pour l'analyse et le suivi des agroécosystèmes. Elle permet de caractériser et de cartographier les systèmes de cultures et les prairies à l'échelle de la parcelle, voire en infraparcellaire, de fournir des indicateurs agronomiques (utiles pour estimer le rendement, la biomasse, les besoins en irrigation, etc.) et des indicateurs environnementaux (flux et bilans d'eau, de carbone, d'azote, de gaz à effet de serre ou d'énergie). Beaucoup de ces informations vont contribuer à mieux quantifier la part des émissions des agroécosystèmes. Les travaux de recherche se concentrent sur l'amélioration des modèles de production et de gestion des ressources, tout en prenant en compte les pratiques agricoles et les effets des changements climatiques. Dans ce contexte, la télédétection a été combinée depuis de nombreuses années avec des modèles sol-plante-atmosphère (SVAT) afin d'estimer les besoins en eau des cultures. La combinaison des données spatialisées sur l'occupation des surfaces, la possibilité d'identifier (*via* la télédétection ou avec des modèles) des stades clés du développement des plantes (leur phénologie), et l'accès à une bonne description des propriétés physiques du sol permettent d'améliorer les pratiques d'irrigation, notamment dans un contexte de raréfaction ou d'accès limité à la ressource. Les prochaines missions thermiques à venir telles que Trishna (lancement prévu en 2026), LSM ou encore EarthDaily (en 2025) devraient apporter des données à haute résolution temporelle pour cartographier l'évapotranspiration. Les satellites à haute résolution spatiale, comme Sentinel 1 et 2, ont permis de proposer de nouvelles méthodes pour cartographier l'humidité du sol à 10 cm à l'échelle de la parcelle (ou du pixel de 10 m). La combinaison de différents types de données spectrales (optique, radar et thermique) devrait permettre dans les années à venir d'apporter des informations spatialisées beaucoup plus fiables sur les besoins réels en eau des cultures et sur l'étendue des zones stressées, afin d'aider les gestionnaires de l'eau à distribuer

Encadré 3.2. (suite)

de façon plus optimale les ressources, de l'échelle de l'exploitation à celle du territoire. Néanmoins, des verrous techniques restent encore à être levés concernant la modélisation intégrée du fonctionnement des agroécosystèmes (couplage surface-souterrain et estimation des volumes apportés par l'irrigation). Cela passe par une meilleure prise en compte des effets des composantes biophysiques du forçage radiatif (comme l'albédo) sur les bilans hydriques, mais aussi sur le stockage du carbone et sur les émissions de gaz à effet de serre. Ces données devraient contribuer à terme à mieux décrire la variabilité spatiale (territoriale) des systèmes et leurs contributions aux différents cycles (eau, carbone, azote) afin d'apporter des informations fiables et quantifiables pour la caractérisation d'impacts et la définition des stratégies d'adaptation et d'atténuation.

Les forêts bénéficient largement de la télédétection pour leur compréhension, leur gestion et leur préservation. Les informations obtenues permettent de suivre la composition spécifique des peuplements, leur état physiologique, et leur structure locale. Les images (multispectrales) collectées depuis plusieurs dizaines d'années ont permis de caractériser de grands types de peuplements, de suivre des changements (par exemple la détection des coupes rases opérationnelle en France, les dégâts de tempête), des problèmes sanitaires, de caractériser la phénologie ou d'analyser des tendances de ces systèmes sur le moyen et long terme. Les images multispectrales et les systèmes Lidar aéroportés ont été utilisés ces dernières années pour cartographier la distribution en 3D de la végétation et pour estimer la biomasse et les stocks de carbone. Elles permettent aussi de cartographier la production, la ressource et les stocks de carbone et de biomasse, d'évaluer leur vulnérabilité aux risques sanitaires et aux feux, et plus généralement, face au changement climatique. Enfin, les données de télédétection vont contribuer à mieux quantifier la contribution de la forêt à l'atténuation en reliant les variations de stocks de carbone avec des changements dans les conditions climatiques (précipitations, humidité du sol, température, etc.), ou avec la pression anthropique (déforestation, dégradation, reforestation, etc.).

Enfin, l'assimilation de données de télédétection dans des chaînes de calcul intégrant des modèles écologiques, biophysiques et biogéochimiques ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion durable des écosystèmes. Les nouvelles méthodes s'appuyant sur l'intelligence artificielle pour analyser les séries temporelles devraient permettre de tirer pleinement parti de ces données. Cependant, des défis subsistent, notamment la nécessité de développer des indicateurs fonctionnels de biodiversité (en lien avec les variables essentielles de la biodiversité, EBV) et de mieux comprendre les interactions entre les variables climatiques, les pratiques humaines et les écosystèmes.

La télédétection est une technologie indispensable pour mieux comprendre et gérer les ressources naturelles, tout en aidant à répondre aux défis mondiaux tels que le changement climatique, la sécurité alimentaire et la préservation de la biodiversité.

► Références

- Allard D., François B., García de Cortázar-Atauri I., Vrac M., 2023. Multivariate bias corrections of climate simulations seen through impact model. Results of the COMPROMISE project, rapport technique, 128 p., <https://cnrs.hal.science/hal-04227826/>.
- Angot A., 1883. Étude sur les vendanges en France, *Annales du Bureau central météorologique de France*, I, B29-B120.

- Aono Y., Kazui K., 2008. Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century, *International Journal of Climatology*, 28(7), 905-914, <https://doi.org/10.1002/joc.1594>.
- Beaudoin N., Lecharpentier P., Ripoche-Wachter D., Strullu L., Mary B., Léonard J. *et al.*, 2023. STICS soil-crop model: Conceptual framework, equations and uses. Versailles, éditions Quæ, 516 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3679-4>.
- Ben-Ari T., Boé J., Ciais P., Lecerf R., Van der Velde M., Makowski D., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France, *Nature Communications*, 9, 1627, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.
- Brown I., Towers W., Rivington M., Black H.I.J., 2008. Influence of climate change on agricultural land-use potential: adapting and updating the land capability system for Scotland, *Climate Research*, 37, 43-57, <http://doi.org/10.3354/cr00753>.
- Caubel J., García de Cortázar-Atauri I., Launay M., de Noblet-Ducoudré N., Huard F., Bertuzzi P. *et al.*, 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria, *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 94-106, <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.005>.
- Caubel J., García de Cortázar-Atauri I., Vivant A., Launay M., de Noblet-Ducoudré N., 2018. Assessing future meteorological stresses for grain maize in France, *Agricultural Systems*, 159, 237-247, <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.010>.
- Chuine I., 2010. Why does phenology drive species distribution?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 3149-3160, <http://doi.org/10.1098/rstb.2010.0142>.
- Chuine I., Régnière J., 2017. Process-based models of phenology for plants and animals, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 159-182, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022706>.
- Chuine I., García de Cortázar-Atauri I., Kramer K., Hänninen H., 2013. Plant development models, in M.D. Schwartz (Ed.), *Phenology: an integrative environmental science*, 2^{de} édition, p. 275-293, Springer, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0_15.
- Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Ladurie E.L., 2004. Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, 432, 289-290.
- Chuine I., Bonhomme M., Legave J.-M., García de Cortázar-Atauri I., Charrier G., Lacointe A. *et al.*, 2016. Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break, *Global Change Biology*, 22, 3444-3460, <http://doi.org/10.1111/gcb.13383>.
- Clark J.E., Margary I.D., Marshall R., 1924. International co-operation in phenological research, *Nature*, 114, 607-608, <https://doi.org/10.1038/114607a0>.
- Daux V., García de Cortázar-Atauri I., Yiou P., Chuine I., Garnier E., Le Roy Ladurie E. *et al.*, 2012. An open-access database of grape harvest dates for climate research: Data description and quality assessment, *Climate of the Past*, 8, 1403-1418.
- Delécolle R., Ruget F., Ripoche D., Gosse G., 1995. Possible effects of climate change on wheat and maize crops in France, in Rosenzweig C., Ritchie J.T., Jones J.W., Tsuji G.Y., Hildebrand P. (Eds), *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*, American Society of America, publication spéciale n° 59, Madison (WI), États-Unis, 241-257, <https://doi.org/10.2134/asaspecpub59.c12>.
- García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Touzard J.-M., 2018. El Proyecto LACCAVE: Adaptación del sector vitivinícola francés al cambio climático, in Compés Lopez R., Sotés Ruiz V. (Coords), *El sector vitivinícola frente al desafío del cambio climático. Estrategias públicas y privadas de mitigación y adaptación en el Mediterráneo*, Monografías 37, Cajamar Caja Rural, 65-90.
- García de Cortázar-Atauri I., Maury O., 2019. GETARI: Generic Evaluation Tool of AgRoclimatic Indicators, Portail Data INRAE, V1, <https://doi.org/10.15454/IZUFAP>.
- Gouache D., Bouchon A.-S., Jouanneau E., Le Bris X., 2015. Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France, *Agricultural and Forest Meteorology*, 209-210, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.027>.

- Hannin H., de Rességuier L., David L., Nougier M., Touzard J.-M., Levraud F. *et al.*, 2024. La construction des connaissances pour la formation, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 180-194, <https://www.queae-open.com/extract/926>.
- Hänninen H., Kramer K., Tanino K., Zhang R., Wu J., Fu Y.H., 2019. Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling, *Trends in Plant Science*, 24, 199-209, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.006>.
- Holzkämper A., Calanca P., Fuhrer J., 2011. Analyzing climate effects on agriculture in time and space, *Procedia Environmental Sciences*, 3, 58-62, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.011>.
- Holzkämper, A., Calanca P., Fuhrer J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach, *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 149-159, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.004>.
- Huard F., 2021. Potentiel climatique de l'AOC Ventoux, étude à haute résolution en contexte de changement climatique, rapport INRAE, Avignon, <https://doi.org/10.15454/yb61-bt78>.
- Huard F., Brisson N., Clastre P., Guinot J.P., Ruget F., Seguin B., 2005. Utilisation de STICS pour la mise en place d'une veille agroclimatique sur internet, Séminaire STICS, Carry le Rouet, 191-194, <https://stics.inrae.fr/rencontres-scientifiques/carry-2005>.
- Jägermeyr J., Müller C., Ruane A.C., Elliott J., Balkovic J., Castillo O. *et al.*, 2021. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models, *Nature Food*, 2, 873-885, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.
- Labbé T., Pfister C., Brönnimann S., Rousseau D., Franke J., Bois B., 2019. The longest homogeneous series of grape harvest dates, Beaune 1354-2018, and its significance for the understanding of past and present climate, *Climate of the Past*, 15, 1485-1501, <https://doi.org/10.5194/cp-15-1485-2019>.
- Lavergne A., Daux V., Pierre M., Stievenard M., Srur A.M., Villalba R., 2018. Past summer temperatures inferred from dendrochronological records of Fitzroya cupressoides on the eastern slope of the Northern Patagonian Andes, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 32-45, <https://doi.org/10.1002/2017JG003989>.
- Le Roux R., Furusho-Percot C., Launay M., García de Cortázar-Atauri I., 2023. Étude agroclimatique de l'évolution du climat de l'AOC Luberon, rapport INRAE AgroClim, Avignon, 33 p.
- Le Roux R., Furusho-Percot C., Deswarté J.-C., Bancal M.-O., Chenu K., de Noblet-Ducoudré N. *et al.*, 2024. Mapping the race between crop phenology and climate risks for wheat in France under climate change, *Scientific Reports*, 14, 8184, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58826-w>.
- Malheiro A., Santos J., Fraga H., Pinto J., 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe, *Climate Research*, 43, 163-177, <https://doi.org/10.3354/cr00918>.
- Marjou M., García de Cortázar-Atauri I., 2019. Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux, rapport Inra, 94 p., <https://doi.org/10.15454/1.5586048305359907E12>.
- Maury O., García de Cortázar-Atauri I., Bertuzzi P., Lagier M., Clastre P., 2021. SEASON : System for Evaluation of Agriculture faiSability using indicatOrs combiNatiOn, <https://doi.org/10.15454/LAPNHT>.
- Mazoyer M. (dir.), 2002. *Larousse Agricole*, 4^e édition, Paris (France), 767 p.
- Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R. *et al.*, 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global Change Biology*, 12, 1969-1976, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>.
- Morales-Castilla I., García de Cortázar-Atauri I., Cook B.I., Lacombe T., Parker A., van Leeuwen C. *et al.*, 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 117, 2864-2869, <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>.
- Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 284 p.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Van Leeuwen C., Chuine I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L., *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 206-216, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>.

- Parker A., García de Cortázar-Atauri I., Chuine I., Barbeau G., Bois B., Boursiquot J.-M. *et al.*, 2013. Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L., *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005>.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Géry L., Spring J.-L., Destrac A., Schultz H. *et al.*, 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars, *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286, 107902, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>.
- Pereira H.M., Ferrier S., Walters M., Geller G.N., Jongman R.H.G., Scholes R.J. *et al.*, 2013. Essential biodiversity variables, *Science*, 339, 277-278, <https://doi.org/10.1126/science.1229931>.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I. *et al.*, 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429, <https://doi.org/10.1038/20859>.
- Réaumur R.A.F. 1735. Observations du thermomètre, faites à Paris pendant l'année 1735, comparées avec celles qui ont été faites sous la Ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos Isles de l'Amérique, *Histoire et Mémoires de l'Académie royale des sciences*, 545-576.
- Renard B., 2008. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France, *La Houille Blanche*, 1, 109-117, <https://doi.org/10.1051/lhb:2008012>.
- Riou C., 1994. The effect of climate on grape ripening: application to the zoning of sugar content in the European community, CECA-CEE-CECA, Luxembourg, 321 p.
- Ripoche C., García de Cortázar-Atauri I., 2021a. Historical phenology data from observatory St-Maur-des-Fossés, INRAE, Versailles, réseau Tempo, <https://doi.org/10.15454/2TWG8B>.
- Ripoche C., García de Cortázar-Atauri I., 2021b. Historical phenology data from Versailles research center, INRAE, réseau Tempo, <https://doi.org/10.15454/P27LDX>.
- Santos J.A., Malheiro A.C., Pinto J.G., Jones G.V., 2012. Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing, *Climate Research*, 51, 89-103, <http://doi.org/10.3354/cr01056>.
- Seguin B., García de Cortázar-Atauri I., 2004. Climate warning: consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe, *Acta Horticulturae*, 689, 61-70, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.3>.
- Seguin B., Domergue M., García de Cortázar-Atauri I., Brisson N., Ripoche D., 2004. Le réchauffement climatique récent : impact sur les arbres fruitiers et la vigne, lettre PIGB-PMRC, France Changement Global, 16, 50-54.
- Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Pagé C. *et al.*, 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate, *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>.
- Tonietto J., Carboneau A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide, *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 81-97, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>.
- Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Eitzinger J., Seguin B. *et al.*, 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change, *Global Change Biology*, 17, 2298-231, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x>.
- Tuan N.T., Qiu J., Verdoort A., Li H., Van Ranst E., 2011. Temperature and precipitation suitability evaluation for the winter wheat and summer maize cropping system in the Huang-Huai-Hai Plain of China, *Agricultural Sciences in China*, 10, 275-288, [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(11\)60005-9](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60005-9).
- Vautard R., van Oldenborgh G.J., Bonnet R., Li S., Robin Y., Kew S. *et al.*, 2023. Human influence on growing-period frosts like the early April 2021 in Central France, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1045-1058, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1045-2023>.
- Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyroux J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *International Journal of Climatology*, 30, 1627-1644, <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.

Agriculture et changement climatique

Wenden B., Chuine I., Farrera I., García de Cortázar-Atauri I., Legave J.-M., 2022. Chapitre 7. Des modèles prédictifs comme outils d'anticipation des changements phénologiques chez les espèces fruitières, in Legave J.-M. (Coord.), *Les productions fruitières à l'heure du changement climatique – Risques et opportunités en régions tempérées*, Versailles, éditions Quæ, 464 p.

WMO, World Meterological Organization, 2009. Guidelines for plant phenological observations, <https://library.wmo.int/records/item/51138-guidelines-for-plant-phenological-observations>.

Yiou P., García de Cortázar-Atauri I., Chuine I., Daux V., Garnier E., Viovy N. *et al.*, 2012. Continental atmospheric circulation over Europe during the Little Ice Age inferred from grape harvest dates, *Climate of the Past*, 8, 577-588.

Chapitre 4

Modèles biophysiques de projection des impacts du changement climatique sur les cultures de l'échelle locale à l'échelle mondiale

Nicolas Guilpart, Erwan Personne, David Makowski

Les espèces végétales cultivées par les agriculteurs sont sensibles aux conditions climatiques dans lesquelles elles se développent. Pour cette raison, le changement climatique peut avoir un impact important sur la croissance et sur le développement des cultures, et donc sur la production agricole (voir chapitre 6). L'estimation des impacts probables, positifs ou négatifs, du changement climatique sur la production agricole est donc un enjeu clé et une étape incontournable pour l'élaboration de stratégies d'adaptation de nos systèmes agricoles au climat futur.

L'impact du changement climatique sur la production agricole peut se manifester de deux manières principales. La première manifestation est l'évolution progressive des conditions climatiques moyennes, comme l'augmentation des températures. Ces changements, qui se produisent progressivement sur un pas de temps d'une ou de plusieurs dizaines d'années, peuvent conduire à des déplacements des aires de cultures au sein d'un pays ou entre pays, modifier la rentabilité relative des cultures ainsi que provoquer une dégradation ou une amélioration des capacités productives d'une région (Cho et McCarl, 2017). Ces changements soulèvent, entre autres, la question fondamentale de l'abandon de cultures traditionnelles et de l'adoption de nouvelles cultures, de l'échelle locale (exploitation agricole) à l'échelle régionale (développement de nouvelles filières) ou nationale (compétitivité sur les marchés internationaux). La seconde manifestation concerne l'occurrence d'événements climatiques extrêmes, comme les vagues de froid ou de chaleur, les sécheresses, les fortes pluies. Les années récentes ont été marquées par de nombreux événements de ce type ayant eu de forts impacts sur l'agriculture, dans le monde et en Europe (Lesk *et al.*, 2016). C'est par exemple le cas du blé en France en 2016 avec un hiver exceptionnellement doux et un printemps extrêmement pluvieux, qui ont engendré la plus forte perte de rendement (−25%) depuis une cinquantaine d'années (Ben-Ari *et al.*, 2016); c'est aussi le cas du gel tardif de la vigne en France en 2021 (Vautard *et al.*, 2023) ou encore de la sécheresse en Europe à l'été 2018 (Bellouin *et al.*, 2020). Ce type d'événement peut avoir des conséquences économiques néfastes sur les exploitations agricoles, mais aussi pour toute une filière.

Si des événements extrêmes se produisent simultanément dans plusieurs pays ou dans plusieurs régions du monde, cela peut déclencher des tensions sur les marchés internationaux (Mehrabi et Ramankutty, 2019). Les événements climatiques extrêmes soulèvent la question essentielle de la résilience des systèmes agricoles.

Ces quelques exemples montrent l'importance d'estimer les impacts probables du changement climatique sur la production agricole de l'échelle locale à l'échelle mondiale. On parle alors de «projections des impacts» du changement climatique sur les cultures. L'objet de ce chapitre est de présenter comment sont réalisées ces projections pour les espèces végétales cultivées²⁵. Une première partie décrira les principaux types de modèles utilisés pour estimer l'impact du changement climatique sur les cultures ainsi que leurs avantages et inconvénients. Une seconde partie présentera la façon dont ces modèles sont utilisés pour réaliser des projections d'impacts. Une place importante est accordée à l'impact du changement climatique sur le rendement des cultures, qui reflète l'état actuel des travaux de recherche sur cette question. Enfin, ce chapitre se concentre sur la production agricole (de l'échelle locale à l'échelle mondiale) et ses composantes en matière de surface et de rendement, et ne traite pas des impacts tout au long des filières ni à l'échelle du système alimentaire.

► Les types de modèles

De nombreux modèles ont été utilisés pour évaluer l'impact du changement climatique sur les cultures. Parmi cette diversité, il est possible de distinguer quatre grands types de modèles : les modèles mécanistes, les modèles statistiques et de machine learning, les modèles de niche écologique des cultures et la métamodélisation. Ces quatre grands types sont décrits ci-dessous.

Les modèles mécanistes

Description

Les modèles mécanistes sont des modèles qui simulent la croissance et le développement des cultures en fonction des caractéristiques génétiques (G) de ces dernières, de l'environnement (E) biophysique dans lequel elles sont cultivées (généralement le sol et les conditions climatiques), et des pratiques agricoles (M, pour *management*, en anglais). Ils sont fondés sur la connaissance des processus (ou mécanismes) biologiques, physiques et chimiques régissant le fonctionnement de l'agroécosystème. Ces modèles sont capables de simuler les interactions $G \times E \times M$, c'est-à-dire l'effet de pratiques agricoles dans un environnement donné pour une culture (voire une variété) donnée (Cooper *et al.*, 2021). Parmi les processus couramment simulés par ces modèles, on peut citer par exemple l'effet de la température sur la phénologie, l'interception du rayonnement solaire par la culture, la production de biomasse par photosynthèse, l'effet d'une modification de date de semis sur les conditions de croissance de la culture, ou encore la consommation d'eau de la culture par transpiration (Boote *et al.*, 2013).

L'étude d'un ou de différents processus considérés est généralement conduite à l'aide d'expérimentations conçues pour le processus en question, le plus souvent en conditions contrôlées. Cela permet d'estimer les paramètres des relations de dépendance

25. Les méthodes pour étudier l'impact du changement climatique sur les animaux d'élevage ne sont pas traitées ici.

mentionnées précédemment. Selon le degré de simplicité, de généréricité ou de précision voulu, tous les modèles mécanistes ne prennent pas en compte les mêmes processus. Par exemple, certains modèles considèrent seulement l'effet de la température et du rayonnement solaire, alors que d'autres tiennent compte également de la disponibilité en eau et en éléments minéraux (azote principalement), voire intègrent plus rarement la présence et le développement de certains bioagresseurs (agents pathogènes, ravageurs, adventices). Selon les processus pris en compte, les modèles simulent différents niveaux de rendements : le rendement potentiel, le rendement atteignable limité par l'eau ou les nutriments, le rendement réel atteint par les agriculteurs en tenant compte de tous les facteurs limitants (van Ittersum *et al.*, 2013).

Ces modèles fonctionnent généralement à un pas de temps journalier allant de l'implantation d'une culture à sa récolte. Certains modèles sont toutefois capables de simuler des séquences de cultures en tenant compte des effets de la culture précédente sur la culture suivante. L'échelle spatiale considérée correspond à la parcelle cultivée (plusieurs parcelles peuvent être simulées), l'objet simulé étant un peuplement végétal, la plupart du temps homogène (une seule espèce, une seule variété).

Ces modèles nécessitent un nombre important de données d'entrée qui peuvent parfois être difficiles d'accès. Elles concernent les caractéristiques génétiques des variétés simulées (par exemple, certaines variétés peuvent avoir un cycle plus long que d'autres), l'environnement (profondeur du sol et capacité de rétention en eau, données météorologiques journalières), et les pratiques agricoles (date et densité de semis, irrigation, fertilisation, utilisation de pesticides, travail du sol, etc.). Les sorties de ces modèles sont nombreuses : variables d'état du système au pas de temps journalier tout au long du cycle (biomasse accumulée, indice de surface foliaire, quantité d'eau transpirée, quantité d'azote accumulée, degrés-jours accumulés, stocks d'eau et d'azote du sol, indicateurs de stress physiologiques, etc.), rendement final, composition du grain (teneur du grain en huile ou en protéines), date de récolte. Ces données intermédiaires permettent ainsi de mieux comprendre les résultats d'une simulation.

Quelques exemples

Il existe de très nombreux modèles mécanistes (Jones *et al.*, 2017). Certains sont spécifiques à une culture comme le modèle Oryza pour le riz (Li *et al.*, 2017) ou le modèle Hybrid-Maize pour le maïs (Yang *et al.*, 2017), d'autres peuvent simuler plusieurs cultures comme Stics (Brisson *et al.*, 2003), Wofost (de Wit *et al.*, 2019), Apsim (Keating *et al.*, 2003), DSSAT (Jones *et al.*, 2003) ou AquaCrop (Vanuytrecht *et al.*, 2014). Toutefois, il est important de noter qu'il n'existe pas de modèle mécaniste pour toutes les cultures. S'il existe plusieurs modèles pour les principales cultures (blé, maïs, riz, soja), il n'existe pas toujours de modèle pour les cultures mineures (notamment les cultures maraîchères), les cultures associées (Gaudio *et al.*, 2019) ou encore les cultures conduites en agroforesterie.

Les modèles statistiques et de machine learning

Description

Les modèles statistiques et de machine learning (apprentissage automatique) prédisent le rendement annuel des cultures en fonction d'un certain nombre de

variables appelées prédicteurs (Lobell et Burke, 2010). Ces modèles peuvent s'écrire sous la forme générique présentée en équation 1 ci-dessous :

$$Y_i = f(X_{i,1}, \dots, X_{i,n}) \text{ (équation 1)}$$

où Y_i est la variable à prédire — habituellement le rendement de l'année i — et $X_{i,1}, \dots, X_{i,n}$ les n prédicteurs de l'année i . La forme de la fonction f peut varier. Parmi les modèles statistiques les plus courants, on retrouve les modèles linéaires classiques et généralisés, les régressions pénalisées de type Lasso ou encore le modèle additif généralisé. Parmi les modèles de type machine learning les plus courants, on retrouve les forêts aléatoires (*random forest*), les réseaux de neurones (*neural networks*), les *support vector machines* ou encore le *gradient boosting* (van Klompenburg *et al.*, 2020). Les prédicteurs généralement utilisés sont des variables climatiques (température, précipitations, rayonnement, déficit de pression de vapeur, etc.), et plus rarement des variables caractérisant le type de sol (pH, texture, réserve utile) et les pratiques agricoles (date et densité de semis). Les variables climatiques utilisées peuvent être agrégées à différentes échelles de temps, les moyennes mensuelles ou sur l'ensemble du cycle de culture (entre l'implantation de la culture et sa récolte) étant les plus fréquentes. Les paramètres de ces modèles sont ajustés sur des données historiques, dont l'échelle spatiale peut varier d'une étude à l'autre. Par exemple, les données de rendement utilisées peuvent être (1) à une échelle très locale, parcelle ou exploitation agricole, dans le cas de données d'agriculteurs ou d'essais au champ (Sila *et al.*, 2023), (2) à l'échelle d'une maille (souvent de 50-100 km de côté) lorsque les données utilisées sont sous forme de cartes de rendement (Guilpart *et al.*, 2022), (3) à l'échelle d'un département ou d'une région française (ou toute autre division administrative inférieure à l'échelle nationale) (Lischeid *et al.*, 2022), (4) à l'échelle nationale, voire mondiale (Lobell *et al.*, 2011). Un des avantages de ces modèles est de pouvoir utiliser les statistiques officielles de rendement qui sont disponibles pour de nombreuses cultures (dont les cultures mineures), à différentes échelles (département, pays), dans de nombreux pays du monde²⁶, et parfois sur des séries temporelles très longues pouvant excéder un siècle (Schauberger *et al.*, 2018). Les modèles statistiques et de machine learning se distinguent donc des modèles mécanistes en ce sens qu'ils ne simulent pas explicitement les processus biologiques régissant la croissance et le développement des cultures.

Quelques exemples

De nombreux exemples d'utilisation de modèles statistiques existent dans la littérature. Parmi les exemples emblématiques, on peut citer le travail de Lobell *et al.* (2011), qui contribua à démontrer un impact négatif du changement climatique sur le rendement mondial du blé (-3,8%) et du maïs (-5,5%) entre 1980 et 2008. Dans cette étude, le rendement moyen national de chaque année est modélisé à partir des précipitations et de la température moyennes sur le cycle de culture au moyen d'un modèle de régression avec termes quadratiques. Un exemple de modélisation de type machine

26. FAOStat, la base de données de la FAO fournit les rendements moyens à l'échelle nationale pour de nombreuses cultures pour chaque année, de 1961 à aujourd'hui, pour presque tous les pays du monde (<https://www.fao.org/faostat/fr/>). En France, le service de la statistique du ministère de l'Agriculture (SSP) publie des données de rendement à l'échelle départementale pour de nombreuses cultures tous les ans depuis de nombreuses années.

learning est fourni par Guilpart *et al.* (2022), qui ont modélisé l'impact du changement climatique sur le rendement du soja en Europe en utilisant des moyennes mensuelles de variables climatiques et l'algorithme des forêts aléatoires.

Les modèles de niche écologique des cultures

Description

Bien qu'il existe plusieurs définitions de ce concept en écologie (Hirzel et Le lay, 2008), nous retiendrons que la niche écologique d'une espèce cultivée est représentée par l'ensemble des conditions environnementales permettant d'obtenir une production agricole. Elle est généralement définie à partir des conditions climatiques (température, précipitations, etc.) et de sol (pH, salinité, texture, etc.). À partir de ces conditions environnementales, les modèles de niche écologique calculent un indice qui quantifie à quel point ces conditions sont favorables à la culture de l'espèce considérée. Cet indice est nommé *suitability index* en anglais et varie le plus souvent entre 0 et 1. Ces modèles ont donc la particularité de ne pas simuler directement le rendement de la culture, contrairement aux modèles mécanistes et aux modèles statistiques et de machine learning. Ils peuvent être spécifiques à une culture (Ramirez-Cabral *et al.*, 2016) ou considérer plusieurs cultures, voire l'activité agricole dans son ensemble (Zabel *et al.*, 2014). Pour construire ces modèles, deux approches peuvent être distinguées. La première approche consiste à utiliser des relations publiées dans la littérature entre les variables environnementales considérées et les performances de la culture d'intérêt (Zabel *et al.*, 2014). La deuxième approche consiste à établir directement ces relations en combinant des observations de la répartition géographique de la culture d'intérêt avec les conditions environnementales observées là où elle est cultivée, de manière à identifier la gamme de conditions environnementales dans laquelle celle-ci est cultivée. La disponibilité croissante de cartes mondiales de répartition des cultures (par exemple Monfreda *et al.*, 2008), de variables climatiques (Fick et Hijmans, 2017) et édaphiques (de Sousa *et al.*, 2020) facilite la mise en œuvre de cette deuxième approche. Dans ce cas, différents algorithmes peuvent être utilisés et parmi les plus fréquemment utilisés on retrouve les modèles de maximum d'entropie (par exemple MaxEnt), les réseaux de neurones, le modèle linéaire généralisé, le modèle additif généralisé, les arbres de classification, les *support vector machines* ou encore les forêts aléatoires (Thuiller *et al.*, 2009). Ces modèles considèrent le plus souvent des conditions environnementales moyennes sur plusieurs années (de quelques années à plusieurs décennies), et ne fournissent donc pas d'information annuelle.

Quelques exemples

De nombreux exemples d'utilisation de modèles de niche écologique des cultures existent dans la littérature. Par exemple, la FAO a développé un modèle de ce type nommé Ecocrop²⁷ qui a été utilisé pour de nombreuses cultures et dans différentes régions du monde (Ramirez-Villegas *et al.*, 2013; Manners *et al.*, 2020; Peter *et al.*, 2020). Un autre exemple est le travail de Zabel *et al.* (2014), qui ont évalué l'impact du changement climatique sur la superficie de terres adaptées à l'agriculture jusqu'à l'horizon 2100.

27. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop>

Métamodélisation

Description

La métamodélisation consiste à construire un modèle simplifié qui fournit une approximation d'un modèle plus complexe. Cette démarche est utilisée lorsque l'on souhaite simplifier un modèle complexe (souvent un modèle mécaniste tel que décrit précédemment), mais dont l'usage est rendu difficile soit par un temps de calcul trop long, soit par des variables d'entrée difficiles à renseigner, ou encore par un code informatique inaccessible. Contrairement au modèle originel, le métamodèle n'est pas biophysique, mais de nature statistique.

Les métamodèles (appelés également émulateurs) sont actuellement utilisés dans divers domaines de recherche, notamment pour étudier l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles (Wicox et Makowski, 2014; Makowski *et al.*, 2015, 2020). On peut distinguer deux grands types de métamodélisation : (1) le développement d'un métamodèle fournissant une approximation d'un seul modèle biophysique, (2) le développement d'un métamodèle fournissant une approximation d'un ensemble de modèles biophysiques (c'est-à-dire plusieurs modèles mécanistes différents simulant la même variable de réponse). Ces deux approches sont brièvement décrites ci-dessous.

Métamodélisation de type 1

Pour obtenir une approximation d'un modèle biophysique, la démarche habituelle comporte quatre étapes principales :

- définir la variable de réponse Y que le métamodèle doit simuler et les variables d'entrée X en fonction desquelles Y doit être simulé. Ces variables doivent être définies en fonction des objectifs pratiques visés. Pour que le métamodèle présente un intérêt, les variables d'entrée X doivent être beaucoup moins nombreuses que celles du modèle mécaniste et plus faciles à collecter ;
- simuler un ensemble de N valeurs de Y avec le modèle mécaniste originel pour différentes valeurs de X . Le nombre de simulations N doit être le plus grand possible (plusieurs centaines à plusieurs milliers). En pratique, il est limité par le temps de calcul disponible ;
- entraîner plusieurs algorithmes différents pour prédire Y en fonction de X . Il est important de tester des algorithmes de natures variées, car il est difficile de savoir *a priori* quel algorithme sera le plus performant. Par exemple, il est conseillé de tester des modèles de régression linéaires, des processus gaussiens, des modèles de régression non paramétriques de type GAM (modèles additifs généralisés), ou des algorithmes de type machine learning, comme des forêts aléatoires ou des réseaux de neurones ;
- tester les algorithmes et sélectionner le plus performant. Cette étape est cruciale, car un test inapproprié conduira à la sélection d'un algorithme sous-optimal. En général, le test est réalisé à l'aide d'une procédure de validation croisée.

L'algorithme sélectionné est alors utilisé comme métamodèle, en substitution au modèle mécaniste originel, avec un temps de calcul plus court et des variables d'entrée plus faciles à obtenir en pratique. Un exemple détaillé est présenté dans Ramanantenasoa *et al.* (2019).

Métamodélisation de type 2

De nombreuses études ont été conduites pour étudier l'effet du changement climatique (notamment l'augmentation des températures et de la concentration en CO_2)

sur les rendements en utilisant des modèles mécanistes (Toreti *et al.*, 2020). L'utilisation d'ensembles de modèles a connu un certain succès dans ce contexte (Bassu *et al.*, 2014). Le principe est de réaliser des simulations avec plusieurs modèles de culture biophysiques sur un ou plusieurs scénarios de changement climatique dans le but de générer un ensemble de valeurs pour des variables de sortie pertinentes, par exemple pour le rendement. L'ensemble des simulations obtenues décrit alors une gamme d'impacts potentiels pour les différents scénarios climatiques étudiés.

L'utilisation d'ensembles de modèles de culture génère une grande quantité de données, qu'il est souvent difficile de résumer de manière concise du fait de la multiplicité des modèles mécanistes, des sites et des scénarios climatiques considérés. Un autre problème est qu'il n'est pas évident d'interpoler les résultats des modèles mécanistes à d'autres scénarios climatiques que ceux initialement considérés dans le protocole de simulation. Cela nécessiterait en effet de réutiliser l'ensemble des modèles mécanistes, ce qui est souvent impossible en pratique, car ces modèles sont développés et utilisés par différentes équipes localisées dans différentes régions du monde.

Wilcox et Makowski (2014) et Makowski *et al.* (2015, 2021) ont développé un métamodèle statistique fournissant une bonne approximation d'ensembles de modèles mécanistes. Le métamodèle proposé par ces auteurs correspond à un modèle de régression linéaire à effets aléatoires. La partie « régression » de ce modèle statistique permet de décrire la réponse du rendement à des variables climatiques, comme la température moyenne, les précipitations et la concentration en CO₂. La partie « effets aléatoires » permet de décrire la variabilité des effets des variables climatiques entre les modèles mécanistes inclus dans l'ensemble. Une fois ajusté à un jeu de données incluant des simulations de l'ensemble de modèles mécanistes, le métamodèle permet de simuler l'effet de nouveaux scénarios de changement climatique avec un temps de calcul très réduit.

Quelques exemples

Makowski *et al.* (2015) ont appliqué un métamodèle de type 2 pour analyser trois jeux de données incluant des rendements simulés avec un ensemble de 19 modèles mécanistes de maïs, 26 modèles mécanistes de blé, et 13 modèles mécanistes de riz. Ces données sont issues du projet AgMIP, the Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (Rosenzweig *et al.*, 2013) (encadré 4.1). Des métamodèles de régression à coefficients aléatoires ont été ajustés à ces jeux de données. Les modèles ajustés ont ensuite été utilisés pour analyser la réponse du rendement à la concentration en CO₂ et à la température, et pour évaluer les risques de pertes de rendement. Les résultats montrent que, pour le rendement du blé, une augmentation de la concentration en CO₂ pourrait vraisemblablement compenser l'effet négatif d'une augmentation de la température de + 2 °C dans les quatre sites considérés. Pour le maïs, les résultats montrent que le bénéfice d'une augmentation de la concentration en CO₂ serait nettement moindre. Il serait d'un niveau intermédiaire pour le riz.

Récemment, le même type de métamodèle a été utilisé pour analyser des simulations générées par des modèles mécanistes pour des cultures de types C3 et C4 (deux mécanismes de photosynthèse contrastés), et pour quantifier l'effet du CO₂ sur les rendements (Makowski *et al.*, 2020). Pour les cultures de type C3, les résultats montrent que l'effet positif d'une augmentation du CO₂ (+ 9 % pour + 100 ppm) est

suffisamment élevé pour compenser les effets négatifs de l'augmentation de la température (-2,4% pour +1 °C). En revanche, pour les cultures de type C4, l'effet positif relativement faible de l'augmentation de la concentration de CO₂ entraîne des pertes de rendement importantes. Le niveau minimum d'augmentation de la concentration de CO₂ nécessaire pour obtenir un gain de rendement dans des conditions de température accrue est beaucoup plus élevé pour les cultures en C4 (par exemple le maïs et le sorgho) que pour les cultures en C3 (par exemple le blé, le riz et le soja).

► L'utilisation des modèles pour estimer les impacts du changement climatique

Étudier les effets du changement climatique passé

Lorsqu'ils sont utilisés sur des données historiques, notamment de climat et de rendement, les différents types de modèles mentionnés ci-dessus peuvent être utilisés pour étudier l'impact du changement climatique passé. Il est possible de distinguer plusieurs cas de figure dans lesquels cela a été réalisé. Tout d'abord, les modèles de type statistique ont été largement utilisés pour étudier l'évolution des conditions climatiques moyennes sur le rendement des cultures. Ces approches ont mis en évidence que l'on pouvait déjà observer un effet négatif du changement climatique à l'échelle mondiale pour plusieurs cultures au cours des dernières décennies (1980-2010). Certaines études ont utilisé des scénarios climatiques dits contrefactuels, c'est-à-dire sans changement climatique (Lobell *et al.*, 2011), d'autres non (Ray *et al.*, 2019). Un second cas de figure correspond à l'étude de l'impact d'événements climatiques extrêmes. Dans ce cas, les modèles de type statistique et de machine learning ont été les plus couramment utilisés. C'est par exemple le cas d'études portant sur la perte extrême de rendement du blé en France en 2016 (Ben-Ari *et al.*, 2016) ou la sécheresse en Europe en 2018 (Beillouin *et al.*, 2020). Les modèles mécanistes ont toutefois été utilisés également, mais plus rarement (de Souza Nôia Jr *et al.*, 2023).

Étudier les effets du changement climatique futur

Les méthodes employées pour étudier les impacts du changement climatique futur sur les cultures se déroulent généralement en trois grandes étapes : (1) l'élaboration d'un plan de simulation, (2) le choix d'un ou des modèles et la réalisation des simulations, (3) l'analyse des résultats. Les étapes (1) et (3) sont décrites ci-dessous. Concernant l'étape (2) de choix du ou des modèles et de réalisation des simulations, les lecteurs pourront se reporter à la section « Les types de modèles » ci-dessus.

Élaborer un plan de simulation

Le choix des scénarios climatiques et de l'horizon temporel

L'évolution future du climat dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) qui sera émise par les sociétés humaines. Le climat futur sera donc différent selon que l'évolution de nos sociétés conduit à une réduction drastique des émissions de GES, ou au contraire, à leur augmentation. Ces différents futurs possibles sont représentés par différents « scénarios », qui sont simulés par des modèles climatiques afin de comprendre leurs effets sur le climat futur. Dans le dernier rapport

du Giec (IPCC, 2023), ces scénarios sont caractérisés par (1) des « trajectoires socio-économiques partagées » (en anglais, *shared socio-economic pathways* ou SSP), qui décrivent différentes évolutions futures du développement socio-économique des sociétés et sont au nombre de cinq, centrées sur le développement durable (SSP1), les rivalités régionales (SSP3), les inégalités (SSP4), le développement fondé sur les énergies fossiles (SSP5) et un développement intermédiaire (SSP2) (O'Neill *et al.*, 2014); (2) des « trajectoires représentatives de concentration » (en anglais, Representative Concentration Pathways ou RCP), qui décrivent différentes évolutions des émissions et de la concentration en GES de l'atmosphère et sont caractérisées par leur niveau de forçage radiatif²⁸ (Van Vuuren *et al.*, 2011). Les RCP8.5, RCP7.0, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6, RCP1.9 sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300. Le scénario le plus pessimiste est le RCP8.5. L'utilisation conjointe des SSP et des RCP permet de rendre compte du fait que la même concentration en GES dans l'atmosphère peut être atteinte par des sociétés évoluant de manière très différente. Le dernier rapport du Giec a retenu cinq scénarios de référence qui couvrent l'éventail des développements futurs possibles des facteurs anthropiques du changement climatique; ils sont présentés dans le tableau 4.1.

Le choix du ou des scénarios de changement climatique est donc déterminant pour étudier l'impact du climat futur sur les cultures. Si l'objectif est d'étudier l'impact d'un réchauffement très important, le choix du SSP5-8.5 est pertinent. Si l'objectif est d'étudier l'impact d'un réchauffement plus faible dû à la mise en œuvre de politiques climatiques ambitieuses, le choix du scénario SSP1-1.9 est pertinent. Enfin, plusieurs scénarios peuvent être considérés pour explorer un ensemble de possibilités d'évolution du climat futur. Ensuite, des simulations de l'impact du changement climatique sur les cultures sont réalisées pour différents horizons temporels, pour lesquels on distingue généralement le futur proche (jusque dans les années 2050) du futur lointain (jusqu'en 2100).

Tableau 4.1. Description des cinq scénarios de référence du sixième rapport du Giec.

Scénario	Trajectoire socio-économique (SSP)	RCP (W/m ²)	Niveau de réchauffement global (°C)		
			2021-2040	2041-2060	2081-2100
SSP1-1.9	« Développement durable »	1.9	1,5	1,6	1,4
SSP1-2.6	« Développement durable »	2.6	1,5	1,7	1,8
SSP2-4.5	« Développement intermédiaire »	4.5	1,5	2,0	2,7
SSP3-7.0	« Rivalités régionales »	7.0	1,5	2,1	3,6
SSP5-8.5	« Développement fondé sur les énergies fossiles »	8.5	1,6	2,4	4,4

L'échelle spatiale des simulations

Selon le type de modèle choisi (mécaniste, statistique, machine learning, niche écologique) et l'objectif poursuivi, les simulations peuvent être réalisées à différentes échelles

28. Le forçage radiatif désigne le changement du bilan radiatif (le rayonnement descendant moins le rayonnement montant) de l'atmosphère dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat, comme la concentration des gaz à effet de serre. Il est exprimé en watt par mètre carré (W/m²).

spatiales (Liu *et al.*, 2016) : (1) les simulations ponctuelles (en anglais, *point-based simulations*), qui correspondent à l'échelle de la parcelle cultivée et sont réalisées pour une parcelle ou un ensemble de parcelles distribuées au sein d'un territoire dont la taille peut varier d'une exploitation agricole à l'ensemble de la planète, (2) les simulations distribuées sur une grille (en anglais, *grid-based simulations*), qui divisent le globe en mailles géographiques définies par la latitude et la longitude et réalisent des simulations pour chaque maille, (3) les simulations à l'échelle d'une division administrative telle que le département, la région ou le pays. Les simulations ponctuelles sont le plus souvent réalisées avec des modèles mécanistes (Falconnier *et al.*, 2020; Parent *et al.*, 2018) et plus rarement avec des modèles statistiques ou de machine learning. En effet, les modèles mécanistes se prêtent bien à la réalisation de simulations ponctuelles, car ils incluent le plus souvent des paramètres permettant de décrire finement les conditions locales, comme le type et la profondeur de sol ou la pente de la parcelle cultivée. Les simulations distribuées sur une grille peuvent être réalisées avec des modèles mécanistes, statistiques (Guilpart *et al.*, 2022) ou de niche (Manners *et al.*, 2020). Ce type d'approche a engendré le développement de modèles mécanistes appropriés, nommés *global gridded crop models* (Müller *et al.*, 2017), dont le projet AgMIP est un exemple emblématique (encadré 4.1). Enfin, les simulations à l'échelle d'un ou de plusieurs départements, régions ou pays sont le plus souvent réalisées avec des modèles statistiques ou de machine learning (Jiang *et al.*, 2020). À ces échelles, les variations locales engendrées par la variabilité des types de sols et des pratiques des agriculteurs sont atténuées, car c'est le rendement moyen sur la division administrative considérée qui est modélisé. La pertinence locale des simulations ainsi réalisées est donc moins forte que pour des simulations avec des modèles mécanistes qui peuvent tenir compte de ces particularités locales. Toutefois, malgré l'augmentation actuelle rapide de la quantité de données disponibles, décrire finement les conditions locales sur de larges territoires reste difficile. Cela explique en partie pourquoi les modèles statistiques et de machine learning sont plus couramment utilisés à large échelle.

Prendre en compte l'adaptation

Selon la définition du Giec, l'adaptation est la démarche d'ajustement au climat actuel ou à venir, ainsi qu'à ses conséquences positives ou négatives. Du point de vue des systèmes agricoles, de nombreuses modifications peuvent être apportées aux systèmes de culture pour limiter les impacts négatifs du changement climatique ou pour tirer parti des impacts positifs de celui-ci, comme la modification des dates de semis, le changement de variétés (souvent limité à la durée de cycle), l'irrigation ou le changement d'espèce cultivée. Toutefois, il peut être compliqué d'identifier les adaptations pertinentes à simuler, car la gamme des possibilités est très vaste. Certaines études s'en tiennent donc à estimer l'impact du changement climatique, c'est-à-dire sans adaptation (Guilpart *et al.*, 2022), tandis que d'autres études évaluent l'effet de stratégies d'adaptation comparativement à un scénario sans adaptation (Parent *et al.*, 2018). Il est important de préciser de manière claire ce qui est évalué, car il existe un risque de surestimer ou de sous-estimer l'effet du changement climatique selon la méthode employée (Lobell *et al.*, 2014). Les modèles mécanistes sont intéressants dans la perspective d'évaluer l'effet de stratégies d'adaptation, car ils modélisent explicitement l'effet des pratiques agricoles, ce qui est beaucoup plus rarement le cas des modèles statistiques et de machine learning, et ce qui n'est pas possible avec les modèles de niche écologique des cultures.

Analyser les résultats des simulations

Les critères d'évaluation

Les résultats des simulations peuvent être analysés selon différents critères. Parmi les critères les plus fréquemment utilisés, on retrouve les performances moyennes, la variabilité interannuelle, l'impact des événements climatiques extrêmes ainsi que la période d'émergence des impacts climatiques. Les performances moyennes correspondent par exemple au rendement moyen sur une période de plusieurs années (par exemple 2040-2050 pour le milieu du siècle, 2080-2100 pour la fin du siècle), ce qui renseigne dans ce cas sur l'impact du changement climatique sur la capacité de production moyenne d'une région d'intérêt (Guilpart *et al.*, 2022). La variabilité interannuelle, calculée à partir de la variance, de l'écart-type ou du coefficient de variation, renseigne sur la stabilité de la production agricole (Iizumi et Ramankutty, 2016). L'impact des événements climatiques extrêmes renseigne sur la résilience des systèmes agricoles. Enfin, la période d'émergence des impacts du changement climatique désigne la période au cours de laquelle les niveaux de rendement des années exceptionnelles (positifs ou négatifs) deviennent la nouvelle norme. Elle est généralement identifiée comme le moment où le changement climatique entraîne des rendements qui s'écartent significativement de la variabilité historique des rendements (Jägermeyr *et al.*, 2021a). Elle renseigne sur la rapidité de manifestation des impacts du changement climatique et donc sur le temps disponible pour mettre en œuvre des adaptations.

Les sources d'incertitudes et leur prise en compte

Il existe de nombreuses sources d'incertitudes qui peuvent affecter le résultat des simulations. Nous retiendrons ici deux sources d'incertitudes essentielles : l'incertitude liée au modèle de culture et celle liée au modèle climatique. En effet, différents modèles de culture peuvent donner des résultats différents, entre autres, car ils ne prennent pas en compte les mêmes processus (dans le cas des modèles mécanistes) ou que les mêmes processus sont décrits mathématiquement de façon différente. Les modèles peuvent aussi avoir été calibrés avec des données différentes. Dans ce cas, deux façons de gérer cette incertitude sont possibles : (1) choisir le meilleur modèle, c'est-à-dire celui présentant les meilleures capacités prédictives (Guilpart *et al.*, 2022), (2) utiliser un ensemble de modèles et calculer la moyenne ou la médiane des résultats des modèles (Marte *et al.*, 2015). Le projet international AgMIP est aujourd'hui l'exemple le plus abouti de mise en œuvre d'un ensemble de modèles pour étudier l'impact du changement climatique sur les cultures à l'échelle mondiale (encadré 4.1). Bien que plusieurs études aient démontré l'intérêt d'utiliser un ensemble de modèles (Marte *et al.*, 2015), cette approche est très coûteuse à mettre en œuvre, car elle nécessite l'utilisation de plusieurs modèles pour la même culture. De plus, pour de nombreuses cultures, il n'existe pas plusieurs modèles différents disponibles (Marteau-Bazouni *et al.*, 2024). Pour le modèle de culture, le choix du meilleur modèle de culture ou d'un ensemble de modèles reste donc à déterminer au cas par cas. Pour représenter l'incertitude liée à la modélisation climatique, l'approche mobilisant un ensemble de modèles climatiques est recommandée dans tous les cas. L'accessibilité des données climatiques est aujourd'hui suffisamment bonne pour que cela ne pose pas de difficultés particulières. En effet, le projet CMIP²⁹ a

29. Coupled Model Intercomparison Project, <https://wcrp-cmip.org/>

abouti à la mise à disposition de projections climatiques mondiales réalisées avec différents modèles. Les plus récentes sont désignées par le terme CMIP6 et sont facilement téléchargeables³⁰.

Expliquer les résultats des simulations

Comprendre les résultats des simulations est une étape très importante pour s'assurer de la plausibilité des résultats ainsi que pour identifier des stratégies d'adaptation. En effet, ces dernières seront très probablement différentes si la contrainte climatique dominante est l'occurrence de températures très élevées ou le manque d'eau — ou les deux à la fois. Identifier les principaux facteurs responsables des résultats des simulations et les hiérarchiser sont des tâches difficiles compte tenu du grand nombre de facteurs interagissant au sein des systèmes agricoles. Toutefois, il existe des méthodes permettant d'expliquer — au moins en partie — les résultats des simulations. Dans le cas des modèles mécanistes, l'approche la plus courante consiste à réaliser plusieurs simulations en activant ou non certains mécanismes, comme l'effet de la concentration en CO₂ ou du manque d'eau sur les cultures, et à comparer les résultats de ces différentes simulations. Ainsi, les travaux de Webber *et al.* (2018) suggèrent que le rendement du blé en Europe devrait en moyenne bénéficier du changement climatique, alors que le rendement du maïs devrait être affecté négativement, le principal facteur explicatif étant l'augmentation du stress hydrique pour le maïs.

Encadré 4.1. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP)

AgMIP⁽¹⁾ est un programme de recherche international initié en 2010 dont l'objectif est l'amélioration des modèles de culture et de leur utilisation pour évaluer les impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire, de l'échelle locale à l'échelle mondiale. La communauté AgMIP regroupe de très nombreuses organisations et équipes de recherche dans le monde entier, qui travaillent de manière coordonnée pour réaliser des études d'impact du changement climatique sur l'agriculture et pour évaluer des stratégies d'adaptation et d'atténuation ainsi que pour améliorer les bases de données et les modèles utilisés pour les études d'impact. Ce programme de recherche est financé par des organismes publics (États, universités, instituts de recherche) et privés.

AgMIP a coordonné de très importants travaux de simulation des impacts du changement climatique à l'échelle mondiale sur le rendement des principales grandes cultures (blé, maïs, riz, soja) en utilisant des ensembles de modèles mécanistes (voir section « Étudier les effets du changement climatique passé » dans ce chapitre, p. 90). Les travaux récents incluent douze modèles de culture différents, dont les simulations sont réalisées annuellement jusqu'en 2100, à l'échelle mondiale, sur toutes les mailles d'une grille d'une résolution spatiale de 0,5° (environ 55 km à l'équateur), et ce pour différents scénarios de changement climatique. Pour cette raison, ces modèles sont dénommés en anglais « *global gridded crop models* » (Franke *et al.*, 2020).

L'utilisation de plusieurs modèles mécanistes pour la même culture permet d'évaluer l'incertitude liée au modèle en lui-même. Ces travaux ont ainsi montré qu'un ensemble de modèles permet de réaliser des projections plus fiables qu'un

30. Par exemple, sur le Climate Data Store du service Copernicus : <https://cds.climate.copernicus.eu/>

seul modèle (et même que le meilleur modèle) (Martre *et al.*, 2015). Ils ont également permis d'identifier les régions du monde dans lesquelles les différents modèles mécanistes évalués convergent vers le même résultat, ou divergent trop pour pouvoir tirer des conclusions (figure 4.1) (Jägermeyr *et al.*, 2021a). L'effet d'adaptations au changement climatique a été évalué à l'échelle mondiale, pour le cas par exemple du choix de la précocité variétale (Zabel *et al.*, 2021). Les performances des modèles mécanistes utilisés ont été évaluées et des pistes d'amélioration identifiées (Müller *et al.*, 2017; Wallach *et al.*, 2021). Les travaux réalisés par la communauté AgMIP font référence pour l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture en utilisant des modèles mécanistes.

⁽¹⁾ <https://agmip.org>

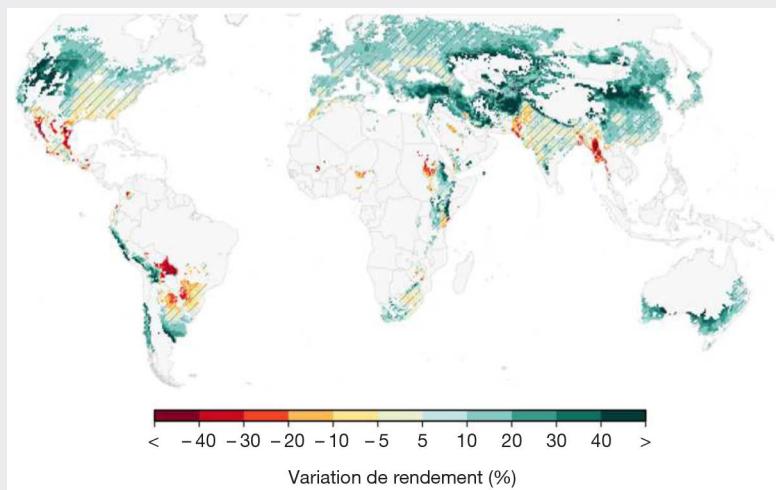


Figure 4.1. Impact du changement climatique sur le rendement du blé (2069-2099, SSP5-8.5, médiane, période historique de référence 1983-2013) d'après un ensemble de cinq modèles climatiques et de douze modèles de culture. Source : figure adaptée de Jägermeyr *et al.* (2021b), CC-BY 4.0.

Les zones hachurées indiquent un manque de consensus entre modèles : dans ces zones, l'impact (positif ou négatif) du changement climatique est trop incertain pour conclure.

Cette approche est intéressante car elle permet une interprétation mécaniste des résultats, mais elle requiert des temps de calcul importants. Dans le cas des modèles de type machine learning, plusieurs approches sont couramment utilisées pour expliquer les résultats des simulations, regroupées sous le terme d'*explainable artificial intelligence* (Ryo *et al.*, 2021). Il s'agit tout d'abord de méthodes décrivant le comportement du modèle dans son ensemble, par exemple des mesures d'importance des prédicteurs (qui permettent de hiérarchiser l'importance des prédicteurs) ou des *partial dependence plots* (qui décrivent l'influence d'un prédicteur sur le rendement). Ensuite, d'autres méthodes permettent d'expliquer le comportement local d'un modèle, c'est-à-dire d'identifier les raisons expliquant une prédiction particulière. Il existe plusieurs méthodes de ce type, comme Lime ou Shapley (Ryo *et al.*, 2021). Ces méthodes sont utilisées en agronomie depuis quelques années seulement. Ainsi, les travaux de Zhu *et al.* (2021) suggèrent que les pertes de rendement du blé en Europe étaient

historiquement (1980-2018) principalement déterminées par l'occurrence de stress hydriques, mais que les stress thermiques (c'est-à-dire l'occurrence de températures très élevées) deviendraient la principale cause de pertes de rendement à la fin du siècle (2070-2099).

Apprécier le domaine de validité des simulations

Réaliser des simulations des impacts du changement climatique sur les cultures est une tâche qui pose toujours la question du domaine de validité du modèle utilisé. En effet, compte tenu du changement climatique en cours, le climat futur sera différent du climat historique. La question qui se pose alors est : le modèle utilisé pour réaliser les simulations est-il encore fiable, ou même tout simplement valable, dans ces nouvelles conditions ? Pour répondre à cette question, plusieurs approches peuvent être utilisées. La plus simple consiste à vérifier que « l'espace climatique » dans lequel le modèle utilisé a été calibré ou entraîné représente bien les conditions climatiques futures. Cela peut être fait variable climatique par variable climatique (Guilpart *et al.*, 2022), ou pour plusieurs variables climatiques à la fois (Meyer et Pebesma, 2021). Dans tous les cas, plus le modèle utilisé a été entraîné sur une large gamme de conditions climatiques, plus son domaine de validité est grand. Cette approche est assez souvent mise en œuvre pour les modèles statistiques et de machine learning. Cependant, elle peut être difficile à mettre en œuvre dans le cas des modèles mécanistes, car les paramètres décrivant les mécanismes peuvent avoir été calibrés sur des jeux de données très différents et spécifiques à chaque mécanisme. Dans ce cas, il apparaît toutefois nécessaire de s'assurer que les modèles utilisés ont été évalués dans des conditions climatiques suffisamment similaires à celles ayant servi à leur élaboration.

L'implication des acteurs dans le design et l'évaluation des simulations

Les acteurs concernés par l'impact du changement climatique sur les cultures peuvent être associés aux démarches de modélisation. Ces acteurs sont nombreux (agriculteurs, conseillers, coopératives, pouvoirs publics, etc.) et peuvent être associés de différentes manières. Les approches de modélisation participative sont reconnues pour améliorer la connaissance des parties prenantes (modélisateurs et acteurs impliqués) sur le fonctionnement du système considéré ainsi que pour favoriser l'appropriation des résultats et la mise en œuvre des solutions identifiées (Challinor *et al.*, 2018; Voinov et Bousquet, 2010). L'intérêt des approches de modélisation participative dans la perspective de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique sera traité au chapitre 13. Toutefois, les acteurs peuvent également être associés aux études d'impact du changement climatique, notamment pour contribuer : (1) au choix des scénarios climatiques, (2) à la définition de la période future évaluée ainsi qu'à la période historique de référence, (3) à la définition des critères d'évaluation des simulations (rendement moyen, stabilité, impacts d'événements extrêmes, critères de qualité de la production agricole, etc.).

► Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les quatre grands types de modèles biophysiques d'estimation des impacts du changement climatique sur les cultures : les modèles mécanistes, les modèles statistiques et de machine learning, les modèles de niche écologique et la métamodélisation. Chaque type de modèle présente des avantages et des inconvénients : le choix du ou des modèles dépend des objectifs poursuivis.

Ainsi, les modèles mécanistes sont appréciés pour leurs fondements biophysiques explicites, car les principaux mécanismes régissant la croissance et le développement des cultures (en interaction avec les pratiques agricoles et l'environnement) y sont représentés. La représentation explicite des pratiques agricoles dans ces modèles permet également d'évaluer certaines stratégies d'adaptation au changement climatique par simulation, par exemple la modification des dates de semis, du choix des variétés (groupes de maturité) et de l'irrigation. En revanche, le développement de ces modèles représente un travail considérable, et s'il existe des modèles pour les principales cultures comme le blé, le maïs, le riz ou le soja, c'est loin d'être le cas pour toutes les espèces végétales cultivées. De plus, ces modèles, qui fonctionnent généralement au pas de temps journalier, nécessitent de grandes quantités de données d'entrée qui peuvent être difficiles à collecter à l'échelle mondiale. Leur utilisation à cette échelle peut également générer des temps de calcul importants. En conséquence, les modèles mécanistes sont ceux qui sont le plus couramment utilisés à l'échelle locale, et sont moins dominants dans leur utilisation à l'échelle mondiale.

Les modèles statistiques et de machine learning peuvent être développés plus rapidement en utilisant des données facilement accessibles, comme les statistiques officielles de rendements à différentes échelles administratives (département, région, pays) et les données climatiques historiques. Ces modèles permettent ainsi de valoriser ces très grandes quantités de données, et peuvent s'appliquer rapidement à un nombre de cultures plus important que les modèles mécanistes. Le temps de calcul est plus court, et les données d'entrées plus facilement accessibles, même à l'échelle mondiale, surtout s'il s'agit de données climatiques. Cependant, l'interprétabilité de ces modèles est jugée parfois limitée (bien que le développement récent de méthodes comme Shapley amène à revoir cette appréciation) et leur capacité à simuler des adaptations au changement climatique et à tenir compte de l'effet du CO₂ est limitée. Pour ces raisons, les modèles statistiques et de machine learning sont plus couramment utilisés à des échelles larges qu'à des échelles locales.

Les modèles de niche écologique, quant à eux, sont intéressants pour apprécier la possibilité ou non de cultiver une espèce du point de vue climatique (et parfois édaphique), mais ne simulent pas le rendement des cultures et semblent donc plus utiles pour discuter du choix des cultures, que de l'impact du changement climatique sur la production de telle ou telle culture.

Enfin, il est important de préciser que la capacité des modèles actuels à simuler certains impacts du changement climatique est encore limitée. C'est le cas par exemple des dégâts et des pertes causés par les bioagresseurs, de l'impact d'événements climatiques extrêmes, de la réponse des cultures à des stress multiples (par exemple les interactions entre températures élevées, stress hydrique, stress azoté et CO₂), ou encore de la qualité des produits agricoles (par exemple la teneur en protéines). Ces limites constituent des défis pour la recherche au cours des années à venir.

Enfin, au-delà des modèles eux-mêmes, la façon dont ils sont utilisés est également importante. Plusieurs enseignements méthodologiques peuvent être tirés des expériences passées concernant l'élaboration d'un plan de simulation (choix des scénarios climatiques, des périodes temporelles pour la référence historique et le futur) et l'analyse des résultats (critères d'évaluation considérés, sources d'incertitudes et leur prise en compte, explication des résultats). Ainsi, on peut désormais considérer comme un

consensus scientifique la recommandation d'utiliser plusieurs scénarios climatiques, plusieurs modèles climatiques et plusieurs modèles de culture (au moins dans le cas des modèles mécanistes) pour évaluer correctement les principales sources d'incertitudes sur les résultats. L'association des acteurs concernés par les résultats des simulations dans une démarche participative est également considérée comme un élément contribuant significativement à améliorer la pertinence des simulations et de leur analyse.

► Références

- Bassu S., Brisson N., Durand J.L., Boote K., Lizaso J., Jones J.W. *et al.*, 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?, *Global Change Biology*, 20, 2301-2320, <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>.
- Beillouin D., Schauberger B., Bastos A., Ciais P., Makowski D., 2020. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375, 20190510, <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>.
- Ben-Ari T., Boé J., Ciais P., Lecerf R., Van der Velde M., Makowski D., 2016. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France, *Nature Communications*, 9, 1627, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.
- Boote K.J., Jones J.W., White J.W., Asseng S., Lizaso J.I., 2013. Putting mechanisms into crop production models, *Plant, Cell & Environment*, 36, 1658-1672, <https://doi.org/10.1111/pce.12119>.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D. *et al.*, 2003. An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7).
- Challinor A.J., Müller C., Asseng S., Deva C., Nicklin K.J., Wallach D. *et al.*, 2018. Improving the use of crop models for risk assessment and climate change adaptation, *Agricultural Systems*, 159, 296-306, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.07.010>.
- Cho S.J., McCarl B.A., 2017. Climate change influences on crop mix shifts in the United States, *Scientific Reports*, 7, 40845, <https://doi.org/10.1038/srep40845>.
- Cooper M., Voss-Fels K.P., Messina C.D., Tang T., Hammer G.L., 2021. Tackling G × E × M interactions to close on-farm yield-gaps: creating novel pathways for crop improvement by predicting contributions of genetics and management to crop productivity, *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1625-1644, <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03812-3>.
- De Sousa L.M., Poggio L., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Riberio E. *et al.*, 2020. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *Soil*, 7(1), 217-240, <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>.
- De Souza Nôia Jr R., Deswarte J.C., Cohan J.P., Martre P., van der Velde M., Lecerf R. *et al.*, 2023. The extreme 2016 wheat yield failure in France, *Global Change Biology*, 29, 3130-3146, <https://doi.org/10.1111/gcb.16662>.
- De Wit A., Boogaard H., Fumagalli D., Janssen S., Knapen R., van Kraalingen D. *et al.*, 2019. 25 years of the WOFOST cropping systems model, *Agricultural Systems*, 168, 154-167, <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.018>.
- Falconnier G.N., Vermue A., Journet E.P., Christina M., Bedoussac L., Justes E., 2020. Contrasted response to climate change of winter and spring grain legumes in southwestern France, *Field Crops Research*, 259, 107967, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107967>.
- Fick S.E., Hijmans R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 37, 4302-4315, <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Franke J.A., Müller C., Elliott J., Ruane A.C., Jägermeyr J., Balkovic J. *et al.*, 2020. The GGCMI Phase 2 experiment: Global gridded crop model simulations under uniform changes in CO₂, temperature, water, and nitrogen levels (protocol version 1.0), *Geoscientific Model Development*, 13, 2315-2336, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2315-2020>.
- Gaudio N., Escobar-Gutiérrez A.J., Casadebaig P., Evers J. B., Gérard F., Louarn G. *et al.*, 2019. Current knowledge and future research opportunities for modeling annual crop mixtures. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 20, <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0562-6>.

- Guilpart N., Iizumi T., Makowski D., 2022. Data-driven projections suggest large opportunities to improve Europe's soybean self-sufficiency under climate change, *Nature Food*, 3, 255-265, <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00481-3>.
- Hirzel A.H., Le Lay G., 2008. Habitat suitability modelling and niche theory, *Journal of Applied Ecology*, 45, 1372-1381, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01524.x>.
- Iizumi T., Ramankutty N., 2016. Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change, *Environmental Research Letters*, 11, 034003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003>.
- 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*, Genève, Suisse, p. 35-115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Jägermeyr J., Müller C., Ruane A.C., Elliott J., Balkovic J., Castillo O. *et al.*, 2021a. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models, *Nature Food*, 2, 873-885, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.
- Jägermeyr J., Müller C., Ruane A., Elliott J., Balkovic J., Castillo O. *et al.*, 2021b. Climate change signal in global agriculture emerges earlier in new generation of climate and crop models, *preprint available at Research Square*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-101657/v1>.
- Jiang Z., Liu C., Ganapathysubramanian B., Hayes D.J., Sarkar S., 2020. Predicting county-scale maize yields with publicly available data, *Scientific Reports*, 10, 14957, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71898-8>.
- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A. *et al.*, 2003. The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy*, 18, 235265, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
- Jones J.W., Antle J.M., Basso B., Boote K.J., Conant R.T., Foster I. *et al.*, 2017. Brief history of agricultural systems modeling, *Agricultural Systems*, 155, 240-254, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>.
- Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D. *et al.*, 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *European Journal of Agronomy*, 18, 267-288, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9).
- Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production, *Nature*, 529, 84-87, <https://doi.org/10.1038/nature16467>.
- Lischeid G., Webber H., Sommer M., Nendel C., Ewert F., 2022. Machine learning in crop yield modeling: A powerful tool, but no surrogate for science, *Agricultural and Forest Meteorology*, 312, 108698, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108698>.
- Li T., Angeles O., Iii M.M., Manalo E., Manalili M.P., Radanielson A. *et al.*, 2017. From ORYZA2000 to ORYZA(v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments, *Agricultural and Forest Meteorology*, 237-238, 246-256, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.025>.
- Liu B., Asseng S., Müller C., Ewert F., Elliott J., Lobell D.B. *et al.*, 2016. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods, *Nature Climate Change*, 6, 1130-1136, <https://doi.org/10.1038/nclimate3115>.
- Lobell D.B., 2014. Climate change adaptation in crop production: Beware of illusions, *Global Food Security*, 3, 72-76, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.05.002>.
- Lobell D.B., Burke M.B., 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1443-1452, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>.
- Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980, *Science*, 333, 616-620, <https://doi.org/10.1126/science.1204531>.
- Makowski D., Asseng S., Ewert F., Bassu S., Durand J.L., Li T. *et al.*, 2015. A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration, *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 483-493, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.013>.
- Makowski D., Marajo-Petitzon E., Durand J.L., Ben-Ari T., 2020. Quantitative synthesis of temperature, CO₂, rainfall, and adaptation effects on global crop yields, *European Journal of Agronomy*, 115, 126041, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126041>.

- Manners R., Varela-Ortega C., Van Etten J., 2020. Protein-rich legume and pseudo-cereal crop suitability under present and future European climates, *European Journal of Agronomy*, 113, 125974, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125974>.
- Marteau-Bazouni M., Jeuffroy M.-H., Guilpart N., (2024). Grain legume response to future climate and adaptation strategies in Europe: A review of simulation studies, *European Journal of Agronomy*, 153, 127056, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127056>.
- Martre P., Wallach D., Asseng S., Ewert F., Jones J.W., Rötter R.P. *et al.*, 2015. Multimodel ensembles of wheat growth: Many models are better than one, *Global Change Biology*, 21, 911-925, <https://doi.org/10.1111/gcb.12768>.
- Mehrabi Z., Ramankutty N., 2019. Synchronized failure of global crop production, *Nature Ecology and Evolution*, 3, 780-786, <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0862-x>.
- Meyer H., Pebesma E., 2021. Predicting into unknown space? Estimating the area of applicability of spatial prediction models, *Methods in Ecology and Evolution*, 12, 1620-1633, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13650>.
- Monfreda C., Ramankutty N., Foley J.A., 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000, *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 1-19, <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>.
- Müller C., Elliott J., Chryssanthacopoulos J., Arneth A., Balkovic J., Ciais P. *et al.*, 2017. Global gridded crop model evaluation: Benchmarking, skills, deficiencies and implications, *Geoscientific Model Development*, 10, 1403-1422, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1403-2017>.
- O'Neill B.C., Kriegler E., Riahi K., Ebi K.L., Hallegatte S., Carter T.R. *et al.*, 2014. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change*, 122, 387-400, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>.
- Parent B., Leclerc 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, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 115, 10642-10647, <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>.
- Peter B.G., Messina J.P., Lin Z., Snapp S.S., 2020. Crop climate suitability mapping on the cloud: a geovisualization application for sustainable agriculture, *Scientific Reports*, 10, 15487, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72384-x>.
- Ramanantenasoa M.M.J., Génermont S., Gilliot J.M., Bedos C., Makowski D., 2019. Meta-modeling methods for estimating ammonia volatilization from nitrogen fertilizer and manure applications, *Journal of Environmental Management*, 236, 195-205, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.066>.
- Ramirez-Cabral N.Y.Z., Kumar L., Taylor S., 2016. Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas, *Agricultural and Forest Meteorology*, 218-219, 102-113, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.002>.
- Ramirez-Villegas J., Jarvis A., Läderach P., 2013. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture : The EcoCrop model and a case study with grain sorghum, *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 67-78, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005>.
- Ray D.K., West P.C., Clark M., Gerber J.S., Prishchepov A.V., Chatterjee S., 2019. Climate change has likely already affected global food production, *PLoS ONE*, 14, 1-18, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>.
- Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A.C., Boote K.J., Thorburn P. *et al.*, 2013. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 166-182, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>.
- Ryo M., Angelov B., Mammola S., Kass J.M., Benito B.M., Hartig F., 2021. Explainable artificial intelligence enhances the ecological interpretability of black-box species distribution models, *Ecography*, 44, 199-205, <https://doi.org/10.1111/ecog.05360>.
- Schauberger B., Ben-Ari T., Makowski D., Kato T., Kato H., Ciais P., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century, *Scientific Reports*, 8, 1-12, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>.

- Silva J.V., Heerwaarden J. van, Reidsma P., Laborte A.G., Tesfaye K., van Ittersum M.K., 2023. Big data, small explanatory and predictive power: Lessons from random forest modeling of on-farm yield variability and implications for data-driven agronomy, *Field Crops Research*, 302, 109063, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109063>.
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araújo M.B., 2009. BIOMOD - A platform for ensemble forecasting of species distributions, *Ecography*, 32, 369-373, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>.
- Toreti A., Deryng D., Tubiello F.N., Müller C., Kimball B.A., Moser G. *et al.*, 2020. Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO₂ on crops, *Nature Food*, 1, 775-782, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00195-4>.
- Van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wolf J., Tittonell P., Hochman Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance – A review, *Field Crops Research*, 143, 4-17, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>.
- Van Klompenburg T., Kassahun A., Catal C., 2020. Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>.
- Vanuytrecht E., Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Heng L.K. *et al.*, 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model, *Environmental Modelling and Software*, 62, 351-360, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>.
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Kathy H. *et al.*, 2011. The representative concentration pathways : an overview, *Climatic Change*, 109, 5-31, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Vautard R., Van Oldenborgh G.J., Bonnet R., Li S., Robin Y., Kew S. *et al.*, 2023. Human influence on growing-period frosts like in early April 2021 in central France, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 1045-1058, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1045-2023>.
- Voinov A., Bousquet F., 2010. Modelling with stakeholders, *Environmental Modelling and Software*, 25, 1268-1281, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>.
- Wallach D., Palosuo T., Thorburn P., Hochman Z., Gourdain E., Andrianasolo F. *et al.*, 2021. The chaos in calibrating crop models: Lessons learned from a multi-model calibration exercise, *Environmental Modelling and Software*, 145, 105206, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105206>.
- Webber H., Ewert F., Olesen J.E., Müller C., Fronzek S., Ruane A.C. *et al.*, 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe, *Nature Communications*, 9, 4249, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>.
- Wilcox J., Makowski D., 2014. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies, *Field Crops Research*, 156, 180-190, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.008>.
- Yang H., Grassini P., Cassman K.G., Aiken R.M., Coyne P.I., 2017. Improvements to the Hybrid-Maize model for simulating maize yields in harsh rainfed environments, *Field Crops Research*, 204, 180-190, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.019>.
- Zabel F., Müller C., Elliott J., Minoli S., Jägermeyr J., Schneider J.M. *et al.*, 2021. Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties, *Global Change Biology*, 27, 3870-3882, <https://doi.org/10.1111/gcb.15649>.
- Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W., 2014. Global agricultural land resources – A high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions, *PLoS ONE*, 9, e114980, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107522>.
- Zhu P., Abramoff R., Makowski D., Ciais P., 2021. Uncovering the past and future climate drivers of wheat yield shocks in Europe with machine learning, *Earth's Future*, 9, 1-13, <https://doi.org/10.1029/2020EF001815>.

Chapitre 5

Approches économiques de l'évaluation d'impact du changement climatique sur l'agriculture

Loïc Henry

L'augmentation des températures et la multiplication des événements météorologiques extrêmes, comme les sécheresses ou les gelées tardives, affectent déjà la production agricole en France et vont l'affecter davantage. Les rendements agricoles sont altérés et deviennent plus incertains. Les revenus des agriculteurs fluctuent davantage à court terme et le chemin de leur évolution à long terme est pavé d'incertitudes. À plus grande échelle, ces effets individuels se cumulent et provoquent des chocs d'offre sur les marchés des commodités agricoles. Ces déséquilibres entraînent des variations de prix amplifiant les effets sur les coûts de production et sur les revenus des agriculteurs et affectant le prix des biens alimentaires, ce qui menace la sécurité alimentaire. En retour, les différents acteurs du secteur agricole peuvent adopter des stratégies d'adaptation, qui vont du changement de pratiques agricoles à la relocalisation de la production dans une zone plus convenable, pour modérer ou éviter les dommages et pour exploiter des opportunités (voir chapitre 11 et 12).

Ce chapitre donne un aperçu des travaux en économie sur les effets de ces changements sur l'agriculture. En tant que discipline qui étudie les choix individuels de production et leurs interactions sur le marché, l'économie fournit un cadre pour observer la réaction des producteurs agricoles aux variations des conditions climatiques. L'économie agricole mobilise les outils de la microéconomie de la production, qui modélise les choix de production en quantité et en qualité à partir des facteurs de production, des préférences des producteurs et des éléments de contexte, incluant les conditions météorologiques et les anticipations de climat futur. Les facteurs de production incluent les ressources nécessaires à la production agricole, comme les intrants (engrais, semences), le travail, et l'utilisation des terres. Les agriculteurs décident de ces quantités de facteurs en fonction de leurs coûts, de leur rendement et des possibilités de substitution. Les changements de conditions climatiques influencent les rendements et les coûts associés à ces facteurs ainsi que les aléas liés à la production. Ces changements se manifestent par différents canaux de transmission, comme une augmentation de la température ou une raréfaction de la disponibilité en eau qui affecte directement les rendements des terres. Les modèles

microéconomiques formulent des hypothèses sur les comportements des agriculteurs face aux variations de coûts et de rendements des facteurs de production et face à l'incertitude. Ils constituent un cadre théorique qui étudie comment les décisions de production des agriculteurs s'adaptent au changement climatique à travers un calcul économique. Ces modèles sont ensuite testés grâce aux données disponibles telles que les statistiques de production et les prix de marché. Ces exercices empiriques viennent valider les modèles théoriques et permettent finalement d'estimer les coûts du changement climatique supportés par les agriculteurs et le reste de l'économie, tout en tenant compte de leurs comportements d'adaptation.

Ce chapitre expose ces travaux de recherche dans le contexte de la France et de l'agriculture des pays occidentaux. L'analyse des impacts économiques du changement climatique tend à se concentrer sur le cas des pays tropicaux, *a priori* en raison de la forte dépendance de leur économie au secteur agricole et de l'intensité du changement climatique dans ces régions (Cruz et Rossi-Hansberg, 2024; Kalkuhl et Wenz, 2020). En contrepartie, l'analyse du cas des pays tempérés demeure relativement moins développée. Certains travaux en langue anglaise effectuent des recensions détaillées de cette littérature (Antle et Stöckle, 2017; Ortiz-Bobea, 2021). Ce chapitre aspire alors à offrir un aperçu en français des résultats émanant des études menées en France ou sur des zones géographiques dont les systèmes agricoles sont proches.

La première partie expose des approches mécaniques, où des modèles microéconomiques intègrent les effets biophysiques du changement climatique sur les rendements. Ces approches se concentrent souvent sur les décisions d'une ferme individuelle, dite représentative. La deuxième partie couvre les approches économétriques et statistiques, qui cherchent à déduire les effets du changement climatique à partir de données régionales. La troisième partie présente les modèles d'équilibre général, où le secteur agricole d'un pays est alors considéré avec son intégration dans les échanges de biens et services avec d'autres pays également affectés par le changement climatique, permettant ainsi une analyse à l'échelle mondiale.

► Les approches mécaniques de l'évaluation d'impact

Définition des approches mécaniques

Un premier champ analyse les effets du changement climatique sur l'agriculture en utilisant des modèles de la théorie microéconomique de la production combinés à des modèles biophysiques. Cette approche peut être qualifiée de mécanique, car elle tient à représenter finement les ajustements des décisions des agriculteurs à des changements de conditions climatiques. Elle modélise le calcul économique effectué par les agriculteurs lorsqu'ils décident de leur plan de production. Les agriculteurs y sont représentés comme des agents qui transforment leurs facteurs de production (comme la terre, le travail ou encore les intrants chimiques) en produits agricoles (tels que des céréales ou du lait). Ils choisissent les niveaux de facteurs de production qui maximisent leur utilité, souvent simplifiée en profit, pour des prix de vente et de facteurs donnés. Les conditions météorologiques s'insèrent dans ce problème en affectant le processus de production, notamment le rendement de la terre. Cette représentation du comportement des agriculteurs permet de simuler les effets du changement climatique. Ces modèles montrent par exemple les

changements de culture ou les changements d'utilisation d'intrants chimiques associés aux variations des rendements des terres tels qu'ils permettent de maintenir une situation optimale en matière de profit.

Pour simuler l'impact sur l'offre agricole, ces modèles sont couplés avec des modèles climatiques et des modèles biophysiques ou agronomiques. Les modèles climatiques fournissent des simulations des conditions météorologiques futures sous plusieurs scénarios. L'effet des variables météorologiques sur la croissance des plantes est ensuite appréhendé à partir du modèle agronomique. Les rendements obtenus viennent ensuite alimenter le modèle microéconomique de production agricole.

Le modèle économique nécessite des données d'entrée sur les scénarios climatiques et sur l'évolution des rendements. Ces données sont obtenues au sein de projets interdisciplinaires, ou bien à partir de résultats de simulation publiés. L'assemblage des modèles requiert une collaboration étroite entre des équipes de recherche issues de plusieurs disciplines. Des modèles européens ont été développés par des instituts comme l'IIASA (modèle Globiom, voir par exemple Leclère *et al.*, 2014), le JRC (modèle Capri, avec par exemple Shrestha *et al.*, 2013), ou INRAE (modèle AROPAj, par exemple Leclère *et al.*, 2013). Ces modèles peuvent aussi servir à estimer les effets des politiques agricoles d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Ils permettent ainsi d'étudier conjointement les impacts, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (par exemple Meijl *et al.*, 2018).

Ce caractère multidisciplinaire a l'avantage de fournir une compréhension explicite des phénomènes biophysiques associés au changement climatique. Ces modèles offrent par exemple la possibilité d'explorer les effets économiques associés à des impacts autres que les variations de température et de précipitations, comme la disponibilité en eau (voir par exemple Robert *et al.*, 2018), ou l'effet fertilisant de la concentration en CO₂ sur les plantes.

En contrepartie, les incertitudes liées aux résultats des différents modèles se cumulent. Les variables météorologiques futures sont simulées avec une certaine distribution de probabilité, à laquelle s'ajoute l'incertitude liée à la modélisation de leurs effets biophysiques sur les plantes. Néanmoins, il est possible de tenir compte explicitement de ces incertitudes dans la décision des agriculteurs (Graveline, 2020). De plus, le niveau d'incertitude statistique peut être évalué en comparant les résultats issus d'un ensemble de modèles climatiques ou biophysiques, comme l'initiative de l'Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) qui a pour objectif de fournir un cadre de comparaison des résultats entre les modèles de simulation de culture (Rosenzweig *et al.*, 2018).

Un aperçu des approches mécaniques

Les approches mécaniques ont émergé dans les années 1990 pour étudier les effets du changement climatique sur l'agriculture, notamment aux États-Unis (Adams *et al.*, 1990; Adams *et al.*, 1995; Easterling *et al.*, 1992) et à l'échelle mondiale (Rosenzweig et Parry, 1994). Les premiers travaux ont extrapolé directement les impacts économiques à partir des effets biophysiques sur les rendements des cultures à système de prix inchangé et sans modélisation explicite des ajustements des agriculteurs, ce que l'on appelle le «*dumb farmer scenario*» (scénario de «l'agriculteur idiot»).

En neutralisant les marges d'adaptation des agriculteurs, ces travaux ont alors tendance à fournir une fourchette haute des diminutions de la production agricole induite par le changement climatique.

Pour intégrer les adaptations, il faut préalablement caractériser les coûts et les effets sur les rendements associés à un changement de facteur de production ou de pratiques agricoles lorsque le modèle microéconomique comporte ce niveau de précision. Ces ajustements de pratiques incluent les changements de dates de semis, de variétés de cultures, de méthodes de travail du sol, de fertilisation, de protection des cultures ou encore d'irrigation. Ces ajustements technico-économiques estimés sont ensuite intégrés au modèle. La résolution du modèle détermine quelles décisions maximiseraient les profits et évalue les rendements et les revenus nets pour les différents scénarios de climat.

Les approches mécaniques tendent à montrer que les adaptations des agriculteurs permettraient de limiter les effets négatifs du changement climatique. En couplant le modèle microéconomique AROPAj avec le modèle de culture Stics, Leclère *et al.* (2013) montrent que l'adaptation par les pratiques de gestion des cultures (rotation et longueur des cycles de culture) et les réallocations des terres à l'échelle de la ferme (changement des variétés et modification de la taille des cultures) permettent d'atténuer fortement les pertes de rendements et de revenus agricoles par rapport au *dumb farmer scenario*. Ce modèle d'offre agricole intègre plus d'un millier de fermes représentatives de l'hétérogénéité des systèmes agricoles de l'Union européenne à quinze pays. Les agriculteurs répondent aux pertes de rendements induites par le changement climatique par un accroissement de l'utilisation d'engrais, une diminution de la surface pâturée et un accroissement de la surface en céréales et en oléagineux. Les résultats montrent des effets hétérogènes sur le revenu à l'hectare en France : les régions du pourtour méditerranéen observent une perte du revenu à l'hectare, à l'inverse des régions au nord de la Loire. Cependant, ce travail n'intègre pas explicitement les contraintes d'utilisation en eau du système agricole. D'autres modèles microéconomiques, par exemple Graveline et Mérel (2014), intègrent alors explicitement l'eau dans la fonction de production pour tenir compte de la marge intensive, c'est-à-dire de la possibilité d'adapter la dose d'eau d'irrigation par unité de terre.

En tant que modèles d'offre, ces premiers travaux n'intègrent pas de mécanismes sur la formation des prix (les prix y sont considérés comme exogènes et sont des données d'entrée). D'autres travaux adossent alors à ces modèles une modélisation du marché des commodités agricoles (Hristov *et al.*, 2023; Nelson *et al.*, 2014). Ces modèles d'équilibre partiel ou général permettent alors d'envisager les boucles de rétroaction que les modifications de la production agricole engendrent sur l'offre et donc sur les prix (par exemple plus de quantités offertes impliquent une baisse des prix). Cette endogénéisation des prix se fait alors au détriment de la finesse de l'échelle d'analyse des résultats au niveau des décisions et des contraintes techniques agricoles. Ces modèles montrent que les pertes de rendements ont alors tendance à être réduites par une extension des surfaces cultivées induite par les hausses de prix. Nous verrons plus en détail ces mécanismes dans la troisième section de ce chapitre traitant des modèles économiques globaux.

Les enjeux des approches mécaniques

Les approches mécaniques rencontrent des difficultés à capturer pleinement les adaptations des agriculteurs, en raison notamment de la disponibilité limitée des données

et de la complexité de la modélisation du processus d'adaptation. La calibration des paramètres clés d'un modèle est un exercice délicat. Ces paramètres concernent notamment l'évaluation de la réponse de la quantité produite à une modification de pratique, de prix d'un intrant ou d'une culture. Ces paramètres sont calibrés de sorte que les simulations du modèle permettent de répliquer les observations de quantité produite ou de mise en surface agrégée. Pour cela, ces travaux utilisent des données issues de tableaux input-output ou de données comptables agricoles comme celles du Réseau d'information comptable agricole (Rica). Le principal obstacle rencontré par le modélisateur réside dans la rareté des informations techniques et économiques disponibles concernant les nouvelles pratiques (rendement, utilisation des facteurs de production, prix, synergies entre pratiques), d'autant plus délicate que l'échelle d'analyse est fine. De plus, intégrer un grand nombre d'ajustements dans le modèle permet une modélisation précise, mais introduit des non-linéarités et non-convexités rendant l'optimisation du problème difficile. Le modélisateur doit ainsi trouver un équilibre entre la finesse des détails du modèle et les difficultés de sa calibration et de sa résolution. Par exemple, Graveline et Mérel (2014) développent un modèle simplifié de production régionale à deux facteurs de production, la terre et l'eau, présentant l'avantage d'une calibration parcimonieuse nécessitant des données départementales de production, de prix et de coûts facilement accessibles. À l'inverse, le modèle AROPAj modélise avec détails l'offre d'un millier de fermes représentatives de la production agricole européenne à partir d'un grand nombre de variables de décision, ce qui nécessite la calibration de près d'une centaine de paramètres par ferme, pour lesquelles certaines données sont manquantes (Jayet *et al.*, 2023).

Tout en étant limitée par la disponibilité des données, l'amélioration de l'hétérogénéité spatiale des systèmes agricoles constitue un autre enjeu majeur. Il est impératif de rendre compte simultanément de l'hétérogénéité biophysique (caractéristiques des sols) et socio-économique (notamment la taille des exploitations et leur productivité), qui définit les divers systèmes de production agricole dans l'espace. L'hétérogénéité incorporée dans le modèle AROPAj permet de mettre en lumière des effets du changement climatique sur les inégalités de revenu entre les régions, comme illustré dans l'étude de Ollier *et al.* (2024). Cependant, la compréhension de ces disparités spatiales à l'échelle de l'exploitation demeure sous-exploitée, principalement en raison de la confidentialité des données qui contraint leurs spatialisations. Une modélisation spatiale plus fine offre par ailleurs la possibilité d'associer la problématique des effets du changement climatique à d'autres problématiques environnementales locales, notamment celles liées à la biodiversité ou à la disponibilité en eau.

Un dernier enjeu concerne le rôle joué par l'incertitude portant sur les conditions climatiques futures et sur les effets de ces dernières sur les conditions de production. Les travaux présentés dans ce chapitre supposent que l'agriculteur se situe dans un environnement déterministique, où les prix et ses profits actuels et à venir sont connus avec certitude. Cependant, la plupart des décisions d'adaptation au changement climatique sont prises par les agriculteurs dans un contexte où ils ne connaissent qu'une distribution de probabilités associées à chaque résultat (une situation dite risquée), ou encore sans connaître l'ensemble des issues possibles (une situation dite d'incertitude). De nombreux cadres microéconomiques en économie agricole ont été développés pour être plus réalistes et pour prendre en compte des préférences et les attitudes

des agriculteurs face au risque et à l'incertitude et pour en étudier les conséquences sur leurs décisions (pour une revue détaillée, voir Carpentier *et al.*, 2015). Certains travaux couplent ces modèles microéconomiques dans un univers risqué à un modèle biophysique, et montrent que les préférences des agriculteurs vis-à-vis du risque sont un déterminant des décisions d'adaptation au changement climatique. Par exemple, Finger *et al.* (2007) montrent que le développement de la culture de blé d'hiver en Suisse en réponse à l'allongement de la saison de croissance est d'autant plus faible que les agriculteurs sont réfractaires au risque.

► Les approches économétriques de l'évaluation d'impact

Définition des approches économétriques

Si l'approche mécanique vise à représenter le cadre de décision des agriculteurs et leurs ajustements explicitement, ce n'est pas le cas des approches économétriques d'évaluation d'impact du changement climatique. Elles utilisent des données de production passées pour identifier l'influence des variables météorologiques sur les performances agricoles. Ici, la structure imposée aux ajustements de la production est minimale ou absente, car ce sont les données de production observées qui sont expliquées par la réalisation des aléas météorologiques, en cherchant si possible à établir une causalité. Ces travaux sont apparus dans les années 1990, en réponse aux approches mécaniques jugées peu flexibles dans leur représentation de l'adaptation des agriculteurs.

Les méthodes économétriques partent du principe que l'on peut évaluer les impacts futurs en tenant compte des adaptations actuelles sans modéliser explicitement les choix des agriculteurs. L'hypothèse clé est que les agriculteurs sont déjà adaptés à leur climat local. Ils auraient déjà adopté les pratiques de production et fait les choix de production qui sont les plus avantageux compte tenu du climat local, des prix et de la technologie. Il suffirait donc d'observer les variations de production ou de revenu, conjointement aux variations des conditions météorologiques, pour mesurer les effets du changement climatique, tout en tenant compte des ajustements réalisés.

Contrairement aux approches biophysiques, les approches économétriques reposent sur l'utilisation directe des données de production agricole. Ces données, souvent agrégées temporellement et spatialement, posent certains défis. Si les données météorologiques sont caractérisées par leur finesse géographique ainsi que par leur fréquence quotidienne, voire horaire, les données économiques sont à l'inverse généralement annuelles et parfois agrégées au niveau régional. Les données météorologiques, souvent sous la forme de mailles (*gridded data*), doivent alors être transformées en indicateur agroclimatique (voir chapitre 3), c'est-à-dire en une mesure représentative de l'impact de la météo observée sur le rendement dans la zone et pendant la période associée aux données économiques. Les degrés-jours, utilisés en agronomie, permettent d'agréger temporellement l'exposition aux températures au cours d'une période de culture. Les conditions météorologiques sont ensuite moyennées à l'échelle d'une région, souvent en pondérant chaque maille dans la région par sa part dans la surface agricole régionale. Si cette approche se prête bien aux températures, elle est plus difficile à appliquer aux précipitations, qui sont spatialement discontinues.

Un aperçu des différentes approches économétriques

L'approche ricardienne

Cette méthode utilise les variations dans l'espace des valeurs foncières et des variables météorologiques pour capturer les différences de valeurs foncières dues au climat (Mendelsohn *et al.*, 1994). La terre, en tant que facteur de production fixe, génère des rentes pour son propriétaire. La valeur de la terre est alors censée représenter le flux futur actualisé de ces rentes. L'approche tire son nom de la théorie de Ricardo (1817), qui postule que, dans un marché de concurrence pure et parfaite, la rente foncière agricole équivaut au profit découlant de la production agricole issue des terres. Si les rentes proviennent de conditions climatiques avantageuses, *toutes choses égales par ailleurs*, le climat sera alors capitalisé dans la valeur de la terre. Empiriquement, l'approche ricardienne tente ainsi de capturer la valeur marginale du climat en exploitant les variations en coupe transversale des valeurs foncières et des variables climatiques au sein d'une grande région. Cette identification est ensuite utilisée pour simuler les pertes de valeur des terres causées par le changement climatique.

La première mise en œuvre de cette méthode par Mendelsohn *et al.* (1994) concerne l'agriculture des États-Unis avec des données de valeurs foncières des terres agricoles issues du recensement agricole de 1978 et de 1982, agrégées à l'échelle des comtés. Les effets de la température et des précipitations pour chaque saison sur la valeur des terres sont estimés à l'aide d'une régression linéaire. Cette première estimation a mesuré des effets positifs du changement climatique sur l'agriculture américaine, contrastant avec les évaluations initiales des approches mécaniques. Cependant, les résultats de ce premier travail se sont montrés peu robustes à des spécifications économétriques différentes (soit en pondérant différemment les observations, soit en incorporant d'autres variables de contrôle). Notamment, Schlenker *et al.* (2005) ont montré que ce travail ne tient pas compte de l'existence de systèmes d'irrigation pour expliquer la valeur des terres. En contrôlant alors ce facteur, ils ont démontré que l'agriculture américaine subirait des dommages, en particulier dans les zones agricoles non irriguées, plus sensibles aux conditions météorologiques.

La méthode ricardienne a été mise en œuvre dans le cas français. Martin et Vaitkeviciute (2016) appliquent la méthode à partir d'un échantillon de plus de quinze mille transactions foncières réalisées en Côte-d'Or entre 1992 et 2008. Leur approche incorpore une partie des critiques exposées à l'approche ricardienne, notamment en tenant compte des fortes corrélations entre variables explicatives, comme entre l'altitude et les conditions climatiques des parcelles. Elles montrent une hausse moyenne des valeurs foncières dans la région avec un changement climatique conséquent, mais notent de fortes disparités à l'échelle départementale, qui s'expliquent par la diversité de la qualité des terres dans leur capacité à servir de support à une agriculture adaptée à ce climat.

Enfin, Vaitkeviciute *et al.* (2019) développent une approche ricardienne à l'échelle européenne. L'originalité de leur approche réside à la fois dans la prise en compte de l'autocorrélation spatiale afin d'améliorer la fiabilité de l'estimation, et dans le choix de variables climatiques pertinentes. Leurs résultats montrent que les conditions climatiques en hiver semblent avoir également un effet sur la valeur des terres. Les auteurs observent des effets positifs des hausses de température sur la valeur des terres à long terme, bien que certaines régions, comme le pourtour méditerranéen,

subissent une baisse. Ces résultats sont cohérents avec la littérature de l'analyse ricardienne, qui a appliqué la méthode à plus de cinquante pays. Un consensus semble émerger de ces travaux quant à un avantage léger pour l'agriculture dans les régions de haute latitude comme le nord de l'Europe, et des impacts négatifs dans les régions de basse latitude comme le pourtour méditerranéen (Mendelsohn et Massetti, 2017 ; Van Passel *et al.*, 2017).

L'approche des données de panel

L'approche ricardienne utilise des données en coupe transversale, c'est-à-dire une seule observation par région ou par ferme. Les données de panel, en revanche, regroupent plusieurs observations pour chaque unité sur une période donnée. L'utilisation de données en coupe transversale expose l'estimation à des biais dus à l'omission de variables, comme l'a montré Ortiz-Boba (2020), qui souligne que la valeur des terres agricoles est aussi influencée par des facteurs non agricoles comme la pression urbaine. Si de tels facteurs non observés influencent les valeurs des terres sont omis et sont corrélés au climat, ce qui semble plausible, les estimations obtenues peuvent être biaisées. Pour pallier ces biais, les méthodes basées sur les données de panel sont plus favorables. Ces données permettent aux économètres d'exploiter de manière convaincante la variation *a priori* aléatoire d'une année à l'autre des conditions météorologiques, et d'offrir ainsi une base plus solide pour l'analyse des effets propres au changement climatique sur l'agriculture. En particulier, si les variables omises (inobservables) ne sont pas variables dans le temps mais seulement entre les individus, des méthodes par effets fixes (*within-group*) ou par variables instrumentales (*IV*) permettent d'estimer des modèles de façon convergente en filtrant les termes d'hétérogénéité non observée (voir par exemple Boumahdi et Thomas, 2008).

Le travail de Deschênes et Greenstone (2007) initie cette lignée de travaux en exploitant des données de panel aux États-Unis. L'objectif de l'approche telle que présentée par les auteurs est de contrôler les variables omises invariantes dans le temps qui pourraient être corrélées au climat par la méthode des effets fixes. Leur travail ne s'intéresse plus à l'explication de la valeur des terres, peu sensibles aux variations météorologiques annuelles, mais à celle du profit à l'hectare. Les auteurs disposent de données agrégées à l'échelle des comtés, désormais sur six années, ce qui leur permet d'exploiter la variation temporelle en plus de la variation entre comtés. L'identification empirique de l'effet repose maintenant sur les variations de profit conjointes aux variations météorologiques autour de la moyenne individuelle d'un comté, en contrôlant les effets des variables invariantes au cours du temps.

L'effet estimé est celui d'un choc météorologique de court terme sur le profit, car ce sont les variations météorologiques interannuelles qui sont mesurées et non des variations sur une longue période. À court terme, les agriculteurs ont une marge de manœuvre très limitée pour ajuster leurs décisions de production à des événements météorologiques non anticipés. L'approche saisit possiblement des effets plus préjudiciables qu'ils ne le seraient si l'agriculteur était en mesure d'ajuster pleinement les facteurs de production à long terme et d'adapter ses pratiques³¹. Néanmoins, le travail de Deschênes et Greenstone estime des effets légèrement positifs et faiblement

31. Il s'agit d'une application du théorème de Le Chatelier-Samuelson, voir par exemple Milgrom et Roberts (1996).

statistiquement significatifs des hausses de température et de précipitations sur les profits du secteur agricole américain. Les effets sont aussi fortement hétérogènes, avec comme exemple la Californie qui subirait des baisses de profit à l'hectare. Dans une réanalyse de ce travail, Fisher *et al.* (2012) obtiennent un impact plutôt négatif du changement climatique sur le profit agricole aux États-Unis, à partir d'une mesure différente du profit agricole et d'une spécification économétrique qui permet de mieux prendre en compte l'hétérogénéité géographique.

Pour la France, Bareille et Chakir (2023b) combinent l'approche ricardienne et celle par données de panel. Ils analysent comment les variations des prix des terres agricoles entre deux ventes successives d'une même parcelle sont expliquées par les différences climatiques sur la période. Leur approche suggère alors que le changement climatique va tendre à augmenter sensiblement la valeur des terres en France, plus que ce qu'une approche ricardienne ne l'aurait mesuré. Selon les auteurs, cet effet bénéfique est principalement dû à l'effet positif des températures d'été, à l'avenir plus chaudes, et qui permettraient de produire des cultures de plus grande valeur (comme des fruits ou des vignes). L'utilisation de données de vente répétées sur les mêmes parcelles permet ici de tenir compte des caractéristiques fixes dans le temps des parcelles que l'économètre n'observe pas, et qui concernent leur topographie ou leur qualité déterminant leur aptitude à produire des cultures plus lucratives dans un contexte de changement climatique.

Les effets de court terme et de long terme des impacts du changement climatique

L'approche par les données de panel n'est pas capable de prendre en compte l'adaptation à long terme au climat, principalement parce qu'elle repose sur des changements météorologiques annuels plutôt que sur des observations des différences climatiques et des différences de production à des intervalles plus longs. Deschênes et Greenstone (2007) soulignent la difficulté d'estimer l'impact des moyennes climatiques à long terme dans un modèle avec des effets fixes locaux en raison de la faible variation temporelle dans les variables climatiques, à moins de disposer d'un grand nombre d'années d'observation dans le panel et ainsi de mesurer des moyennes mobiles glissantes sur une longue période, comme vingt ou trente ans. De plus, si en réalité le changement climatique entraîne des effets directs négatifs sur les revenus, mais pouvant être atténués par l'adaptation des agriculteurs au climat, le risque est que la méthode en panel puisse exagérer les dommages causés par le changement climatique. Il est en effet délicat de tenir compte des effets des mesures d'adaptation, car ces dernières ne sont pas observées par l'économètre dans la plupart des bases de données, et elles varient au cours du temps de sorte que les effets fixes ne les éliminent pas.

Pour évaluer les effets à long terme, des méthodes comme celle de la longue différence (Burke et Emerick 2016) sont plus appropriées, en mesurant les impacts du climat sur des périodes d'au moins quinze ans. De cette manière, les économètres tiennent compte d'une adaptation à plus long terme des agriculteurs. L'approche ne modélise pas explicitement ces canaux d'adaptation, mais il s'agit d'envisager des changements technologiques, ou de mode de production qui deviennent possibles sur une longue période. Concrètement, l'économètre mesure désormais la différence moyenne de production agricole entre deux dates éloignées. Il analyse alors l'effet des différences de conditions météorologiques moyennes entre ces deux dates avec l'adaptation qui a pu s'opérer.

Le travail de Mérel et Gammans (2021) contribue à distinguer les réponses aux variations climatiques de court et de long terme. Ils montrent que les estimations en panel des variations de rendements agricoles constituent une moyenne pondérée des effets de court et de long terme des variations de conditions climatiques. L'estimation des effets de court et de long terme en panel dépend du rapport entre les variations individuelles au cours du temps et les variations en coupe transversale. Si la variation en coupe transversale (variabilité locale des rendements et du climat) dépasse la variation individuelle « temporelle » (changement au cours du temps des rendements et du climat), la fonction de réponse reflète davantage la réponse à long terme. En conséquence, les panels avec des unités partageant des climats similaires reflètent principalement la réponse à court terme, tandis que les panels englobant des unités avec des disparités climatiques substantielles se rapprochent de la réponse à long terme. Les auteurs appliquent ce résultat à des données françaises de rendement du blé. Ils montrent que les chocs météorologiques de court terme engendrent une perte de rendement de 10 %, et que l'adaptation à long terme permet de minorer ces pertes à 7 %.

Modèles statistiques de rendement des cultures

Ces travaux empruntent des outils économétriques très similaires aux travaux précédents et se concentrent sur les effets des conditions climatiques sur les rendements agricoles plutôt que sur les profits ou la valeur des terres (Lobell *et al.*, 2011; Moore *et al.*, 2017). Ces approches ont alors l'avantage de mesurer les effets du changement climatique par le canal de la quantité produite et laissent de côté les variations de prix. L'effet du changement climatique peut ainsi sembler plus évident qu'en utilisant une variable économique comme le revenu ou le profit qui couplent à la fois des variations de prix et de quantité.

Le travail de Mérel et Gammans (2021) cité ci-dessus emprunte cette approche en expliquant les effets sur les rendements du blé en France. Dans un travail plus détaillé, Gammans *et al.* (2017) estiment un modèle similaire de rendement du blé et de l'orge pour la France. Tous les rendements sont affectés négativement par les températures plus chaudes du printemps et de l'été. À partir de scénarios de changement climatique, les auteurs estiment des pertes de rendement moyen de 21 % pour le rendement du blé d'hiver, et de 17 % pour l'orge d'hiver à la fin du siècle.

Les enjeux liés à l'approche économétrique

Le principal désavantage de l'approche économétrique est qu'elle ne modélise pas explicitement les marges d'adaptation des agriculteurs pour atténuer les impacts directs sur les rendements. Notamment, l'enjeu de l'identification des comportements d'adaptation à long terme souligne cette limite. Ce problème est commun à l'ensemble des approches économiques, car il en est de même pour les modèles microéconomiques d'évaluation pour lesquels il est délicat de distinguer les effets directs du changement climatique des attitudes et des préférences des agriculteurs vis-à-vis du risque. La littérature récente à ce sujet continue à souligner l'importance d'une méthodologie économétrique rigoureuse afin d'identifier un effet de long terme du changement climatique, permettant de tenir compte de l'adaptation des agriculteurs (Mérel *et al.*, 2024).

De plus, sans modéliser la décision des agriculteurs, il est délicat de déterminer quelles stratégies d'adaptation sont mises en œuvre pour réduire les impacts directs sur la

production agricole. L'interprétation des résultats est donc limitée, faute de visibilité sur ces leviers d'adaptation. Par exemple, l'accès à l'eau d'irrigation est difficile à observer étant donné le manque de données sur les prélevements en eau ou sur les réseaux. Certaines des décisions d'adaptation entreprises pourraient même nuire aux conditions environnementales ou sociales, échappant ainsi à l'économétricien.

Ces méthodes peuvent s'élargir à d'autres variables pour analyser aussi les enjeux environnementaux et sociaux, et pas seulement l'atténuation des pertes de rendement. Deux exemples de travaux récents vont dans ce sens. Bayramoglu *et al.* (2020) estiment d'abord l'impact du changement climatique sur les changements d'usage des sols, puis leurs effets sur la biodiversité aquatique. Les auteures montrent que le changement climatique augmente la surface agricole intensive et les pâturages, au détriment de forêts ou de terres agricoles extensives, ce qui nuit à la diversité des poissons dans les rivières en France. Bareille *et al.* (2024) étudient les effets des chocs météorologiques sur les achats de pesticides en France à partir d'une méthode économétrique de données de panel. Ils montrent que les hausses de température augmentent les achats de fongicides et d'herbicides, surtout dans les régions productrices de céréales et d'oléagineux.

Un dernier enjeu concerne la fiabilité de l'utilisation des données passées pour anticiper les effets futurs du climat, surtout compte tenu d'une possible anticipation des futures conditions climatiques par les individus (Severen *et al.*, 2018), mais aussi à cause de l'incertitude sur le climat futur. Les résultats sont fiables si les ajustements observés permettent de prédire les comportements futurs. C'est une hypothèse aussi nécessaire dans la modélisation microéconomique, où l'on suppose des comportements stables. Cui *et al.* (2024) proposent une méthode économétrique pour estimer une fonction de dommage qui repose sur le principe d'une pondération accordant une importance accrue aux années passées selon leur ressemblance avec les années futures.

► Les approches par les modèles économiques globaux

Définition des modèles économiques globaux

Les méthodes économiques d'évaluation d'impact ont pour objectif de déterminer l'effet du changement climatique sur l'offre agricole. Cependant, celui-ci affecte simultanément les systèmes agricoles mondiaux, à commencer par les zones semi-arides. En influençant l'offre agricole globale, il modifie les équilibres de marché et les prix. Dans la mesure où les marchés sont fortement intégrés internationalement en raison du commerce international des commodités agricoles, il est important de prendre en compte le rôle central du commerce dans la distribution des effets du changement climatique entre et au sein des pays, et son rôle d'adaptation.

Les modèles économiques globaux émergent au même moment que les modèles mécaniques. Leur objectif est de modéliser l'impact du changement climatique sur l'offre agricole mondiale et sur les prix des commodités agricoles, en tenant notamment compte des flux commerciaux. Adams *et al.* (1990) couplent un modèle biophysique avec un modèle économique en équilibre partiel qui permet d'endogénéiser les quantités produites et les prix agricoles. Toutefois, Reilly et Hohmann (1993) soulignent que cette étude se limite aux États-Unis, isolés du reste de monde, comme si le pays

fonctionnait en autarcie. Or, le changement climatique touche l'agriculture mondiale, nécessitant une modélisation de l'offre mondiale et de sa répartition géographique ainsi que des flux commerciaux.

Un an plus tard, Rosenzweig et Parry (1994) proposent un modèle en équilibre général, représentant l'offre agricole mondiale par des sous-secteurs nationaux. Ce modèle permet d'observer les effets en cascade du climat sur l'économie : les chocs de production agricole provoquent une hausse des coûts de production des secteurs de transformation des biens agricoles, et peuvent aussi inciter les agriculteurs à augmenter leur production en réponse à la hausse des prix.

Les modèles économiques globaux les plus utilisés sont les modèles d'équilibre général calculable (CGE, *computable general equilibrium models*). Ils modélisent de manière endogène l'offre et la demande de chaque secteur avec leurs échanges en biens intermédiaires détaillés ainsi que les flux commerciaux. Les ménages sont représentés en offrant leur travail à ces secteurs pour obtenir un revenu qui leur permet de consommer les biens finaux dans l'économie. Les modèles d'équilibre général calculable intègrent ensuite les flux commerciaux, les importations et les exportations comme étant les différences entre ce qui est produit nationalement et les demandes émanant des ménages et des secteurs d'activité locaux. Le modèle est ensuite calibré à partir des matrices input-output qui renseignent sur les liens économiques entre les différents secteurs d'activité ainsi que sur les données de flux commerciaux bilatéraux telles que celles mises à disposition par le réseau GTAP (Hertel, 2013). Le secteur agricole est alors un secteur parmi d'autres de l'économie, avec la particularité de disposer d'une certaine productivité de la terre, pour les différentes cultures considérées, qui sera *in fine* perturbée pour simuler les effets du changement climatique à partir de modèles biophysiques de simulation de culture. L'intérêt de l'approche est de comparer directement les différences de prix et de quantité par secteur après simulation du modèle, et d'évaluer les impacts sur la production, les prix et l'utilisation des facteurs de production.

Ces modèles résument souvent la représentation des choix agricoles aux choix des cultures à partir de leur revenu potentiel, c'est-à-dire le prix fixé par le marché international multiplié par le rendement potentiel de la parcelle dont est soustrait le coût unitaire d'exploitation de la parcelle. Ils n'intègrent pas de mécanismes détaillés d'adaptations technologiques ou de pratiques agronomiques. Cette simplification présente l'avantage de comparer les résultats des différents modèles globaux. Par exemple, l'initiative AgMIP a vocation à coupler plusieurs modèles économiques globaux aux modèles biophysiques de croissance de culture pour fournir des analyses à partir d'ensemble de modèles (Meijl *et al.*, 2018 ; Rosenzweig *et al.*, 2018).

Un aperçu des différents modèles globaux

Nelson *et al.* (2014) ont comparé neuf modèles économiques mondiaux qui simulent les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles. Les résultats montrent des différences significatives des réponses sur la production, sur les terres cultivées, sur les flux commerciaux et sur les prix. Ces écarts s'expliquent par des différences dans la structure des modèles, notamment en ce qui concerne la conversion des terres agricoles, l'intensification de la production et les flux commerciaux.

Avec un modèle CGE, Ciscar *et al.* (2011) estiment des pertes de rendement moyen de 10 % pour l'Europe sous un scénario climatique central. Cependant, les pertes

de revenus pour l'agriculture sont limitées à 1 % pour le sud de l'Europe tandis que l'Europe du Nord observe des gains de revenu. Iglesias *et al.* (2012) montrent des impacts similaires, avec une réduction modeste des revenus agricoles en France et des pertes plus importantes dans le sud de l'Europe à partir d'un autre modèle CGE. Si ces travaux n'indiquent pas les canaux d'atténuation des impacts, il semble que les gains de productivité relatifs à l'agriculture nord-européenne et les flux commerciaux permettent de nuancer les pertes de rendements du reste de l'Europe et d'amoindrir leur répercussion sur l'économie européenne.

Costinot *et al.* (2016) élaborent un modèle global de l'agriculture, basé sur une représentation spatiale de l'utilisation des terres à partir de données géographiques fines de la FAO mesurant la productivité agricole potentielle pour un grand nombre de parcelles et de cultures. Ce modèle a alors l'avantage de pouvoir examiner comment la relocalisation de la production au sein et entre les pays peut modérer l'impact du changement climatique sur le bien-être mondial. Le caractère novateur du cadre tient en sa capacité à analyser la composition de la production agricole dans le monde dans toute son hétérogénéité. La conclusion principale est que les redistributions géographiques de la productivité agricole induites par le changement climatique entraînent une modification et une relocalisation des cultures au sein des pays, qui limitent amplement les dommages du changement climatique. La logique sous-jacente est que, sous l'effet du changement climatique, les régions actuellement caractérisées par des températures basses pourraient bénéficier de rendements plus élevés et ainsi produire des cultures, qui subissent des pertes de rendement ailleurs, et les exporter.

Gouel et Laborde (2021) adoptent une approche similaire, mais quantifient une perte de revenu mondial de 1 % due au changement climatique à partir d'un exercice de calibration différent. Cet effet à l'échelle mondial recouvre d'importantes différences régionales. Pour l'Europe, si les pertes de rendements prédictes par les modèles biophysiques dans un contexte de changement climatique sont d'environ 10 % à la fin du siècle relativement à 2011³², les pertes de revenus en France restent faibles. En effet, la diminution de la productivité y est relativement moins importante que pour d'autres pays agricoles, ce qui permet à la France de voir son gain aux échanges commerciaux s'améliorer à travers les hausses des prix internationaux des commodités induites par la diminution globale de l'offre.

L'intégration commerciale joue aussi un rôle crucial dans l'atténuation des impacts sur la sécurité alimentaire. Janssens *et al.* (2020), grâce au modèle Globiom, analysent soixante scénarios de changement climatique (de 2 °C à 4 °C pour les RCP2.6 à 8.5) et de politiques commerciales. Les résultats révèlent que, dans le cadre de l'intégration commerciale actuelle, le changement climatique pourrait entraîner jusqu'à 55 millions de personnes sous-alimentées d'ici 2050. Cependant, l'élimination des barrières commerciales réduirait de 20 millions le nombre de personnes affectées. Toutefois, une plus grande ouverture commerciale peut réduire la disponibilité en nourriture sur le marché intérieur en augmentant les exportations. Les risques de famines pourraient être exacerbés dans certaines régions exportatrices, comme en Asie du Sud-Est, en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale.

32. Ce résultat est obtenu à partir du scénario A1FI du rapport spécial du Giec sur les scénarios d'émissions (IPCC, 2000). Il s'agit du scénario avec les plus fortes émissions de gaz à effet de serre.

Les enjeux des modèles économiques globaux

Un premier enjeu concerne les modèles d'équilibre général calculable qui tendent à estimer des effets modestes du changement climatique. Cela s'explique en partie par l'hypothèse d'absence de délais et de coûts fixes des ajustements réalisés : une perturbation sur la productivité est rééquilibrée instantanément par un changement d'allocation des facteurs de production comme la terre et le travail vers des secteurs ou dans des régions moins affectés. Or, en réalité, cette réallocation est limitée par la faible mobilité du travail et par la difficulté de réemployer certains facteurs de production dans d'autres secteurs d'activité, étant donné les délais de formation du travail ou d'ajustements de certaines infrastructures. Des travaux récents incorporent ces frictions pour rendre les modèles plus réalistes (Castellanos et Heutel 2024).

Ces modèles omettent aussi le rôle structurant des filières de production et des infrastructures dans l'émergence de nouvelles productions agricoles. La concentration géographique de la production agricole offre des gains de productivité pour les industries locales qui s'y approvisionnent, et ainsi ralentit la dynamique de relocalisation. Les rendements de la terre n'expliqueraient pas à eux seuls l'allocation des sols ni, par conséquent, leur réallocation dans un contexte de changement climatique. Un enjeu est ainsi de développer des modèles globaux qui intègrent la chaîne de production, sa structure et sa localisation pour mieux représenter les coûts d'ajustement et de réallocation.

Enfin, certaines productions agricoles, comme celles sous les signes de l'origine et de la qualité (SIQO) en France, ne sont ni relocalisables ni parfaitement substituables. Ces productions spécifiques représentent environ 15 % de la valeur de la production agricole française, et sont contraintes à produire dans une zone précise avec des techniques de production ancrées dans un territoire. Leur adaptation au changement climatique ne peut passer par une simple relocalisation sans perte de qualité ou de valeur marchande (Henry, 2023). Des modèles d'économie internationale combinant les approches issues de l'organisation industrielle tenant compte de la différenciation verticale ou horizontale pourraient être mobilisés pour mieux intégrer ces spécificités dans les analyses globales.

► Conclusion

La diversité des méthodes utilisées en économie agricole pour évaluer les impacts du changement climatique apparaît à travers cette revue de la littérature. Cependant, plusieurs questions demeurent peu étudiées et méritent une attention particulière. Tout d'abord, les connexions entre les approches mécaniques des méthodes économétriques pourraient être renforcées, de sorte à rapprocher l'analyse empirique de la modélisation. Des travaux tels que ceux de Lungarska et Chakir (2018) ou de Lobell *et al.* (2013) illustrent le potentiel de cette convergence. Ces approches peuvent se compléter, les outils de programmation mathématique pouvant alimenter l'économétrie, et inversement.

Des approches économétriques structurelles émergent dans la littérature récente, telles que celles de Bareille et Chakir (2023a) ou de Wimmer *et al.* (2023). Bien que ces approches reposent sur certaines hypothèses concernant les mesures d'adaptation des agriculteurs, elles combinent économétrie et modélisation microéconomique des comportements d'ajustement. Elles offrent ainsi une meilleure compréhension

de l'adaptation et des ajustements des facteurs de production comme l'utilisation des intrants chimiques ou le travail. Ces ajustements, en réponse aux variations climatiques, restent relativement peu étudiés.

Peu d'études abordent également les effets du changement climatique sur la qualité de la production agricole. Les travaux de Dalhaus *et al.* (2020) et de Kawasaki et Uchida (2016) sont des exceptions, se concentrant sur l'impact sur la qualité de produits spécifiques comme les pommes ou le riz. Ce manque d'études s'explique par la difficulté d'obtenir des données sur la qualité des produits agricoles, alors que l'enjeu des altérations de qualité de la production agricole est fort.

Enfin, pour des analyses plus englobantes, des initiatives comme celles du comité AcclimaTerra (voir par exemple l'évaluation des impacts du changement climatique en Aquitaine par Le Treut, 2013) montrent la voie vers des évaluations approfondies et transdisciplinaires à l'échelle régionale. Ces projets soulignent l'intérêt d'une approche holistique pour mieux appréhender les multiples facettes des impacts du changement climatique sur l'agriculture.

► Références

- Adams R.M., Fleming R.A., Chang C.-C., McCarl B.A., Rosenzweig C., 1995. A reassessment of the economic effects of global climate change on U.S. agriculture, *Climatic Change*, 30(2), 147-167, <https://doi.org/10.1007/BF01091839>.
- Adams R.M., Rosenzweig C., Peart R.M., Ritchie J.T., McCarl B.A., Glycer J.D. *et al.*, 1990. Global climate change and US agriculture, *Nature*, 345(6272), 219-224, <https://doi.org/10.1038/345219a0>.
- Antle J.M., Stöckle C.O., 2017. Climate impacts on agriculture: insights from agronomic-economic analysis, *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2), 299-318, <https://doi.org/10.1093/reep/rex012>.
- Bareille F., Chakir R., 2023a. Structural identification of weather impacts on crop yields: Disentangling agronomic from adaptation effects, *American Journal of Agricultural Economics*, 106, 989-1019, <https://doi.org/10.1111/ajae.12420>.
- Bareille F., Chakir R., 2023b. The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis, *Journal of Environmental Economics and Management*, 119, 102822, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102822>.
- Bareille F., Chakir R., Keles D., 2024. Weather shocks and pesticide purchases, *European Review of Agricultural Economics*, 51, 309-353, <https://doi.org/10.1093/erae/jbae008>.
- Bayramoglu B., Chakir R., Lungarska A., 2020. Impacts of land use and climate change on freshwater ecosystems in France, *Environmental Modeling & Assessment*, 25(2), 147-172, <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09673-x>.
- Boumahdi R., Thomas A., 2008. Endogenous regressors and correlated effects, in Mátyás L., Sevestre P. (Eds), *The Econometrics of Panel Data*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, vol. 46, p. 89-112, https://doi.org/10.1007/978-3-540-75892-1_4.
- Burke M., Emerick K., 2016. Adaptation to climate change: evidence from US agriculture, *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3), 106-140, <https://doi.org/10.1257/pol.20130025>.
- Carpentier A., Gohin A., Schokai P., Thomas A., 2015. Economic modelling of agricultural production: past advances and new challenges, *Review of agricultural and environmental studies*, 96, 131-165, <https://doi.org/10.22004/ag.econ.276763>.
- Castellanos K., Heutel G., 2024. Unemployment, labor mobility, and climate policy, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 11(1), 1-40, <https://doi.org/10.1086/725482>.
- Ciscar J.-C., Iglesias A., Feyen L., Szabó L., Regemorter D.V., Amelung B. *et al.*, 2011. Physical and economic consequences of climate change in Europe, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 108(7), 678-2683, <https://doi.org/10.1073/pnas.1011612108>.

- Costinot A., Donaldson D., Smith C., 2016. Evolving comparative advantage and the impact of climate change in agricultural markets: evidence from 1.7 Million fields around the world, *Journal of Political Economy*, 124(1), 205-248, <https://doi.org/10.1086/684719>.
- Cruz J.-L., Rossi-Hansberg E., 2024. The economic geography of global warming, *The Review of Economic Studies*, 91(2), 899-939, <https://doi.org/10.1093/restud/rdad042>.
- Cui X., Gafarov B., Ghanem D., Kuffner T., 2024. On model selection criteria for climate change impact studies, *Journal of Econometrics*, 239(1), 105511, <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2023.105511>.
- Dalhaus T., Schlenker W., Blanke M.M., Bravin E., Finger R., 2020. The effects of extreme weather on apple quality, *Scientific Reports*, 10(1), 7919, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64806-7>.
- Deschênes O., Greenstone M., 2007. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather, *American Economic Review*, 97(1), 354-385, <https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3761>.
- Easterling W.E., Rosenberg N.J., McKenney M.S., Jones C.A., Dyke P.T., Williams J.R., 1992. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂, *Agricultural and Forest Meteorology*, 59(1), 17-34, [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90084-H](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90084-H).
- Finger R., Schmid S., 2007. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change, 101^e Séminaire EAAE, management of climate risks in agriculture, Berlin, Allemagne, <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.9270>.
- Fisher A.C., Hanemann W.M., Roberts M.J., Schlenker W., 2012. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather: Comment, *American Economic Review*, 102(7), 3749-3760, <https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3749>.
- Gammans M., Mérel P., Ortiz-Bobea A., 2017. Negative impacts of climate change on cereal yields: statistical evidence from France, *Environmental Research Letters*, 12(5), 054007, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0c>.
- Gouel C., Laborde D., 2021. The crucial role of domestic and international market-mediated adaptation to climate change, *Journal of Environmental Economics and Management*, 106, 102408, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102408>.
- Graveline N., 2020. Combining flexible regulatory and economic instruments for agriculture water demand control under climate change in Beauce, *Water Resources and Economics*, 29, 100143, <https://doi.org/10.1016/j.wre.2019.100143>.
- Graveline N., Mérel P., 2014. Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt, *European Review of Agricultural Economics*, 41(5), 707-743, <https://doi.org/10.1093/erae/jbt039>.
- Henry L., 2023. Adapting the designated area of geographical indications to climate change, *American Journal of Agricultural Economics*, 105(4), 1088-1115, <https://doi.org/10.1111/ajae.12358>.
- Hertel T., 2013. Chapter 12 – Global applied general equilibrium analysis using the global trade analysis project framework, in Dixon P.B., Jorgenson D.W. (Eds), *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Elsevier, 1, 815-876, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59568-3.00012-2>.
- Hristov J., Domínguez I.P., Fellmann T., Elleby C., 2023. Economic impacts of climate change on EU agriculture: will the farmers benefit from global climate change?, *Environmental Research Letters*, 19(1), 014027, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0e34>.
- Iglesias A., Garrote L., Quiroga S., Moneo M., 2012. A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe, *Climatic Change*, 112(1), 29-46, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0338-8>.
- IPCC, 2000. Special report on emissions scenarios, in *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Janssens C., Havlík P., Krisztin T., Baker J., Frank S., Hasegawa T. *et al.*, 2020. Global hunger and climate change adaptation through international trade, *Nature Climate Change*, 10(9), 829-835, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0847-4>.
- Jayet P.-A., Petsakos A., Chakir R., Lungarska A., Cara S.D., Petel E. *et al.*, 2023. The European agro-economic model AROPAj, *Working Papers*, <https://ideas.repec.org/p/hal/wpaper/hal-04109872.html>.

- Kalkuhl M., Wenz L., 2020. The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions, *Journal of Environmental Economics and Management*, 103, 102360, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102360>.
- Kawasaki K., Uchida S., 2016. Quality matters more than quantity: asymmetric temperature effects on crop yield and quality grade, *American Journal of Agricultural Economics*, 98(4), 1195-1209, <https://doi.org/10.1093/ajae/aaw036>.
- Leclère D., Jayet P.-A., de Noblet-Ducoudré N., 2013. Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change, *Ecological Economics*, 87, 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.11.010>.
- Leclère D., Havlík P., Fuss S., Schmid E., Mosnier A., Walsh B. *et al.*, 2014. Climate change induced transformations of agricultural systems: insights from a global model, *Environmental Research Letters*, 9(12), 124018, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124018>.
- Le Treut H. (Coord.), 2013. *Les impacts du changement climatique en Aquitaine*, Presses universitaires de Bordeaux, <https://doi.org/10.4000/books.pub.585>.
- Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980, *Science*, 333(6042), 616-620, <https://doi.org/10.1126/science.1204531>.
- Lobell D.B., Hammer G.L., McLean G., Messina C., Roberts M.J., Schlenker W., 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States, *Nature Climate Change*, 3(5), 497-501, <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>.
- Lungarska A., Chakir R., 2018. Climate-induced land use change in France: impacts of agricultural adaptation and climate change mitigation, *Ecological Economics*, 147, 134-154, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.030>.
- Martin E., Vaitkeviciute J., 2016. Mesure de l'impact du changement climatique sur l'agriculture de Côte-d'Or, *Économie rurale, Agricultures, Alimentations, Territoires*, 355, 21-48, <https://doi.org/10.4000/economierurale.4984>.
- Meijl H. van, Havlik P., Lotze-Campen H., Stehfest E., Witzke P., Domínguez I.P. *et al.*, 2018. Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050, *Environmental Research Letters*, 13(6), 064021, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc4>.
- Mendelsohn R.O., Massetti E., 2017. The use of cross-sectional analysis to measure climate impacts on agriculture: theory and evidence, *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2), 280-298, <https://doi.org/10.1093/reep/rex017>.
- Mendelsohn R., Nordhaus W.D., Shaw D., 1994. The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis, *The American Economic Review*, 84(4), 753-771, <https://doi.org/10.1093/reep/rex017>.
- Mérel P., Gammans M., 2021. Climate econometrics: can the panel approach account for long-run adaptation?, *American Journal of Agricultural Economics*, 103(4), 1207-1238, <https://doi.org/10.1111/ajae.12200>.
- Mérel P., Paroissien E., Gammans M., 2024. Sufficient statistics for climate change counterfactuals, *Journal of Environmental Economics and Management*, 124, 102940, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102940>.
- Milgrom P., Roberts J., 1996. The LeChatelier principle, *The American Economic Review*, 86(1), 173-179.
- Moore F.C., Baldos U.L.C., Hertel T., 2017. Economic impacts of climate change on agriculture: a comparison of process-based and statistical yield models, *Environmental Research Letters*, 12(6), 065008, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6eb2>.
- 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 of the USA*, 111(9), 3274-3279, <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>.
- Ollier M., Jayet P.A., Humblot P., 2024. An assessment of the distributional impacts of autonomous adaptation to climate change from European agriculture, *Ecological Economics*, 222, 108221, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108221>.

- Ortiz-Bobea A., 2020. The role of nonfarm influences in Ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture, *American Journal of Agricultural Economics*, 102(3), 934-959, <https://doi.org/10.1093/ajae/aaz047>.
- Ortiz-Bobea A., 2021. Chapter 76 – The empirical analysis of climate change impacts and adaptation in agriculture, in Barrett C.B., Just D.R. (Eds), *Handbook of Agricultural Economics*, Elsevier, 5, 3981-4073, <https://doi.org/10.1016/bs.hesagr.2021.10.002>.
- Reilly J., Hohmann N., 1993. Climate change and agriculture: the role of international trade, *The American Economic Review*, 83(2), 306-312, <https://www.jstor.org/stable/2117682>.
- Ricardo D., 1817. *On the principles of political economy and taxation*, John Murray, 624 p., <https://doi.org/10.1017/CBO9781107589421>.
- Robert M., Bergez J.-E., Thomas A., 2018. A stochastic dynamic programming approach to analyze adaptation to climate change – Application to groundwater irrigation in India, *European Journal of Operational Research*, 265(3), 1033-1045, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.029>.
- Rosenzweig C., Parry M.L., 1994. Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367(6459), 133-138, <https://doi.org/10.1038/367133a0>.
- Rosenzweig C., Ruane A.C., Antle J., Elliott J., Ashfaq M., Chatta A.A. *et al.*, 2018. Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5°C and 2.0°C assessments, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160455, <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0455>.
- Schlenker W., Hanemann W.M., Fisher A.C., 2005. Will U.S. agriculture really benefit from global warming? Accounting for irrigation in the Hedonic approach, *American Economic Review*, 95(1), 395-406, <https://doi.org/10.1257/0002828053828455>.
- Severen C., Costello C., Deschênes O., 2018. A forward-looking Ricardian approach: do land markets capitalize climate change forecasts?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 89, 235-254, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.03.009>.
- Shrestha S., Ciaian P., Himics M., Van Doorslaer B., Shrestha S., Ciaian P. *et al.*, 2013. Impacts of climate change on EU agriculture, *Review of Agricultural and Applied Economics*, XVI(2), 24-39, <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.158096>.
- Vaitkeviciute J., Chakir R., Van Passel S., 2019. Climate variable choice in Ricardian studies of European agriculture, *Revue économique*, 70(3), 375-401, <https://doi.org/10.3917/reco.703.0375>.
- Van Passel S., Massetti E., Mendelsohn R., 2017. A Ricardian analysis of the impact of climate change on European agriculture, *Environmental and Resource Economics*, 67(4), 725-760, <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0001-y>.
- Wimmer S., Stetter C., Schmitt J., Finger R., 2023. Farm-level responses to weather trends: A structural model, *American Journal of Agricultural Economics*, 106, 1241-1273, <https://doi.org/10.1111/ajae.12421>.

Partie 3

Impacts observés et projetés du changement climatique sur les filières animales et végétales

Chapitre 6

Impacts observés et projetés du changement climatique sur les grandes cultures et les prairies

Philippe Debaeke, Jean-Louis Durand

Les travaux du Giec alertent depuis longtemps l'opinion mondiale sur les impacts négatifs que le changement climatique pourrait induire (ou a déjà induits) sur les rendements des grandes cultures à l'échelle mondiale en s'appuyant sur des données historiques ou projetées (Porter *et al.*, 2014). De la même manière, et notamment en Europe, la production fourragère est régulièrement déprimée par la sécheresse et les canicules, même dans les régions océaniques, avec des conséquences importantes pour l'alimentation des troupeaux (pâturage, stocks hivernaux).

C'est pourquoi, plus que jamais, les impacts du changement climatique sur la production agricole et en particulier sur les rendements des cultures, qu'ils soient positifs ou négatifs, préoccupent beaucoup scientifiques et gestionnaires des politiques publiques, en raison des conséquences attendues pour la sécurité alimentaire, la distribution des aires de production, le fonctionnement des filières et les échanges de produits agricoles à l'échelle mondiale (Ray *et al.*, 2012; Aggarwal *et al.*, 2019b; Tibi *et al.*, 2020; Forslund *et al.*, 2023).

Cependant, la part attribuable au changement climatique dans les évolutions des rendements des cultures depuis les dernières décennies est toujours difficile à établir, car ces évolutions se sont accompagnées d'un progrès variétal important et d'une intensification culturelle continue (engrais, produits phytosanitaires) conduisant à des accroissements de 200 % à 300 % selon les régions qui surclassent très largement les impacts climatiques (Aggarwal *et al.*, 2019a; Mbow *et al.*, 2019).

Il est communément admis que des baisses de rendement consécutivement au changement climatique sont déjà une réalité et qu'elles s'intensifieront à l'avenir aussi bien pour les grandes cultures que pour les prairies. Mais est-ce toujours le cas ? Quelles incertitudes accompagnent ces projections ? C'est ce que ce chapitre cherchera à éclairer en distinguant les approches historiques des projections de scénarios futurs.

Dans un premier temps, on rappellera comment les évolutions des variables climatiques affectent les processus écophysiologiques qui sous-tendent la production agricole pour mieux comprendre les impacts qui en résultent sur le rendement des cultures et sur la production fourragère.

► Effets des changements climatiques sur la réponse écop physiologique des plantes

Les variables du changement climatique affectant la vie des plantes cultivées sont principalement la teneur atmosphérique en CO_2 ($[\text{CO}_2]$), la température et la pluviométrie (Durand *et al.*, 2013; Rezaei *et al.*, 2023). La première agit à deux titres. D'abord, elle modifie le bilan radiatif de l'atmosphère et provoque un accroissement des températures des basses couches dans des gammes auxquelles les plantes sont sensibles. Ensuite, la $[\text{CO}_2]$ intervient directement dans les échanges gazeux et dans la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique dans la plante : le carbone des plantes et de la matière organique du sol provient totalement du CO_2 atmosphérique. Toute l'énergie disponible dans la biosphère, y compris dans le sol, provient de cette conversion. D'ailleurs, la $[\text{CO}_2]$ actuelle, bien plus faible que dans les ères géologiques antérieures (Foster *et al.*, 2017), résulte de l'assimilation par les plantes et de la séquestration du carbone dans le charbon, le pétrole et le gaz. La consommation actuelle très (trop) rapide de ces combustibles fossiles ne fait que restituer à l'atmosphère en quelques décennies, ce que les végétaux avaient mis des dizaines de millions d'années à séquestrer dans les roches. Les quantités de carbone présentes dans la biomasse végétale (environ 450 Gt) sont du même ordre de grandeur que celles présentes dans l'atmosphère (environ 600 Gt) ce qui fait que les équilibres entre phytosphère et atmosphère sont critiques pour le climat.

L'accroissement des températures a deux effets cruciaux : d'une part, un bouleversement des régimes de pluie couplé au bilan d'énergie de l'atmosphère, d'autre part, une modification profonde de la vitesse des cycles biogéochimiques. Les précipitations cependant sont très difficiles à spatialiser et à projeter dans le temps. Les climatologues du Giec publient ainsi à l'échelle mondiale des projections entachées de fortes incertitudes pour la France. De fait, contrairement à la teneur en CO_2 (très peu variable spatialement et à l'échelle annuelle), la température évolue lentement et les précipitations annuelles très peu à l'échelle nationale depuis 1900 (voir chapitre 1). La variabilité interannuelle de ces deux facteurs est relativement forte et supérieure à toute la tendance liée au changement climatique. Cependant, les projections font apparaître de nettes tendances à la diminution des précipitations estivales sur l'ouest de la France, sans parler des températures, dont la hausse tendancielle par rapport à la situation préindustrielle, bien mesurable à l'échelle d'une station météorologique, varie déjà de +1 °C à +4 °C selon la station considérée en France métropolitaine.

Par ailleurs, le réchauffement climatique a provoqué et provoquera dans le futur une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui, associée ou non à la baisse des précipitations, conduira à une dégradation du bilan hydrique estival dommageable pour les populations, et ce, sans mentionner une dégradation de la recharge des nappes et des débits des rivières, notamment en été, conduisant à une très probable rarefaction de l'eau pour l'irrigation (voir chapitre 2).

Enfin, la température a en elle-même un effet majeur sur les plantes, depuis la vitesse et le taux de germination des semences, jusqu'à la maturation des fruits en passant par la croissance des feuilles et des racines, la reproduction sexuée et la photosynthèse.

Les effets individuels des trois variables, $[\text{CO}_2]$, température et eau, sont relativement bien connus et permettent de calculer les impacts de premier ordre sur le

fonctionnement des plantes cultivées (figure 6.1). Mais, par ailleurs, la connaissance de l'impact de ces variables sur la vie du sol reste difficile à quantifier : en effet, si les entrées du carbone et de l'azote sont pilotées par le fonctionnement aérien des plantes, elles interagissent ensuite avec l'écosystème édaphique.

Effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique

Chez les plantes en C3 (blé, riz, betterave, pomme de terre, colza, arbres des zones tempérées, plantes maraîchères, etc.), le CO₂ est assimilé grâce à la photosynthèse par un processus qui utilise le CO₂ dissous dans le cytoplasme des cellules chloroplastiques directement présent dans les aérenchymes³³ des feuilles. Chez les plantes en C4 (maïs, canne à sucre, sorgho, millet, graminées prairiales tropicales, etc.), le CO₂ est d'abord dissous, puis transporté sous forme d'oxaloacétate, réduit immédiatement en malate lui-même transporté vers les cellules de la gaine périvasculaire où le carbone est d'abord libéré à très haute concentration dans les chloroplastes,

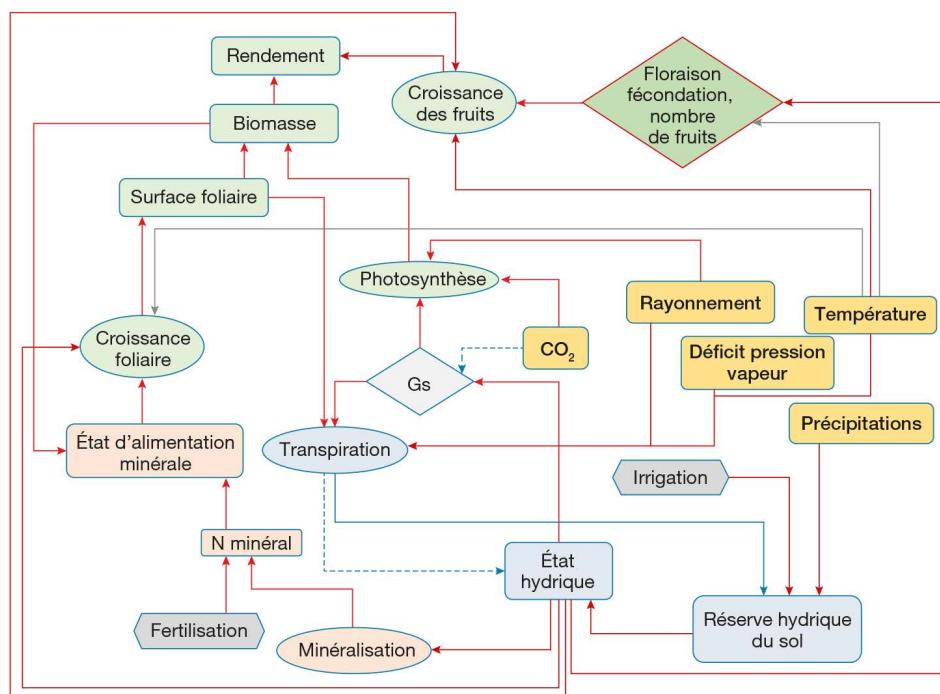


Figure 6.1. Schéma conceptuel du système de relations entre le rayonnement et les variables du changement climatique (température, précipitations, CO₂) et les processus physiologiques de base de la production végétale.

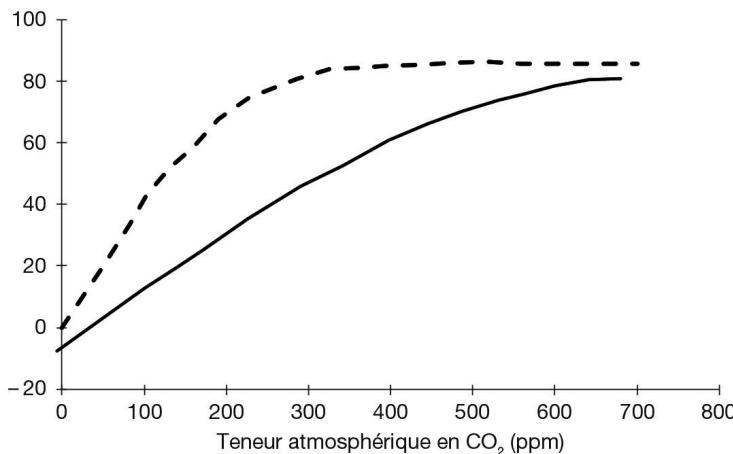
Flèches pleines : influence positive d'un élément du système sur l'autre ; flèches pointillées : influence négative. Rectangles arrondis : variables d'état ; hexagones : variables de forçage anthropique ; ellipses : variables de flux. Gs : conductance stomatique.

33. Chez les plantes, l'aérenchyme est un tissu à cellules séparées par de vastes méats ou lacunes aéifères (jusqu'à 50 % chez les plantes de marécage contre 5 % chez les plantes de sols bien aérés) contenant des canaux avec de larges cavités qui permettent les échanges gazeux entre les parties émergées et immergées.

tandis que le pyruvate issu de cette décarbonation retourne dans le mésophylle. L'enzyme fixant le CO₂ sur l'oxaloacétate, la PEP carboxylase, a une très grande affinité pour le CO₂ et opère à des teneurs bien plus faibles que l'enzyme Rubisco qui catalyse deux réactions aux résultats opposés. L'une fixe le CO₂ sur des sucres en C3, la carboxylation, en émettant de l'oxygène tandis que l'autre catalyse l'oxydation de sucres en C6 en émettant du CO₂. Ces deux réactions utilisent l'énergie solaire à partir des longueurs d'onde dans le visible préalablement captées dans les feuilles. L'équilibre entre les deux réactions dépend de la concentration locale en CO₂. Au cours des temps géologiques, la baisse de la teneur en CO₂ atmosphérique, due à l'activité photosynthétique de la phytosphère (Franks *et al.*, 2013), a donc réduit fortement l'efficience lumineuse de la photosynthèse pour la fixation du carbone. Dans les situations de forte compétition pour la lumière, l'évolution des feuilles a favorisé des structures permettant un accroissement de la concentration en CO₂ sur les sites de carboxylation comme les gaines périvasculaires des plantes en C4 et le rétablissement de l'efficience qu'avaient les plantes en C3 lorsque la teneur dépassait les 1 000 ppm (Franks *et al.*, 2013). C'est ainsi qu'aux concentrations en CO₂ actuelles l'efficience énergétique des plantes en C4 est toujours nettement supérieure à celle des plantes en C3. La tendance est donc de réduire cet écart en améliorant la productivité primaire des plantes en C3. Cet accroissement de l'efficience d'assimilation du CO₂ n'empêche pas une augmentation tendancielle de la teneur en CO₂ interne des feuilles (Ci), ce qui tend à réduire la conductance stomatique (Gs). À cela s'ajoute un impact structurel sur les épidermes des plantes en C3 qui présentent une densité stomatique décroissante avec l'augmentation de la concentration en CO₂. Il a été mesuré sur les flores fossiles une corrélation globale semblable à l'échelle des temps géologiques (Franks *et al.*, 2013). Cette réduction de Gs avec un accroissement de l'efficience photosynthétique a donc eu pour conséquence une modification de l'utilisation de l'eau par les plantes au cours de leur développement. La réduction de la vitesse de consommation d'eau par les plantes due à la baisse de la conductance stomatique a tendance à augmenter leur vitesse de croissance et de morphogenèse aérienne et à maintenir un feuillage actif plus longtemps en réduisant la vitesse de sénescence. Mais en retour, cette production de feuille supplémentaire peut finir par accroître la quantité d'eau consommée par la plante, dans les phases plus tardives de son développement. Globalement, sur l'ensemble du cycle, il est fréquent d'observer que l'élévation de la [CO₂] ne modifie qu'assez peu le bilan hydrique, voire peut l'augmenter. Mais dans tous les cas, le bilan de carbone de ces modifications montre une forte augmentation de l'efficience de l'eau (Franks *et al.*, 2013). Chez les plantes en C4, la conductance stomatique réagit également à la [CO₂] avec pour conséquence une augmentation de l'efficience de l'eau. Cet effet est visible chez les plantes cultivées, tout spécialement en conditions sèches.

Par ailleurs, il est à remarquer que chez les plantes en C4, la meilleure efficience photosynthétique pour le rayonnement visible et pour l'eau est aussi valable pour les autres ressources comme l'azote ou le phosphore. Les teneurs de ces éléments dans la matière sèche sont plus faibles chez les C4 que chez les C3. On retrouve cette tendance chez les plantes en C3 avec l'augmentation de la [CO₂]. La baisse tendancielle des teneurs en éléments nutritifs a ainsi été mise en exergue par de récentes études. Une large partie de cette tendance s'explique par l'amélioration générale de l'efficience photosynthétique (figure 6.2).

A Taux de photosynthèse nette
en % du maximum



B Conductance stomatique (relative) pour l'eau
(fraction de la valeur à 400 ppm)

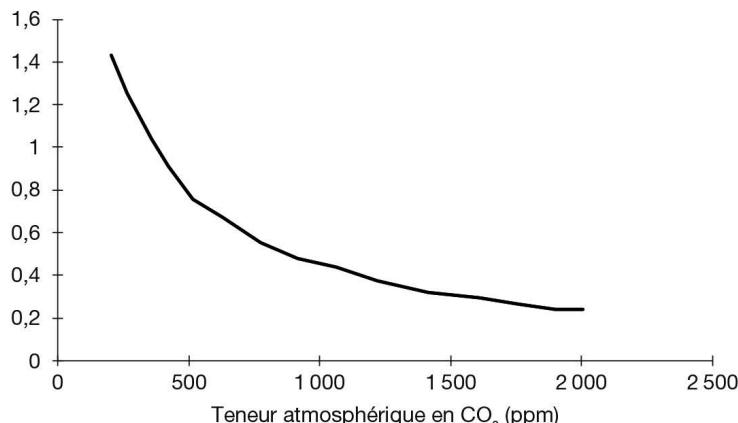


Figure 6.2. (A) Comparaison des réponses de l'assimilation nette maximale de CO₂ en fonction de la teneur en CO₂ atmosphérique ([CO₂]) entre 0 ppm et 700 ppm, en conditions optimales de lumière et d'alimentation minérale et hydrique, pour les plantes en C3 (trait plein) et en C4 (tirets); (B) réponse à la teneur en CO₂ de la conductance stomatique normée à sa valeur prise aux concentrations standard au moment de l'expérience. Cette réponse est identique pour les plantes en C3 et C4. Sources : (A) d'après Saugier (1983); (B) d'après Franks *et al.* (2013).

Pour autant, les conséquences métaboliques sont plus complexes. Chez le blé par exemple, une étude métabolique sur des plantes cultivées à 550 ppm a révélé une certaine modification de l'équilibre entre protéines, une baisse générale mais d'amplitude différenciée selon les acides aminés, et une augmentation de potassium (K) et de sodium (Na), contrairement aux autres éléments (Högy *et al.*, 2009). Enfin une tendance à produire des grains plus petits a été mesurée chez le blé, peut-être du fait d'une production d'un plus grand nombre de grains par épis et donc d'une compétition plus forte entre ces grains, limitant leur croissance individuelle.

Effets de la température

Réponse générale des espèces à la température

La température est une condition de la croissance des plantes. Elle détermine la vitesse à laquelle celles-ci se développent, croissent et acquièrent les ressources en énergie, carbone, eau, azote et autres éléments minéraux. Pour la plupart de ces processus élémentaires, des courbes de réponse à la température ont été établies expérimentalement et modélisées mathématiquement. La réponse à la température se présente sous la forme d'une courbe en cloche (figure 6.3), asymétrique, représentée par une fonction bêta (Yan et Hunt, 1999) avec une précision largement suffisante par rapport à celle des mesures. Dans une certaine gamme de températures, l'assimilation de la réponse à une droite a conduit à représenter la durée du développement par un temps physiologique en degrés-jours. Cette approche a certes permis des comparaisons utiles entre génotypes, mais a induit la définition d'une température de base, souvent nettement supérieure à 0 °C pour les cultures de printemps et ne permet pas de traiter correctement les basses et les hautes températures. Or, le changement climatique expose de plus en plus les cultures aux deux côtés de la gamme. En hiver, les cultures subissent l'élévation des températures avec des activités à prendre en compte en deçà de la température de base, et en été, les températures optimales de croissance sont dépassées de plus en plus souvent. Il convient donc de prendre en compte la gamme de températures complète pour évaluer l'impact du changement climatique.

Dans ces gammes, il résulte, du fait des hausses de température, une anticipation significative des stades phénologiques, en particulier des stades de forte sensibilité à l'eau et à la chaleur excessive, et des stades de récolte. Ces avancements de dates peuvent provoquer en conséquence l'exposition à de nouveaux stress (en hiver) ou bien au contraire, permettre l'évitement de périodes sèches, tant que le régime des pluies n'est pas trop affecté par le changement climatique.

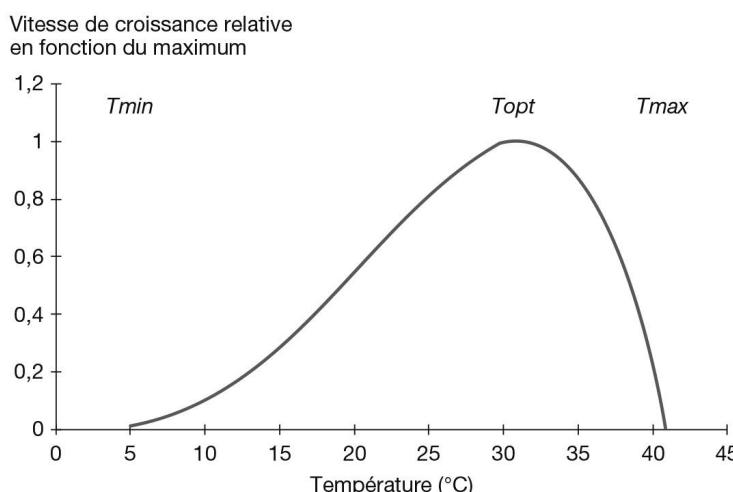


Figure 6.3. Réponse à la température de la croissance des feuilles de maïs. Source : d'après Yan et Hunt (1999).

L'accélération du cycle liée à l'accroissement de la vitesse de réalisation du cycle cultural aboutit à une réduction de la durée pendant laquelle les feuilles vertes interceptent et convertissent le rayonnement solaire en biomasse. Ce déficit de biomasse produite se reporte plus ou moins complètement sur le rendement et explique l'essentiel des impacts décrits dans les synthèses de l'effet de la température sur les rendements (voir par exemple Zhao *et al.*, 2017).

Effets cumulatifs des températures faibles

Les processus de vernalisation chez les graminées par exemple, ou de débourrement chez les ligneux demandent des températures fraîches, et cela pourrait au contraire contrebalancer l'accélération générale du cycle. Il est attendu un retard de la transition florale liée à ce phénomène du fait du réchauffement, puisque dans le même futur où les climatologues projettent un réchauffement, la durée du jour, elle, ne changera pas. Or la photopériode est un déterminant majeur des dates de transition florale chez de nombreuses espèces (céréales d'hiver notamment). On s'attend donc à une mitigation de l'effet direct du réchauffement sur l'accélération générale du cycle à travers l'effet sur la phénologie reproductrice. Ainsi, les cultures d'hiver devraient subir des avancements moins marqués que les cultures de printemps, non photopériodiques en général (Brisson et Levraud, 2010)

En plus de ces effets importants du réchauffement sur la vitesse de développement et de croissance des plantes, qu'il s'agisse des parties aériennes ou souterraines, la survenue de températures extrêmes pourrait s'intensifier avec des conséquences importantes pour les plantes.

Il en va également des températures inférieures à 0. Les plantes dont l'activité hivernale peut être accrue par l'augmentation moyenne des températures sont plus sensibles à une période de gel, aussi courte soit-elle, et donc risquent d'être plus fréquemment exposées à l'avenir. Les arbres fruitiers en particulier présentent des risques spécifiques (voir chapitre 7).

À l'autre extrémité de la gamme, les températures au-delà des températures maximales déjà mentionnées peuvent mettre en péril la vie de certains organes ou bien des fonctions vitales pour la production agricole (figure 6.4). Il en va ainsi de la fécondation et de la survie du pollen durant la fécondation (Lizaso *et al.*, 2017). De même, sans qu'il soit simple de distinguer l'effet direct des fortes températures de l'excès de transpiration des grains induit par une vague de chaleur, l'échaudage des céréales lors de certains printemps secs pourrait se manifester plus souvent (Brisson et Levraud, 2010). Un proxy de ce type de situations climatiques est indiqué par le nombre de journées

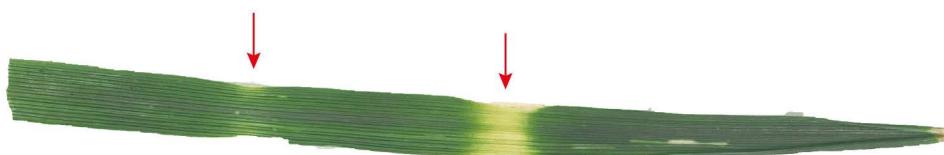


Figure 6.4. Anomalies foliaires chez la fétuque élevée liées à des chaleurs excessives.

Limbe produit au cours d'une période où les températures ont excédé 40°C et les évapotranspirations journalières ont atteint plus de 8 mm durant deux journées, ce qu'attestent les décolorations (flèches) dues à cet échaudage.

où la température maximale excède 25 °C pour le blé ou 35 °C pour le tournesol, par exemple. Il y a de façon évidente avec le réchauffement une augmentation significative des périodes pendant lesquelles les plantes seront en situation de souffrance physiologique, avec là encore une possible mitigation de ce phénomène par une avancée des stades phénologiques.

Face à ces tendances, il est essentiel de prendre en compte le fait que la phénologie est un processus très héritable et très plastique génétiquement. Au sein d'une espèce comme le ray-grass anglais, on mesure environ trente jours d'écart dans la phénologie entre les variétés fourragères témoins observées dans les essais du Geves depuis 2000. Cet écart est du même ordre que la variabilité interannuelle et intersite. Il en est de même pour les céréales de printemps et à un moindre niveau pour les céréales d'hiver. Mais le choix de variétés dans le catalogue actuel couvre cette gamme et la sélection continue à produire des ressources pour s'adapter au mieux aux nouvelles conditions. Il a été montré chez le ray-grass (et des études similaires ont commencé chez le blé) que la phénologie est un caractère adaptatif majeur face au climat pour cette espèce très ubiquiste sur toute la zone tempérée océanique, continentale et même méditerranéenne. Enfin, les régions froides actuelles pourraient voir s'allonger la période de végétation possible pour le blé au point que des sélections à cycle long pourraient au contraire tirer parti du réchauffement. Cette perspective pourrait toutefois se heurter, dans le nord-est de la France notamment, à l'aggravation tendancielle des sécheresses.

Effets de la sécheresse : vision synthétique d'un sujet abondamment traité

Le déficit hydrique estival continuera de s'accentuer, dans un premier temps par l'accroissement de l'ETP. Cela constitue une forte contrainte à deux échelles de temps. En premier lieu, la dégradation du bilan hydrique accélère le développement de la sécheresse édaphique, et le manque d'eau à prélever dans le sol se manifeste tendanciellement de plus en plus tôt avec cet accroissement d'ETP. Ce manque d'eau du sol, à ETP comparable, provoque rapidement une réduction de l'expansion foliaire et, dans une moindre mesure mais significativement, une réduction de la croissance racinaire (figure 6.5). Il en résulte une réduction de l'interception des ressources (rayonnement solaire, minéraux, etc.). Avec des déficits plus prononcés, les stomates se ferment pour limiter la transpiration, et la photosynthèse est ainsi réduite avec pour conséquence une baisse de l'efficience de conversion du rayonnement solaire intercepté (Boyer, 1970 ; Durand, 2007).

En second lieu, des valeurs très fortes d'ETP observées à chaque vague de chaleur estivale sollicitent le réseau hydraulique dans le sol et au sein des plantes de façon plus dangereuse. Requérant un flux d'eau plus important, ces valeurs élevées d'ETP induisent une consommation de l'eau de la rhizosphère plus intense qui diminue la conduction hydraulique entre les feuilles et les racines, abaisse très fortement le potentiel hydrique des feuilles et crée de fortes tensions dans la plante. Ainsi des transpirations extrêmes subies par les feuilles et par les plantes sont susceptibles de provoquer la cavitation des vaisseaux, une embolie qui aboutit à brève échéance au flétrissement de l'axe en aval. La restriction de transpiration qui résulte de ces phénomènes augmente aussi la température de la plante qui peut alors subir des conditions extrêmes dommageables pour sa survie (Volaire *et al.*, 2016a).

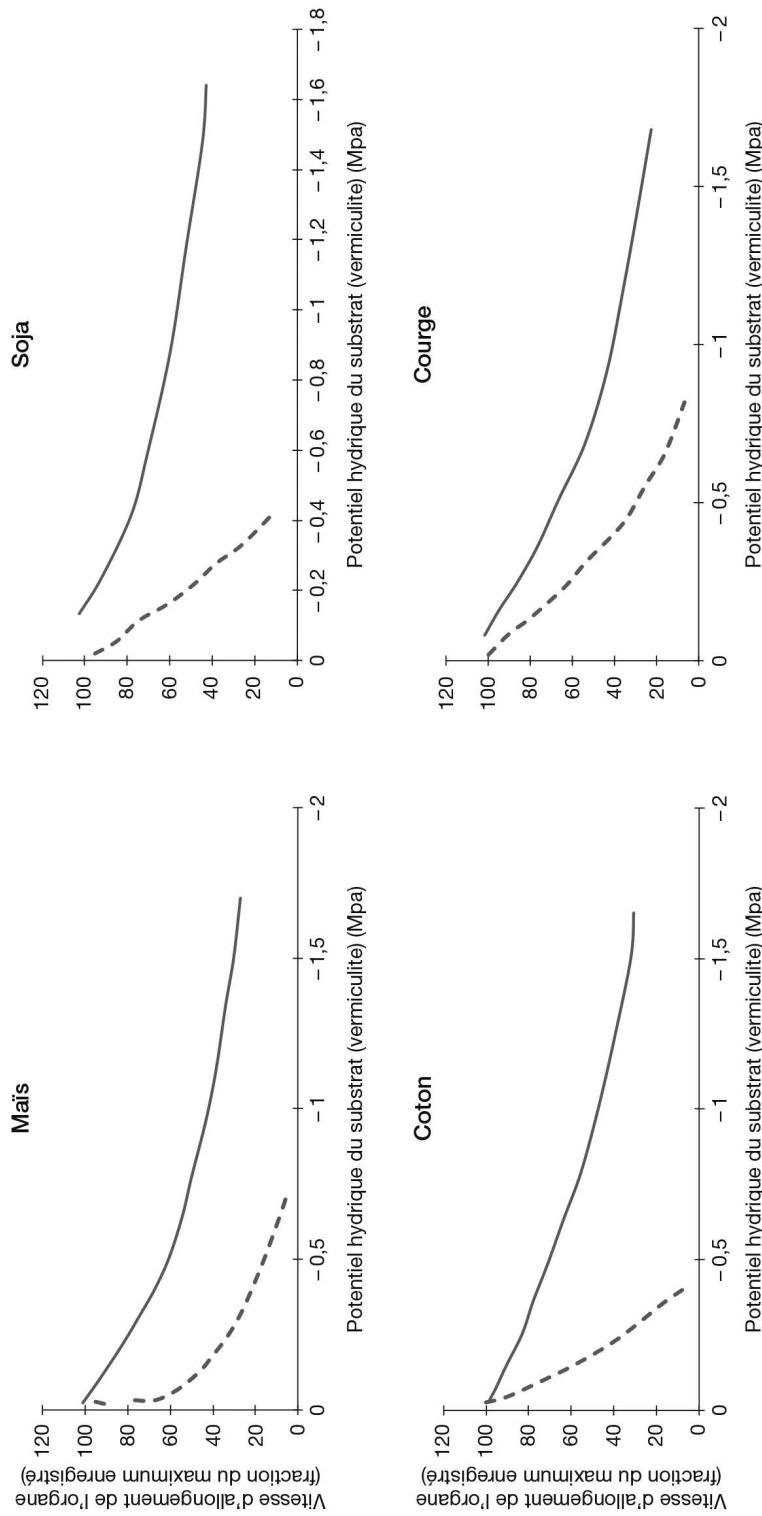


Figure 6.5. Réponses de l'allongement des feuilles (trets) et des racines (traits pleins) chez quatre espèces cultivées (maïs, soja, coton et courge) au potentiel hydrique du milieu de culture (vermiculite). Source : d'après Spollen *et al.* (1993).

En France, la sécheresse résultant du réchauffement climatique provoque des dommages contrastés selon qu'il s'agit de cultures d'hiver ou de printemps (Amigues *et al.*, 2006). Pour les premières, les sécheresses en automne sont susceptibles de gêner l'implantation et réduisent les perspectives d'anticiper significativement les semis. Au printemps, ce sont les phases ultimes de remplissage du grain qui risquent d'être affectées, que ce soit chez les céréales ou chez certaines légumineuses. Enfin, la sécheresse accroît fortement la sensibilité de la formation des grains et la période de reproduction sexuée par un accroissement des températures des organes reproducteurs. Pour les secondes, c'est l'ensemble du cycle et tout particulièrement les phases reproductrices qui sont exposés. L'augmentation de fréquence des périodes de déficit hydrique pénalisant au moment de la production des fleurs, du pollen et de la fécondation occasionne des pertes de grains qui ont un très fort impact sur le rendement final. Les céréales d'hiver évitent généralement ces situations qui pourtant semblent de moins en moins rares au printemps (Brisson et Levraud, 2010). Pour les cultures de printemps, si la sécheresse estivale se prolonge jusqu'en fin d'été, le remplissage des grains lui-même peut être significativement altéré.

Interactions entre les trois facteurs : la teneur en CO₂ atmosphérique, la température et l'eau

Dans la mesure où le cycle de l'eau et, dans ce cycle, le rôle de la conductance stomatique sont bien connus, il est aujourd'hui possible de paramétriser les réponses des différentes fonctions des plantes cultivées aux variations du climat (figure 6.1). Pour autant, la lourdeur expérimentale qui permet d'associer, idéalement de manière factorielle, les trois variables, température, disponibilité en eau et teneur en CO₂, est telle que les données sont rares. Cependant, les expérimentations conduites depuis la moitié des années 1980 en plein air et les expériences en conditions contrôlées permettent de montrer que les réponses à court terme de la morphogenèse et de la productivité primaire sont relativement bien comprises et estimées à partir des réponses à chaque variable séparément (Toreti *et al.*, 2020). En revanche, les réponses à plus long terme à la suite d'exposition continue à ces conditions restent plus complexes. Par exemple, comme le bilan hydrique (P-ETP) se dégrade aussi comme signalé plus haut et que par conséquent les sécheresses édaphiques devraient commencer plus tôt également, l'effet bénéfique de l'avancement des stades sensibles du fait de la hausse des températures est amoindri d'autant. Les principaux outils d'analyse des réponses combinées sont des modèles de simulation qui prennent en compte explicitement les fonctions répondant directement aux variables du changement climatique (voir chapitre 4). Les quinze dernières années ont été riches en analyses de la capacité de ces modèles à capter les effets les plus importants chez un certain nombre de plantes cultivées majeures (voir par exemple Cammarano *et al.*, 2016; Durand *et al.*, 2018).

► Conséquences pour la production et pour la conduite en grandes cultures

Impacts sur les rendements agricoles

Les impacts du changement climatique sur la production agricole peuvent s'appréhender par les variations des rendements moyens sur une période donnée, qu'il s'agisse

de données historiques ou de données projetées issues de modèles, mais aussi par la variabilité interannuelle des rendements que le changement climatique peut induire.

Synthèse des travaux mettant en relation le climat du passé et l'évolution des rendements

Les impacts seront analysés aux échelles mondiales, européennes, nationales et régionales (pour la France). Dans la suite de l'analyse historique synthétisée dans ce chapitre, les écarts à la situation actuelle doivent se comprendre par un écart à une évolution tendancielle très fortement positive. On peut aussi la comprendre comme la variation observée par rapport à des rendements qui n'auraient pas évolué sous l'effet des changements des pratiques agricoles et des technologies.

Analyse des tendances historiques

Depuis le 5^e rapport du Giec, il est admis que les évolutions climatiques au cours de ces dernières décennies ont négativement influencé la progression des rendements du blé et du maïs dans de nombreuses régions du monde et de manière globale, avec des pertes de rendement pouvant atteindre 5 % et 3 % par décennie pour ces deux cultures (médianes à 2 % pour le blé et 1 % pour le maïs). En revanche, les effets sur les rendements du riz et du soja seraient moins sévères tant au niveau mondial que dans les principales régions de production (tropicales) moins exposées aux variations de pluviométrie ou irriguées. Beznér Kerr *et al.* (2022) confirment ces tendances dans le rapport AR6 du Giec. Moore (2020) à l'aide d'un modèle empirique estime que l'effet négatif du réchauffement entre 1961 et 2017 a été en moyenne au niveau mondial de 5,3 % pour les grandes cultures (5,9 % pour le maïs, 4,9 % pour le blé, 4,2 % pour le riz). Une autre étude (Iizumi *et al.*, 2018) basée sur le modèle de culture Cygma estime une perte de rendement de 4,1 % pour le maïs, 4,5 % pour le soja et 1,8 % pour le blé entre 1981 et 2010 par comparaison à des conditions stables de température, y compris en intégrant dans les simulations les effets positifs de la fertilisation par le CO₂.

Selon Shindell (2016), la perte nette (théorique) de rendement pour les quatre grandes cultures mondiales est estimée — toutes choses égales par ailleurs — à $9,5 \pm 3,0\%$ entre 1850 et 2010, après incorporation des effets positifs du CO₂ (6,5 %), des effets négatifs du réchauffement (10,9 %) et de l'élévation de la concentration en ozone troposphérique (5,0 %). On mesure ainsi l'impact finalement modeste du changement climatique sur la croissance de la production mondiale ($-0,6\%$ par décennie) en regard de la progression historique des rendements. Ainsi, les progrès considérables de la sélection végétale et de la conduite des cultures ont pendant longtemps masqué ces effets du réchauffement. Mais aujourd'hui, ces gains de productivité à l'hectare ont mobilisé des ressources qui atteignent leurs limites dans de nombreuses régions, et ne pourront donc plus être mobilisées comme par le passé (irrigation, engrains azotés et phosphatés, produits phytosanitaires, etc.). Les effets du changement climatique par ailleurs plus marqués devraient donc être plus visibles à l'avenir sur l'évolution des rendements.

À l'échelle européenne, Bras *et al.* (2021) ont chiffré les impacts des sécheresses et des vagues de chaleur historiques sur le rendement des céréales (blé, orge, maïs, etc.) à -9% et $-7,3\%$ respectivement, et à $-3,8\%$ et $-3,1\%$ pour les cultures non céréalières (oléagineux, betterave, fruits et légumes, etc.). Les vagues de froid et les inondations ont eu des impacts plus faibles. La fréquence de ces événements a augmenté

avec le temps, mais la sévérité des impacts des vagues de chaleur et des sécheresses sur le rendement a environ triplé au cours des cinquante dernières années avec des pertes passant de -2,2% (1964-1990) à -7,3% (1991-2015). Par ailleurs, les pertes de production céréalière se sont accrues de 3% par an.

Cependant, ces études globales qui s'appuient sur des données statistiques de rendement appuyées par des variables agroclimatiques à différentes échelles spatiales montrent également que les impacts du changement climatique depuis 20-50 ans diffèrent assez fortement selon les cultures et les régions du monde, et ce, indépendamment des méthodes d'évaluation utilisées.

Un autre consensus concerne l'effet positif du réchauffement global pour la production agricole dans les latitudes élevées notamment dans le nord de l'Europe (voir Jaggard *et al.*, 2007 au sujet de la betterave; Supit *et al.*, 2010 au sujet de huit cultures; Gregory et Marshall, 2012 au sujet de la pomme de terre; Moore et Lobell, 2015 à propos du maïs et de la betterave; Nendel *et al.*, 2023 au sujet du soja). En revanche, si des effets positifs ont été identifiés pour le blé en Europe du Nord, ils sont majoritairement négatifs en Europe de l'Ouest et du Sud. En Europe du Sud, la stagnation du rendement s'est généralisée à toutes les cultures, notamment en l'absence d'irrigation (Moore and Lobell, 2015; Agnolucci and De Lipsis, 2020; Brás *et al.*, 2021).

Par ailleurs, Agnolucci et De Lipsis (2020) montrent que pour la plupart des pays européens, c'est bien la température qui est responsable du ralentissement de la progression des rendements du blé au cours des cinquante dernières années, alors qu'un léger gain a été observé pour le maïs, sauf dans les pays du sud de l'Europe. Dans le même temps, la réduction de la fréquence des gels hivernaux sévères depuis 1961 a contribué à atténuer ces effets négatifs du réchauffement pour les cultures d'hiver (Zwiers *et al.*, 2011; IPCC, 2022).

L'évolution des rendements est-elle un bon indicateur des effets du changement climatique ?

Les séries historiques de rendement sont souvent utilisées comme indicateurs des impacts avérés du changement climatique, la stagnation ou le ralentissement de la progression tendancielle des rendements étant interprétés comme des manifestations des effets dépressifs du changement climatique (voir les travaux des observatoires régionaux Oracle des chambres d'agriculture par exemple : Crana, 2020 ou Crao, 2023).

Globalement, les rendements des grandes cultures ont été multipliés par 2,5 à 3 depuis 1960 grâce à la sélection végétale, à la fertilisation, à l'irrigation et à la protection des cultures masquant ainsi un temps les effets du changement climatique observés depuis les années 1990 en France.

Dans le même temps, les évolutions tendancielles des rendements moyens en France sont passées de +1,7% par an en début de période (années 1970) à +0,2% après 1995 pour le blé tendre, de +0,8% à +0,4% pour l'orge, de +1,6% à +0,7% pour le maïs grain et de +1,6% à +0,6% pour le colza (Gate *et al.*, 2016). Schauberger *et al.* (2018) confirment la stagnation des rendements du blé, de l'orge et du tournesol depuis les années 1990 sur au moins 25% du territoire, alors que celle-ci ne l'est pas nettement pour le maïs grain. À l'inverse, les évolutions climatiques ont été longtemps favorables pour la betterave sucrière (+1,8%). Escriou *et al.* (2010) expliquent 60% des augmentations de rendement observées entre 1990 et 2010 (soit 180kg/ha/an de sucre) par l'augmentation tendancielle des températures.

À l'échelle de la France (et de l'Europe), la stagnation des rendements du blé (ou tout du moins le fort ralentissement de la progression des rendements) est avérée depuis 1996 (figure 6.6). L'étude menée par Brisson *et al.* (2010) et la revue effectuée par Le Gouis *et al.* (2020) ont tenté ce travail de décorticage des effets respectifs du changement climatique (stress thermique durant le remplissage du grain, sécheresse durant la montaison), du progrès génétique (régulier), de l'évolution des pratiques culturelles (baisse de la fertilisation azotée, introduction de précédents moins favorables) sur les évolutions récentes du rendement du blé en France et en Europe. Pour expliquer ces évolutions, on ne doit pas oublier l'adaptation incrémentale au changement climatique opérée par les agriculteurs (avancée des dates de semis, changement des groupes de maturité). Les auteurs estiment l'effet dépressif du climat sur le rendement du blé entre -0,2 et -0,5 q/ha/an selon les modèles d'impact utilisés, soit environ la moitié de ce ralentissement. Ce sont les régions céréalières du centre et du sud de la France qui ont été soumises depuis 1950 à un accroissement des risques liés à la sécheresse et à l'échaudage thermique pour les céréales (Gate, 2007 ; Gate *et al.*, 2008 et 2010).

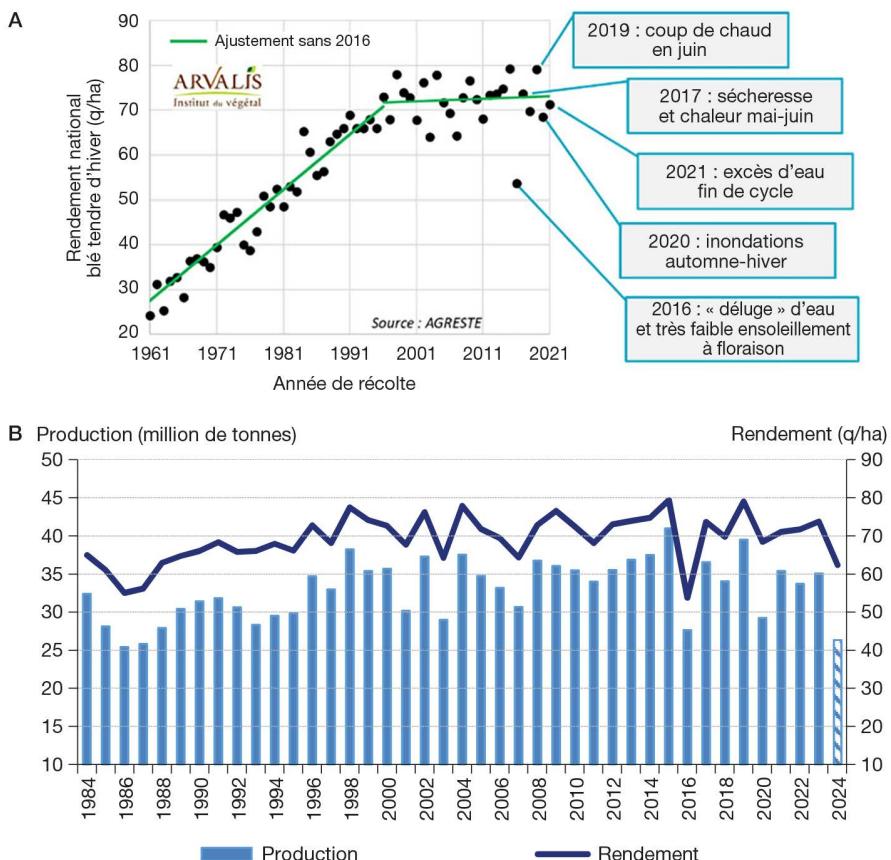


Figure 6.6. Évolution (A) du rendement (1961-2024) et (B) de la production nationale de blé d'hiver (depuis 1984). Source : Arvalis et Agreste.

On note l'augmentation de la fréquence des aléas climatiques dont certains (2016, 2024) ont gravement pénalisé les rendements.

Oury *et al.* (2012) ont montré ainsi que depuis la fin des années 1980, le progrès génétique sur le blé a été partiellement ou totalement contrebalancé par les effets négatifs du changement climatique. Une analyse semblable a été conduite en Allemagne confirmant l'importance des fortes températures en fin de cycle (Bönecke *et al.*, 2020). Mais selon Moore et Lobell (2015), le changement climatique pourrait n'expliquer que 10 % du ralentissement des rendements de blé et d'orge en Europe. D'autres raisons liées à la composition des assolements (fort recul des légumineuses, Brisson *et al.*, 2010), aux réglementations environnementales (sur la qualité des eaux, van Grinsven *et al.*, 2012) et aux coûts marginaux croissants des intrants (Agreste, 2023) ont contribué en effet à la limitation de la progression des rendements par simplification et extensification des successions de cultures.

Effets des événements climatiques extrêmes

Plusieurs études ont analysé les conséquences de scénarios climatiques extrêmes (sécheresse sévère, vagues de chaleur, combinaisons inédites de conditions climatiques, etc.) et leurs conséquences sur la production lors d'années exceptionnelles, soulignant combien ces situations extrêmes pourraient devenir des scénarios fréquents, voire normaux dans le futur : par exemple la canicule en France et en Europe en 2003, la pluviométrie excessive au printemps 2016 et la sécheresse intense et continue en 2022.

La comparaison des rendements observés avec les indicateurs climatologiques révélant les anomalies par rapport à la moyenne ou à la tendance permet d'estimer les variations de rendements possibles à grande échelle lors de tels événements isolés ou successifs, attribués au changement climatique.

Ainsi, on peut mentionner plusieurs travaux :

- Ciais *et al.* (2005) pour l'analyse des effets conjugués de la canicule et de la sécheresse en Europe en 2003 ;
- Debaeke et Bertrand (2008) pour l'analyse rétrospective des pertes de rendement des cultures attribuables aux sécheresses entre 1976 et 2006, soit 10 % à 30 % de pertes selon les cultures, les régions et les années ;
- Bastos *et al.* (2014) et Brilli *et al.* (2014) pour une évaluation des scénarios extrêmes couplant chaleur et sécheresse en 2003, 2010 et 2012 ;
- Ben Ari *et al.* (2018) pour l'analyse rétrospective de l'année 2016 qui s'est traduite par une baisse de 28 % du rendement du blé dans le Bassin parisien consécutivement à une fin d'automne anormalement chaude et un printemps excessivement humide et peu lumineux.

Synthèse des travaux mettant en relation le climat projeté et l'évolution des rendements sans adaptation

En se basant sur les résultats des simulations à l'aide de modèles de culture (dynamiques ou statistiques) et de séries climatiques régionalisées correspondant à différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES), des projections de rendements ont été abondamment rapportées dans la littérature pour une gamme de modèles de culture et de modèles climatiques de plus en plus souvent utilisés de manière ensembliste et appliqués aux différents scénarios du Giec (Rezaei *et al.*, 2023).

Comme précédemment évoqué, les principales cultures étudiées sont le blé, le maïs, le riz et le soja au niveau mondial. Les projections sont réalisées à l'échelle stationnelle

ou au niveau de mailles quadrillant un territoire plus ou moins vaste (de la petite région à l'Europe, voire à l'échelle mondiale). Les impacts ne prennent ici en compte que l'évolution du climat sans adaptation ni évolution tendancielle des rendements dus au progrès technologique et en négligeant les facteurs limitants biotiques. Ainsi, Porter *et al.* (2014) montrent que 75 % des travaux de simulation (publiés entre 2000 et 2011) concluent à des pertes de rendement pouvant atteindre 25 % en 2050 et plus de 50 % d'ici la fin du siècle. Les projections confirment donc en partie les tendances historiques observées en les amplifiant (tableau 6.1).

Au niveau mondial, sans adaptation spécifiquement liée au climat, Abramoff *et al.* (2023) projettent à l'aide d'un métamodèle des pertes de rendement comprises entre -6 % (riz) et -21 % (maïs) à l'horizon 2060 pour le scénario RCP4.5. Pour l'Europe, Donatelli *et al.* (2012; 2015) à l'aide du modèle CropSyst ont simulé les impacts sur le rendement à l'horizon 2030 pour quatre cultures (blé, colza, maïs, tournesol). Les variations de production prédictes sont bien différentes selon les modèles climatiques utilisés (différences de pluviométrie) et selon les régions européennes : -5 % à +3 % (blé); -7 % à +2 % (colza); -9 % à +10 % (maïs); -10 % à -16 % (tournesol). À l'aide du modèle SimPlace, Zimmerman *et al.* (2017) estiment ainsi des variations de rendement à l'horizon 2050 à l'échelle de l'UE-27 (les 27 pays de l'Europe) entre -6 % et +21 % selon les cultures et les scénarios d'émission de GES, sous l'hypothèse d'un effet bénéfique du CO₂. La pomme de terre et le maïs grain seraient les cultures les plus touchées négativement. Webber *et al.* (2018) à l'aide d'une approche multimodèle projettent une perte de 20 % des rendements pour le maïs à l'horizon 2050 (avec ou sans effet du CO₂), alors que le rendement du blé pourrait augmenter de 4 % (avec effet du CO₂) et baisser de 9 % (sans effet du CO₂) : l'effet principal est dû à la sécheresse sans recours à la fertilisation par le CO₂ les années sèches (figure 6.7).

Se basant sur 729 études (revue systématique) pour sept espèces, Knox *et al.* (2016) projettent une augmentation moyenne de +8 % du rendement à l'horizon 2050 pour l'Europe avec de fortes disparités régionales : +14 % (Europe du Nord), +6 % (Europe

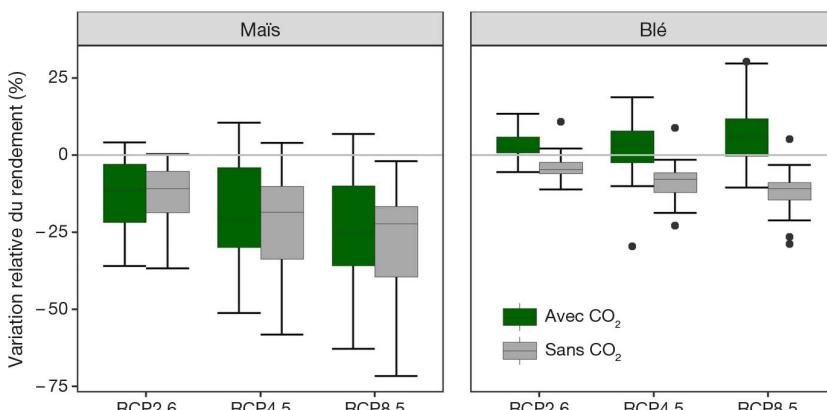


Figure 6.7. Changements projetés (période 2040-2069 comparée à la période 1981-2010) des rendements de maïs et de blé au niveau de l'Europe en fonction de trois scénarios d'émission des GES (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) avec ou sans prise en compte de l'effet de la fertilisation par le CO₂. Source : Webber *et al.* (2018).

La simulation tient compte de la répartition actuelle des surfaces irriguées ou non pour chaque culture.

centrale), + 5 % (sud de l'Europe). Globalement, les rendements pourraient augmenter de 14 % pour le blé, de 15 % pour la betterave et de 8 % pour la pomme de terre, mais diminuer de 6 % pour le maïs (+ 14 % en Europe du Nord, mais - 11 % en Europe du Sud). À l'horizon 2080, la dégradation serait générale pour les cultures d'été (dont - 28 % pour le maïs) dans le sud et le centre de l'Europe. Ces auteurs notent également que pour l'Europe la plupart des travaux se concentrent sur le blé, le maïs, la pomme de terre et la betterave. Selon Ma *et al.* (2016), l'augmentation du rendement potentiel du blé à l'horizon 2050 (+ 14 %) serait principalement due à l'effet de la fertilisation par le CO₂ (+ 15 %), alors que les évolutions de température et de précipitations en Europe conduiraient globalement à une baisse de 1 % de ce potentiel en culture non irriguée. Debaeke *et al.* (2017) illustrent pour le tournesol, culture d'été non irriguée, la grande variabilité des prévisions en Europe selon les méthodes retenues (+ 8 % à - 46 %).

Au niveau de l'Europe, les études s'accordent sur les trois points suivants :

– Une augmentation des rendements des cultures d'hiver et de la betterave dans les régions intermédiaires et septentrionales de l'Europe à l'horizon 2050, en relation avec des températures plus favorables, une pluviométrie hivernale plus abondante et une valorisation de l'effet du CO₂ compensant la réduction du cycle (Mereu *et al.*, 2021). Ainsi, il est intéressant de relever que :

- à l'aide du modèle SimPlace, Zhao *et al.* (2015) montrent que les rendements de trois cultures d'hiver (blé, orge, colza) et de la betterave pourraient augmenter jusqu'à + 36 % dans les régions intermédiaires et septentrionales de l'Europe à l'horizon 2050 (avec effet du CO₂);
- Hristov *et al.* (2020) à l'aide du modèle Wofost montrent que le rendement du blé pourrait augmenter de 5 % à 16 % dans le nord de l'Europe à l'horizon 2050;
- Nendel *et al.* (2023) montrent que les rendements du soja pourraient augmenter dans les zones septentrionales où les températures limitent encore le développement de la culture et l'utilisation de variétés à cycle plus long.

– Une baisse assez générale des productions dans le sud de l'Europe (notamment dans la région méditerranéenne) à systèmes de culture constants (c'est-à-dire sans adaptation), mais avec des variations intrarégionales. Ainsi :

- à l'aide du modèle SimPlace, Zhao *et al.* (2015) montrent que les rendements du blé, de l'orge et du colza pourraient baisser de 81 % dans la zone méditerranéenne à l'horizon 2050;
- Hristov *et al.* (2020) à l'aide du modèle Wofost simulent des pertes de rendements jusqu'à - 49 % pour le blé dans le sud de l'Europe;
- en Espagne, selon Bento *et al.* (2021) qui utilisent une approche statistique, de fortes pertes sont attendues pour le blé et l'orge dans le sud de la péninsule Ibérique en raison de fortes températures printanières, alors qu'une augmentation des rendements est attendue dans les régions plus septentrionales de l'Espagne en raison des températures plus douces de l'hiver qui stimulent la croissance précoce;
- au niveau de la région méditerranéenne, Cammarano *et al.* (2019) avec le modèle Ceres-Barley montrent en moyenne une baisse de 9 % du rendement de l'orge avec respectivement - 27 %, + 4 % et + 8 % de variation selon les scénarios pluviométriques testés (sec, intermédiaire, humide);
- en Italie, Mereu *et al.* (2021) sur la base du modèle Ceres-Wheat montrent que le rendement du blé devrait diminuer principalement dans le sud de l'Italie, tandis que le nord de la péninsule pourrait bénéficier de régimes de précipitations plus élevés.

- Des impacts négatifs assez généralisés sur le maïs, mais des résultats contradictoires :
 - en Italie, Mereu *et al.* (2021) sur la base du modèle Ceres-Maize obtiennent pour le maïs des baisses de rendements de – 20 % en 2050 et de – 33 % (dans le Centre) à – 43 % (dans le Sud) en 2080 pour le scénario RCP8.5;
 - Webber *et al.* (2018) à l'aide d'une approche multimodèle projettent une perte de 20 % des rendements pour le maïs à l'horizon 2050 (avec ou sans effet du CO₂);
 - Hristov *et al.* (2020) à l'aide du modèle Wofost simulent des pertes de rendements entre – 1 et – 22 % pour le maïs à l'horizon 2050;
 - sans adaptation, le rendement du maïs simulé par Apsim-Maize en situation non irriguée à l'horizon 2050 serait réduit dans 70 % des cas (RCP4.5), en particulier aux latitudes 43° N à 47° N qui représentent les principaux bassins de production européens (Parent *et al.*, 2018); en revanche, le rendement augmenterait pour les latitudes supérieures à 47° N et pour les situations bien alimentées en eau du fait d'un rayonnement plus élevé autour de la floraison. Au niveau de l'Europe, il en résulte un faible effet (– 2 % pour RCP4.5 et + 0,6 % pour RCP8.5). En situation irriguée, les impacts sont également faibles (+ 1,8 % pour RCP4.5 et + 1,0 % pour RCP8.5). Globalement, les changements seraient faibles au niveau européen (– 0,8 % pour RCP4.5 et + 0,8 % pour RCP8.5). Cette étude contraste avec les travaux mentionnés plus haut qui concluent généralement aux plus fortes baisses pour le maïs en Europe.

Les résultats au niveau de la France, partagée entre différents types de climats, traduisent également cette différenciation nord-sud. Au niveau de la France, l'étude Climator publiée en 2010 est la première, et toujours l'unique, étude d'impact à l'échelle régionale et nationale des effets du changement climatique sur le rendement des cultures (Brisson et Levraud, 2010). Utilisant un nombre limité de modèles climatiques et de modèles de culture, elle a permis de projeter pour douze stations climatiques métropolitaines les impacts sur le rendement pour cinq espèces (blé, colza, maïs, sorgho, tournesol) pour des horizons temporels proches ou lointains. De manière générale, l'étude conclut à des augmentations de rendement pour les cultures dans les régions septentrionales et en altitude du fait de la température plus favorable, mais à un moindre confort hydrique notamment dans les régions sud, touchant notamment le rendement du maïs sans adaptation. Le tableau 6.2 résume ces effets pour les cinq cultures étudiées qui rejoignent les conclusions précédentes.

Tout cela est assez cohérent avec la réduction de la durée du cycle et de la capture du rayonnement, l'augmentation de la fréquence des hautes températures et le déclin de la pluviométrie localement, processus compensés en partie (selon les espèces C3 ou C4 et l'intensité des stress) par l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique. Par ailleurs, l'anticipation des stades et le raccourcissement du cycle sous l'action du réchauffement permettent d'esquiver en partie les stress thermiques et hydriques de fin de cycle pour les cultures d'hiver (Brisson et Levraud, 2010). Par contraste, d'ici la fin du siècle, à l'aide d'un modèle statistique, Gammans *et al.* (2017) projettent pour la France des baisses de rendement plus sévères (de 17 % à 34 %) pour les céréales à paille (RCP8.5) à technologie constante.

Cela illustre bien le fait que les résultats des études d'impact sur le rendement diffèrent fortement selon les zones géographiques, les espèces cultivées, la nature et l'horizon temporel des scénarios d'émission testés (SRES, Special Report on Emissions Scenarios, ou RCP, Representative Concentration Pathways), les modèles

climatiques, les modèles de projection des rendements et les hypothèses sur les concentrations en CO₂ (tableau 6.1). Certains résultats qui apparaissent contradictoires ou éloignés le sont moins si on les resitue au regard des éléments précédents. Par rapport aux données historiques, les résultats de projection amplifient encore les estimations de pertes. Si certains effets positifs apparaissent à l'horizon 2050, ils sont souvent gommés en fin de siècle par l'augmentation des contraintes hydriques et thermiques. Certaines études introduisent dans les projections de rendements les effets du progrès technologique (variétés, conduite de culture) ou les adaptations incrémentales, entraînant ainsi des augmentations de rendements à l'horizon 2050 en dépit d'effets contrastés du changement climatique (Zimmerman *et al.*, 2017; Tibi *et al.*, 2020; Forslund *et al.*, 2023).

Ainsi, les variations observées pour les données de projection dépendent des hypothèses retenues par les auteurs et des modèles utilisés. Il convient donc de prendre en considération les cinq points suivants :

- Les scénarios de forçage climatique (émissions de GES en fonction des politiques d'atténuation mises en œuvre ou RCP) : selon les études, les RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 sont les plus utilisés, mais il est rare de disposer de tous ces scénarios dans une même étude (en général un ou deux scénarios) ; RCP4.5 et 8.5 (le plus pessimiste) sont les plus employés.
- Les modèles climatiques globaux (GCM) et les méthodes de régionalisation (descente d'échelles) (RCM) sont très nombreux et donnent des résultats contrastés (par exemple Donatelli *et al.*, 2012), d'où une approche le plus souvent ensembliste.
- Les modèles de prévision des impacts (statistiques ou mécanistes ; incertitudes sur le paramétrage des modèles ; erreurs liées à la structure/complétude des modèles) : si

Tableau 6.1. Comparaison des méthodes et des hypothèses pour plusieurs exercices de projection des rendements en France et en Europe.

Références	Cultures	Zone géographique	Horizon temporel	Scénario SRES ou RCP	Modèles climatiques globaux GCM
Brisson et Levrault (2010)	Blé d'hiver Colza Maïs Sorgho Tournesol	France 12 stations climatiques 3 sols	Actuel (1971-2000) FP ⁽¹⁾ (2020-2050) FL ⁽²⁾ (2070-2100)	A1B B1 B2	Arpège-NCAR- ISS-MRI- CCCMA
Donatelli <i>et al.</i> (2012; 2015)	Blé Colza Maïs Tournesol	Europe Grille de 25 × 25 km	2000 2020 2030	A1B	Echam5 HadCM3 GCM
Zhao <i>et al.</i> (2015)	Blé d'hiver Orge d'hiver Maïs grain Colza Betterave Pomme de terre	EU-25 NUTS2 ⁽³⁾	1982-2006 2040-2064	A1B B1 B2	Miroc3.2 15GCM (moyenne de l'ensemble)

les premières études s'appuyaient sur un seul modèle, le standard évolue aujourd'hui vers la prise en compte d'un panel de modèles (approche ensembliste), afin de tenir compte des fortes incertitudes associées aux projections. Par ailleurs, Xiong *et al.* (2016) montrent que les méthodes de calibration utilisées pour le modèle de culture Epic peuvent conduire à des prévisions de pertes de rendement au niveau mondial pour le maïs variant de – 12 % à – 24 % en 2080 (RCP8.5) et de – 4 % à – 10 % en 2050.

– Les résultats variables selon l'horizon temporel considéré (futur proche autour de 2040-2060; futur lointain 2080-2100) et les zones géographiques (en particulier, le sud ou le nord de l'Europe) : ces deux dimensions modifient fortement l'importance des variations de rendement simulées.

– La prise en compte ou non de la fertilisation par le CO₂ atmosphérique (Rozenzweig *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015; Webber *et al.*, 2018). À ce sujet, les simulations «sans effet du CO₂» ne doivent pas laisser croire que ce dernier n'aurait peut-être pas d'impact (Toreti *et al.*, 2020), mais traduisent la faiblesse de certains modèles à prendre en compte correctement l'effet du CO₂ et simulent donc une valeur d'impact par défaut.

Enfin, la prise en compte ou non d'adaptations incrémentales (ajustement des dates de semis et des précocités variétales par règles de décision ou de manière arbitraire) ou du progrès génétique et technologique (approche tendancielle ou non des évolutions de rendement) est de nature à moduler fortement les résultats des simulations, avec des sens de variation parfois opposés.

Le tableau 6.1 résume un certain nombre de résultats au niveau de la France et de l'Europe en précisant les conditions précédentes.

Méthode de régionalisation RCM	Modèles d'impact	CO ₂	Adaptation incrémentale	Impact (gamme) sans adaptation
Arpège régionalisé par 3 méthodes : ANO, SS, TT	Stics Sunflo Ceres Panoramix	Oui	Avec et sans (variété, date de semis, irrigation)	+ 0,9 à + 2,6 t/ha (blé) – 1,8 à + 8,2 t/ha (maïs) – 0,8 à + 5,8 t/ha (sorgho) + 0,6 à + 2,5 t/ha (colza) + 0,4 à + 3,2 t/ha (tournesol)
HIRHAM5 RCM HadRM3 RCM	CropSyst (BioMA)	Oui	Avec et sans (variété, date de semis)	2030 : + 100 % à – 25 % (blé) + 78 % à – 15 % (maïs) – 4 % à – 25 % (tournesol) + 52 % à – 15 % (colza)
Non précisé	SimPlace (Lintul-5, Drunir, Heat)	Oui/ Non	Irrigué vs non irrigué	– 49 % à + 36 % (toutes cultures)

Tableau 6.1. (suite)

Références	Cultures	Zone géographique	Horizon temporel	Scénario SRES ou RCP	Modèles climatiques globaux GCM
Zimmerman <i>et al.</i> (2017)	Blé d'hiver Orge d'hiver Maïs grain Colza Betterave Pomme de terre	EU-27 NUTS2	2004 2050	A1B B1 B2	Miroc3.2 15GCM (moyenne de l'ensemble)
Parent <i>et al.</i> (2018)	Maïs grain	59 sites en Europe Grille de 25 × 25 km	1975-2010 2050	RCP 4.5 RCP 8.5	GFDL-CM3 HadGEM2-ES Miroc5 MPI-ESM-MR CMCC-CM Miroc-ESM
Webber <i>et al.</i> (2018)	Blé d'hiver Maïs grain	EU-27 + NUTS2 Grille de 25 × 25 km	1980-2010 2040-2069	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	GFDL-CM3 GISS-E2-R HadGEM2-ES Miroc5 MPI-ESM-MR
Cammarano <i>et al.</i> (2019)	Orge	9 sites en Méditerranée Nord et Sud	1980-2010 Milieu de siècle	RCP4.5	40 GCM (3 par site)
Hristov <i>et al.</i> (2020)	Blé Maïs	EU-27 Grille de 12 × 12 km	1981-2010 2050	RCP4.5 RCP8.5	Non précisé
Mereu <i>et al.</i> (2021)	Blé tendre Blé dur Maïs	Italie Grille de 8 × 8 km	1976-2005 2006-2035 2036-2065 2066-2095	RCP4.5 RCP8.5	CMCC-MED
Nendel <i>et al.</i> (2023)	Soja	Europe Grille de 25 × 25 km	1980-2010	RCP4.5 RCP8.5	GFDL-CM3 GISS-E2-R HadGEM2-ES Miroc5 MPI-ESM

⁽¹⁾ FP : futur proche; ⁽²⁾ FL : futur lointain; ⁽³⁾ NUTS2 : Nomenclature des unités territoriales statistiques (au niveau UE)

D'autres facteurs limitants moins évoqués pourraient pénaliser le rendement des cultures. Ainsi, Liu *et al.* (2023) à l'aide du modèle Apsim montrent que les pertes consécutives aux situations d'hydromorphie pourraient passer de 3-11% historiquement à 10-20% d'ici 2080 avec une sévérité dépendante de la durée d'engorgement et du stade auquel l'excès de précipitations se manifeste.

Méthode de régionalisation RCM	Modèles d'impact	CO ₂	Adaptation incrémentale	Impact (gamme) sans adaptation
Non précisé	SimPlace (Lintul-5, Drunir, Heat)	Oui	Avec et sans (variété, date de semis)	+ 8 % à + 15 % (blé) + 12 % à + 21 % (orge) + 13 % à + 25 % (colza) - 4 % à + 3 % (maïs) - 6 % à + 3 % (pomme de terre) + 4 % à + 12 % (betterave)
LARS-WG	Apsim-Maize	Oui	Avec et sans (variété, date de semis, irrigation)	+ 0,6 % à - 2 % (sec) + 1 % à 1,8 % (irrigué)
Non précisé	4M, Cropsyst, Fasset, Hermes, Monica, SimPlace-Lintul5, Sirius 2015, SiriusQuality v3, SSM-Wheat, IXIM	Oui/ Non	Irrigué vs non irrigué	+ 4 % à - 9 % (blé) - 20 % (maïs)
3 scénarios par site : sec, moyen, humide	Ceres-Barley	Oui	8 dates de semis	- 27 % à + 8 %
Euro-Cordex RCM	Wofost	Oui/ Non	Variété et date de semis	- 1 % à - 24 % (maïs) + 16 % à - 49 % (blé)
Cosmo-CLM	Ceres-Maize Ceres-Wheat	Oui/ Non	Sans	- 7 % à + 18 % (blé) - 21 % à - 32 % (maïs irrigué)
Méthode <i>delta change</i> améliorée	Apsim Monica Hermes Stics	Oui	Variété Irrigué ou non	+ 9 % à + 33 % (avec maturité adaptée)

L'augmentation des concentrations en ozone (O₃) troposphérique est à relier au réchauffement de l'atmosphère et pourrait s'amplifier avec le scénario RCP8.5. Ce polluant peut causer des pertes de rendements estimées entre 2 % et 16 % selon les cultures et les régions (Van Dingenen *et al.*, 2009) ce qui pourrait gommer l'effet positif attendu de l'élévation du CO₂ (Leung *et al.*, 2022).

Tableau 6.2. Impacts positifs et négatifs du changement climatique pour cinq grandes cultures et pistes d'adaptation.

	Impacts positifs	Impacts négatifs	Pistes d'adaptation
Blé	<ul style="list-style-type: none"> • Anticipation des stades + raccourcissement du cycle → esquive de stress abiotiques (gel d'épis, stress hydrique, etc.) • Tendance à la diminution des maladies fongiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Moindre confort hydrique • Augmentation des risques d'échaudage dans les zones septentrionales 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplifier l'esquive des stress par l'avancée des semis ou le choix de variétés précoces • Le risque de gel d'épis est une limite à la précocité ou à l'implantation du blé en altitude
Colza	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution puis disparition des risques de gel létaux pendant l'hiver pour les sites du nord-est et du centre-est 	<ul style="list-style-type: none"> • Forte sensibilité aux sécheresses de début de cycle → difficultés d'installation de la culture et déficit d'absorption azotée 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de variétés à montaison rapide • Retard des semis et utilisation d'irrigation de complément ponctuellement
Maïs Sorgho	<ul style="list-style-type: none"> • Moindre exposition aux basses températures en début de cycle 	<ul style="list-style-type: none"> • Raccourcissement de la période de remplissage des grains • Augmentation du déficit hydrique climatique appelant un supplément d'irrigation • Évolution à la baisse des rendements moins marquée pour le sorgho 	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement des cycles variétaux dans les zones nord • Choix de variétés à cycle long et semis avancé dans le Sud • Relocalisation géographique et édaphique des cultures de maïs et de sorgho
Tournesol	<ul style="list-style-type: none"> • Les effets positifs de l'augmentation en CO₂ dans l'atmosphère compensent les effets négatifs du stress hydrique 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité à l'augmentation de la variabilité interannuelle (sécheresses pendant la phase végétative en particulier) 	<ul style="list-style-type: none"> • Choix de variétés à cycle long et semis avancé • Double culture après une culture d'hiver

Source : d'après le *Livre vert du projet Climator* (Brisson et Levraud, 2010).

Impacts sur la variabilité des rendements

Le changement climatique à venir qui se traduirait *a priori* par une variabilité climatique interannuelle plus marquée, des séquences climatiques plus imprévisibles, assorties d'événements extrêmes plus fréquents devrait avoir comme conséquence logique un accroissement de la variabilité des rendements. Sans adaptation, cela peut se traduire par des conséquences négatives pour la trésorerie des exploitations et pour la sécurisation de l'approvisionnement des filières. À un niveau plus global, les conséquences sur l'évolution des prix et des échanges peuvent être significatives. Cela nécessite une gestion économique du risque climatique (Kapsambelis, 2022).

Ce dernier point a été peu exploré, car les études se concentrent principalement sur le rendement moyen et sur les conséquences globales pour la sécurité alimentaire.

À une échelle mondiale, Liu *et al.* (2021) montrent pour le scénario RCP8.5 que 62 % des surfaces cultivées en blé pourraient connaître un changement significatif de la variabilité interannuelle du rendement pour le futur lointain (54 % pour RCP4.5), 44 % des surfaces (31 % pour RCP4.5) verraient une réduction du coefficient de variation interannuel (CV), et 18 % (23 % pour RCP4.5) connaîtraient une plus forte instabilité notamment dans les régions chaudes à conduites extensives qui constituent souvent les principaux greniers à blé mondiaux. Il apparaît que, dans 72 % des cas (53 % pour RCP4.5), c'est le changement de température plus que de précipitations qui explique la variation de CV.

Cependant, Iizumi et Ramakutty (2016) ont analysé la variabilité des rendements pour le maïs, le soja, le riz et le blé sur la période 1981-2010 : ils ont montré que celle-ci avait diminué au contraire selon les cultures dans 19 % à 33 % de la surface cultivée totale et augmenté dans seulement 9 % à 22 % des zones notamment pour le maïs et le soja en Argentine et dans le nord-est de la Chine, et pour le blé en Australie, en France et en Ukraine. Au total, 21 % de la variabilité des rendements étaient explicables par des variables agroclimatiques au premier rang desquelles les hautes températures. Ainsi, bien que la réduction de la variabilité interannuelle soit la règle, le rendement est devenu plus instable dans certaines régions du monde à fort enjeu pour la sécurité alimentaire mondiale (maïs et soja en Argentine et en Chine du Nord-Est; riz en Indonésie et en Chine du Sud; blé en Australie, en France et en Ukraine). Là encore cependant, les politiques de marchés nationaux ou internationaux ou la gestion à la baisse des stocks de sécurité interviennent au premier ordre comme facteur d'insécurité alimentaire.

Dans l'étude Climator au niveau de la France, Brisson et Levraud (2010) ne concluaient pas à une augmentation systématique du CV pour toutes les cultures tant en futur proche que lointain.

Cela peut être lié à la prise en compte insuffisante par les modèles climatiques utilisés lors des exercices de simulation et dans certaines gammes de variations, de l'impact sur certains processus de variables telles que les excès d'eau ou bien les très fortes températures de milieu de journée (Schewe *et al.*, 2019).

Effets sur la qualité des récoltes

Le changement climatique (contraintes hydriques, thermiques et nutritionnelles, assimilation carbonée, etc.) pourrait affecter la qualité des récoltes avec des conséquences sur la santé humaine et animale (en modifiant les équilibres nutritionnels), mais aussi sur les procédés de transformation (Myers *et al.*, 2014; DaMatta *et al.*, 2010). Comparativement aux travaux sur les rendements, les impacts sur la qualité ont été assez peu explorés.

Certaines études expérimentales en conditions contrôlées ou par simulation concluent à l'augmentation des teneurs en protéines des céréales (blé, orge, riz) sous l'effet des hautes températures et/ou de contraintes hydriques (Asseng *et al.*, 2019). Cela est à relier aux baisses du rendement-grain, l'assimilation carbonée étant davantage pénalisée que le prélèvement d'azote par les changements climatiques. Ce *trade-off* est bien connu en sélection pour de fortes teneurs en protéines.

Par ailleurs, l'augmentation de la concentration en CO₂ et ses conséquences sur la croissance des plantes en C3 pourraient conduire à une diminution de la teneur en

protéines des organes récoltés en l'absence de stress abiotique (Pikki *et al.*, 2007; DaMatta *et al.*, 2010; Erbs *et al.*, 2010; Högy *et al.*, 2010; Fernando *et al.*, 2012). Une méta-analyse à partir de 228 études expérimentales révèle des diminutions comprises entre 10% et 15% pour les grains (blé, orge, riz) et les tubercules (pomme de terre), mais de seulement 1,4% pour une légumineuse comme le soja, lorsque ces cultures sont cultivées en présence d'une teneur en CO₂ élevée (Taub *et al.*, 2008). Il semble cependant que de fortes concentrations en CO₂ auraient également un effet négatif direct sur l'accumulation de protéines dans le grain indépendant de l'effet rendement, mais lié à une limitation de l'assimilation du nitrate (Pleijel et Uddling, 2012).

De la même manière, les teneurs en autres macro et micronutriments (P, S, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe) pourraient être réduites de 2,5% à 20% dans les grains de blé sous CO₂ élevé (Loladze, 2002; Fernando *et al.*, 2012; Myers *et al.*, 2014).

Les concentrations élevées en O₃ (ozone) semblent avoir un effet inverse de celui du CO₂. Une méta-analyse d'une cinquantaine d'expériences sur le blé a montré qu'une concentration élevée d'O₃ augmentait la concentration en protéines des grains tout en diminuant le rendement (Pleijel et Uddling, 2012).

Cependant, cet effet dépressif du CO₂ pourrait être atténué en condition de températures élevées et de stress hydrique (Fernando *et al.*, 2012) ou de forte disponibilité en azote (Taub *et al.*, 2008).

La teneur en huile et la composition en acides gras pourraient être modifiées par le statut hydrique des plantes et par la température ambiante. Chez les oléagineux, la teneur en huile des graines est pénalisée par les fortes températures et le stress hydrique au cours de la phase de remplissage par défaut d'alimentation carbonée (Andrianasolo *et al.*, 2016; Attia *et al.*, 2021). De même, les températures élevées favorisent la biosynthèse d'acide oléique au détriment de la fraction linoléique (Aguirrezzabal *et al.*, 2015), avec des conséquences positives pour la nutrition humaine et la conservation des graines. L'augmentation de la concentration en CO₂ ne modifierait pas la teneur en huile, mais favoriserait la teneur en acide oléique (Högy *et al.*, 2010).

Effets sur les calendriers culturaux et les jours disponibles

En grande culture, plusieurs études rendent compte de l'avancée progressive des dates de semis pour les cultures de printemps. Une partie de cette tendance est très probablement consécutive au réchauffement printanier plus précoce, qu'il s'agisse de travaux par simulation ou de l'observation des pratiques culturales. Ainsi, les agriculteurs se sont progressivement adaptés et ont changé leurs pratiques de manière autonome et spontanée afin de faire face aux évolutions climatiques ou de valoriser de nouvelles opportunités. Iizumi *et al.* (2014) observent une anticipation des semis de 4,3 jours par décennie pour la Corn Belt entre 1980 et 2006 (soit 12 jours). En Nouvelle-Aquitaine, les semis de maïs ont avancé de 5 à 6,3 jours par décennie au cours des vingt dernières années (Crana, 2020). Par ailleurs, sur la base des modèles Epic et Swat, Marcinkowski *et al.* (2018) en Pologne prévoient une avancée possible des semis d'orge de printemps de 23 jours et de maïs de 30 jours pour un scénario RCP8.5 et un futur proche ; dans le même temps, un accroissement des précipitations au printemps pourrait rendre ces semis précoce difficilement réalisables en pratique.

La diminution assez générale des précipitations en France aura des répercussions sur l'état de surface des sols cultivés. Plus précisément, on devrait assister à une augmentation du nombre de jours disponibles où l'humidité des sols est suffisamment faible pour permettre l'intervention des engins agricoles dans les parcelles. En effet, les simulations Climator (Brisson et Levraud, 2010) montrent qu'à l'automne cette tendance est particulièrement visible dans la moitié nord de la France où le changement climatique devrait faciliter la réalisation des chantiers d'automne (récolte du maïs, préparation des semis d'hiver). En revanche, dans le Sud, la moindre pluviométrie devrait diminuer le nombre de jours favorables aux semis, l'humidité insuffisante du sol empêchant une germination et une levée satisfaisantes des plantes. Le recours à l'irrigation « *starter* » pourrait alors se généraliser dans ces situations.

À l'échelle de l'Europe également, Trnka *et al.* (2011) montrent que dans la grande majorité des zones climatiques le nombre de jours disponibles pour les récoltes estivales devrait augmenter ainsi que la variabilité associée. En région méditerranéenne, le nombre de jours favorables pour le semis devrait diminuer en raison des fréquences accrues de sécheresse, rendant nécessaire une irrigation pour la levée. Ailleurs, les nombres de jours disponibles pour les semis précoces au printemps et les semis d'automne devraient s'accroître, avec davantage de variabilité pour les semis tardifs de printemps et dans certaines zones climatiques pour les semis d'automne.

Dans les régions septentrionales, le nombre de jours disponibles pour le travail du sol pourrait diminuer en hiver du fait d'une augmentation des précipitations et d'une réduction du nombre de jours avec le sol gelé ou enneigé (Cooper *et al.*, 1997). En revanche, en septembre et en avril, dans les sites les plus secs, l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration pourraient l'emporter sur le regain de précipitations offrant ainsi un surcroît de jours disponibles. De même, Kolberg *et al.* (2019) montrent que les jours disponibles au printemps pourraient augmenter dans le sud-est de la Norvège avec des effets neutres ou négatifs dans la zone centrale du pays en raison d'une plus forte humidité attendue au printemps. En Grande-Bretagne, Wu *et al.* (2022) montrent que la probabilité de réussir un semis de blé en conversion d'une prairie en sol argileux passerait de 38 % actuellement à 76 % dans le futur (RCP8.5). Tomasek *et al.* (2017) dans l'Illinois (Midwest, États-Unis) projettent une augmentation des jours disponibles au début du printemps permettant des semis plus précoces du fait également de la fin plus précoce des épisodes de gel. De plus, ces auteurs s'attendent à une dégradation du nombre de jours disponibles pour le printemps tardif en raison d'un supplément de précipitations, le tout assorti d'une forte variabilité.

Effets sur les besoins en irrigation

Les besoins en irrigation des cultures pourraient augmenter avec la raréfaction des ressources édaphiques (sécheresses plus fréquentes et plus durables), avec la baisse marquée des précipitations printanières et estivales, avec l'augmentation de la demande évapotranspirative et l'allongement des cycles de culture en réponse à l'introduction de variétés de cultures de printemps (maïs, soja) plus tardives et donc plus exigeantes en eau. Paradoxalement, l'augmentation de la teneur en CO₂, qui réduit la transpiration par unité de surface de feuille, permet une mise en place plus rapide et plus durable de l'indice de surface foliaire des cultures, ce qui devrait aboutir le plus souvent à des consommations d'eau supérieures ou égales à la situation actuelle (Manderscheid *et al.*, 2014).

C'est ce que révèlent en général les études par simulation au niveau européen. Les besoins nets en irrigation devraient augmenter fortement pour l'ensemble des cultures dans le sud de l'Europe (Trnka *et al.*, 2011), Zhao *et al.* (2015) indiquant un accroissement pouvant atteindre 182 mm, mais également dans le nord de l'Europe. Des travaux menés en Allemagne (Kreins *et al.*, 2015) ou en Suède (Grusson *et al.*, 2021) projettent de telles évolutions (+ 40 mm en zone irriguée en Allemagne) aussi bien pour les cultures d'hiver que d'été, en relation avec des printemps parfois plus secs et des besoins pour l'irrigation débutant plus tôt. Zhao *et al.* (2015) projettent cependant une diminution du besoin net en irrigation pour les cultures d'hiver dans le nord de l'Europe (jusqu'à 81 mm) du fait d'une pluviométrie plus importante en hiver et au printemps.

Un enjeu emblématique est celui de la culture du maïs, la plus irriguée tant en volume qu'en surface, notamment dans la moitié sud de l'Europe. En situation de sol moyennement profond et avec une irrigation limitée à 80 % de l'évapotranspiration maximale, les simulations avec le modèle Stics font apparaître une nette augmentation de l'irrigation pour le futur proche (sans modification de la date de semis) : + 24 mm à + 131 mm selon les hypothèses et les sites, soit un à quatre tours d'eau supplémentaires (Brisson et Levrault, 2010). D'autres simulations avec le modèle Aquacrop projettent de très fortes augmentations des volumes d'irrigation pour le maïs en Bosnie (~ 50 % à l'horizon 2050; ~ 100 % à l'horizon 2080, pour un volume actuel de 100 mm) (Stricevic *et al.*, 2018) et en Serbie (151 mm et 183 mm pour le maïs pour respectivement les futurs proche et lointain *vs* 52 mm actuellement; 179 mm et 227 mm pour le soja *vs* 120 mm) (Tovjanin *et al.*, 2019).

Cependant, en l'absence de toute adaptation, la réduction de la durée de cycle, l'anticipation des phases sensibles et les impacts sur la surface foliaire de stress précoce pourraient réduire le besoin en eau potentiel des cultures. C'est ce qu'observent Saadi *et al.* (2014) en région méditerranéenne. En raison d'une anticipation de la croissance et d'une réduction de la durée du cycle, l'évapotranspiration est ainsi réduite pour le blé avec pour conséquence une baisse du besoin net en irrigation de 11 %.

► Conséquences pour la production et pour la gestion des prairies

Composées de plantes herbacées pérennes, capables de repousser rapidement après la récolte ou après le prélèvement par les animaux, les prairies sont une composante essentielle de la durabilité et de l'autonomie des élevages, que ce soit en moyenne et haute montagne ou en plaine. En 2020, elles couvraient en France 12,7 millions d'hectares environ, dont 9,6 millions sous forme de prairies permanentes non retournées depuis au moins cinq ans (Agreste, 2022). Elles constituent donc un peu moins de la moitié de la surface agricole utile du territoire national et, même si l'on en trouve dans toutes les régions, leur répartition est très inégale, dominante dans l'ouest (Bretagne et Normandie) et dans les massifs montagneux (Massif central, Alpes, Jura et Pyrénées), alors que leur surface s'est réduite dans les plaines du nord, du centre, du centre ouest, et de l'est du pays.

Beaucoup moins retournées que les terres de grande culture et souvent entourées de haies, les prairies fournissent en plus de leur fonction de production de fourrage, des services de maintien de la biodiversité des territoires, de stockage du carbone et, associées

à l'élevage, de régulation locale des cycles biogéochimiques (N, P, etc.) et donc de qualité des eaux de surface ou souterraines (Martin *et al.*, 2020). En revanche, la demande en eau constante liée à la pérennité du couvert végétal au cours des saisons doit être prise en compte dans le bilan hydrologique régional et dans l'alimentation des aquifères. Enfin, la présence de légumineuses dans les prairies assure une fixation symbiotique d'azote qui évite le recours aux engrains azotés, principale contribution de la production aux émissions de GES du fait de l'énergie fossile utilisée pour leur synthèse. Les légumineuses valorisent mieux ainsi l'élévation de la teneur en CO₂ que les graminées (Soussana et Lüscher, 2007) puisqu'elle assure l'énergie supplémentaire pour l'augmentation de fixation symbiotique correspondante. Toutefois, la forte sensibilité de la fixation de l'azote au déficit hydrique est à prendre en compte (Durand *et al.*, 1987; Lemaire *et al.*, 1989). De plus, la lenteur de l'établissement et de la repousse postrécolte des légumineuses les expose de façon grave à la compétition avec les adventices. C'est donc en mélange avec des graminées que ces légumineuses se présentent le plus souvent.

D'ici 2050 et au-delà, leur fonction de ressource fourragère pour l'élevage ne devrait pas être fortement remise en question sur la majorité du territoire national. En revanche, les pratiques d'exploitation (dates de mise à l'herbe et de fauche, moindre recours aux fertilisants azotés) et les choix d'espèces (légumineuses, graminées) et de variétés pour des mélanges prairiaux semés devront très probablement être adaptés, en fonction des régions, pour faire face aux hausses de température et à la dégradation du bilan hydrique (Litrico *et al.*, 2016).

L'impact attendu du changement climatique sur la productivité vient de la grande sensibilité des processus morphogénétiques de croissance des feuilles aux variables du changement climatique (température et eau).

Le déphasage entre la température et la durée du jour provoqué par le changement climatique (qui n'affecte pas le second) est susceptible de modifier la phénologie reproductive et les variations de croissance associées (Rouet *et al.*, 2021). Ainsi, la saisonnalité de la production devrait-elle être significativement affectée. En conséquence, l'impact du réchauffement climatique devrait se manifester par un avancement de la croissance et par une augmentation de sa vitesse, avec des répercussions sur les dates d'épiaison et donc des premières fauches.

Les projections climatiques permettent d'anticiper une entrée en végétation avancée d'une à deux semaines d'ici la fin du siècle selon les variétés et les zones géographiques. En hiver et au début du printemps, une accélération de la croissance des tiges, liée à la hausse de température et à l'augmentation de la concentration en CO₂, accroîtra fortement la production potentielle de fourrage (figure 6.8). Cela devrait être particulièrement marqué dans les zones les plus fraîches, comme en montagne. Cette avance de la végétation sera plus ou moins valorisable selon la nature des sols, plus humides dans les massifs granitiques et en altitude que dans les zones argilocalcaires de plaine. Par ailleurs, les plantes qui auraient démarré trop rapidement leur croissance s'exposeraient davantage au gel, toujours possible (Poirier *et al.*, 2012).

Plus tard dans l'année, la dégradation du bilan hydrique estival pourrait pénaliser de manière plus ou moins forte, selon son intensité, la croissance estivale. L'élévation de la teneur en CO₂ atmosphérique, qui réduit la transpiration du couvert végétal, pourrait toutefois retarder l'occurrence de la sécheresse. Selon les scénarios les plus probables,

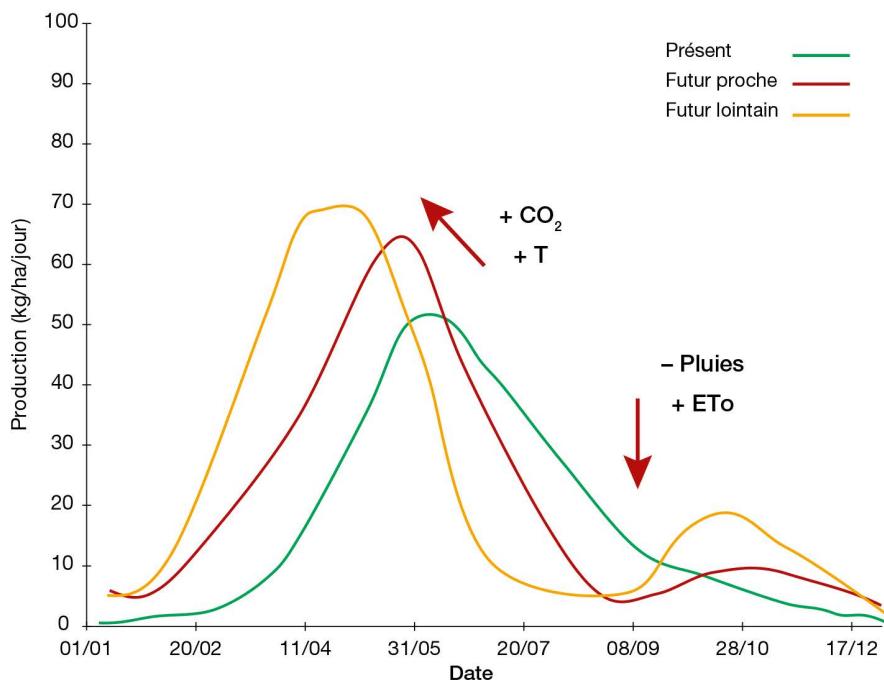


Figure 6.8. Évolution annuelle de la production journalière (en kg/ha/jour) au cours de l'année. Source : d'après Durand *et al.* (2010).

Exemple de la fétuque élevée à Lusignan, sur sol superficiel, faible fertilisation azotée, scénario A1B simulé avec Stics sur les données météo simulées par le CNRM.

Décile 2 : P-ETo mai-sept. 2020-29, Aladin RCP4.5

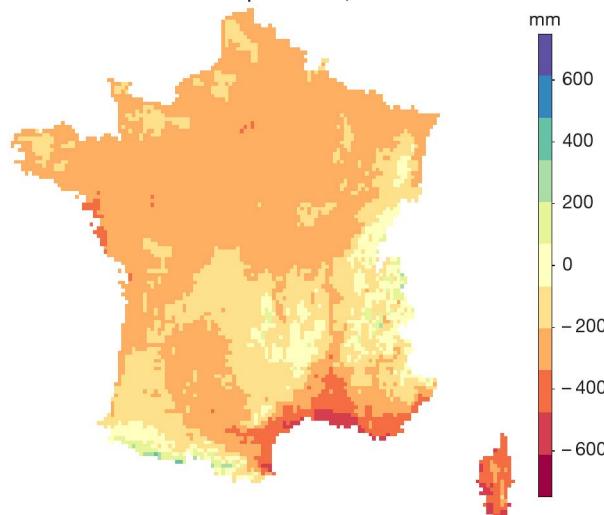


Figure 6.9. Déficit hydrique estival (précipitations – évapotranspiration de référence de mai à septembre) une année sur cinq. Source : d'après Durand (2020).

Les variétés méditerranéennes sont adaptées aux déficits inférieurs à -450 mm environ.

la dégradation du bilan hydrique estival (mai-septembre), déjà observée depuis quarante ans du fait de l'augmentation de l'ETP en réponse à la hausse des températures, continuerait dans un futur proche (2050) et pourrait pénaliser davantage la croissance (figure 6.9). Enfin, la production des prairies se caractérise toujours par de fortes variations interannuelles, tandis que les besoins du troupeau varient beaucoup moins d'une année à l'autre. Malgré cela et du fait de tensions de plus en plus fortes sur l'eau, l'irrigation qui pourrait grandement stabiliser la production annuelle et interannuelle est aujourd'hui réservée à des productions végétales de haute valeur ajoutée. Seuls 4 % environ de la surface en prairie sont irrigués (Agreste, 2022). Pour autant, là où l'eau est disponible, l'irrigation de surfaces de légumineuses, comme la luzerne par exemple, à des moments bien choisis du cycle d'exploitation contribuerait à la sécurisation de l'alimentation du troupeau dans un certain nombre de cas (Durand, 2020).

La situation devrait rester contrastée entre une zone méditerranéenne et une zone tempérée. Le déficit hydrique estival (P-ETP sur la période de mai à septembre) est un bon indicateur de la limite climatique séparant le comportement des deux types de situations (Poirier *et al.*, 2012). En deçà d'un déficit hydrique estival de -450 mm environ, les variétés méditerranéennes montrent une production annuelle supérieure à celle des variétés tempérées (figure 6.9). Dans les zones méditerranéennes, la production estivale est de toute façon négligeable. Les plantes fourragères pérennes y présentent des caractères adaptatifs qui assurent une certaine dormance durant tout l'été. De plus et comme les autres variétés septentrionales, les variétés méditerranéennes tendraient à avancer leur pic de production vers le début du printemps, et entreraient en végétation active plus tôt dans l'hiver (Volaire *et al.*, 2016b; Zaka *et al.*, 2017). Dans les années 2050, des valeurs méditerranéennes de déficits pourraient apparaître en zones de plaine au nord et se généraliseraient au sud-est du pays (figure 6.9), pour devenir régulières à la fin du siècle sur une large partie des deux tiers sud du pays. En revanche, les massifs montagneux seraient relativement épargnés par les déficits trop sévères, ainsi que le Sud-Ouest sous influence océanique, qui conserverait la plus forte potentialité fourragère du pays.

Les espèces et les variétés prairiales présentent une certaine variabilité génétique face au changement climatique. Les graminées, comme le dactyle et la fétuque, sont mieux adaptées que le ray-grass anglais ou d'Italie. En culture pure ou en mélange, la luzerne (ou le trèfle violet), les lotiers ou le trèfle blanc ont perdu du terrain jusqu'au début des années 2010, mais on constate un regain d'intérêt pour rendre les élevages plus autonomes en protéines et moins dépendants de l'usage des engrains azotés. Pour la zone tempérée, la sélection génétique chez le ray-grass anglais, espèce la plus semée, a déjà permis depuis 1970 une amélioration de 30 % de la production estivale et automnale (Sampoux *et al.*, 2013), par une meilleure utilisation des pluies estivales, notamment grâce à une optimisation de la phénologie. Pour la zone méditerranéenne, la variabilité génétique existe aussi et commence tout juste à être valorisée pour des variétés adaptées à ce climat (Kallida *et al.*, 2016). En outre, la diversification génétique intra et interspécifique est une stratégie efficace pour stabiliser la production face aux aléas climatiques. Ainsi, comme le confirment certains résultats récents, l'utilisation judicieuse dans les mélanges de plusieurs variétés pour plusieurs espèces est une voie prometteuse (Litrico *et al.*, 2016; Volaire *et al.*, 2016b; Meilhac *et al.*, 2019). Cet avantage semble dû aux différences de saisonnalité de production entre les

variétés présentes sur la même parcelle. Ainsi quelle que soit la saison, aucune espèce n'a tendance à dominer le couvert au point de remettre en question l'équilibre global entre graminées et légumineuses, qui est une propriété essentielle de ces cultures pour l'alimentation du troupeau.

Par ailleurs et indépendamment de ces variations de productivité, les prairies permanentes ou temporaires survivent relativement bien aux déficits hydriques estivaux avec de très fortes capacités de résilience face aux étés secs, y compris relativement extrêmes (Durand et Bloor, 2022). Dans ces prairies, la résilience semble moins liée à la diversité des espèces qu'à la capacité de chacune d'entre elles de récupérer de longues périodes sèches (Durand et Bloor, 2022). La vitesse du changement climatique local, supérieure à celle du déplacement naturel des espèces, est susceptible de modifier localement la composition botanique des prairies naturelles et, partant, leur productivité, leur persistance et leur qualité fourragère. Là aussi, le rôle de la diversité génétique reste donc à explorer. Pour finir, dans le cas des prairies permanentes, l'évolution du sol, de sa structure, de la flore et de la faune joue non seulement un rôle de premier plan dans le stockage de carbone, mais aussi dans la réponse de la pérennité de la prairie au changement climatique.

► Conclusion

Les modifications des calendriers agricoles permises par le changement climatique (par exemple la date de semis plus précoce) nécessiteront une adaptation des productions (en particulier un ajustement variétal) et offriront de nouvelles opportunités (par exemple la double culture). L'agriculture non irriguée sera encore plus dépendante des variations climatiques en Europe avec un risque accru d'années défavorables dans beaucoup de zones de production ; la variabilité interannuelle des rendements qui en résultera représentera un défi considérable pour les producteurs et leur environnement sociotechnique, rendant nécessaire une adaptation des pratiques (voir chapitre 11). La qualité des récoltes pourrait également subir une plus forte variabilité et être dépréciée au niveau nutritionnel. Une plus forte incertitude sur les volumes des récoltes (en particulier du fait d'aléas et de situations extrêmes) risque d'engendrer des problèmes de dimensionnement du stockage, de sécurisation des marchés et des problèmes de trésorerie pour l'agriculteur. Une plus grande variabilité climatique va aussi conduire à une plus grande volatilité des cours mondiaux des denrées agricoles. Des impacts majeurs d'événements extrêmes survenant de manière simultanée dans plusieurs grandes régions de production représentent un risque réel pour la sécurité alimentaire mondiale (Kornhuber *et al.*, 2023).

► Références

- Abramoff R.Z., Ciais P., Zhu P., Hasegawa T., Wakatsuki H., Makowski D., 2023. Adaptation strategies strongly reduce the future impacts of climate change on simulated crop yields, *Earth's Future*, 11, e2022EF003190, <https://doi.org/10.1029/2022EF003190>.
- Aggarwal P., Vyas S., Thornton P., Campbell B.M., Kropff M., 2019a. Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture, *Global Food Security*, 23, 41-49, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.002>.
- Aggarwal P., Vyas S., Thornton P., Campbell B.M., 2019b. How much does climate change add to the challenge of feeding the planet this century?, *Environmental Research Letters*, 14, 14 043001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafa3e>.

- Agnolucci P, De Lipsis V, 2020. Long-run trend in agricultural yield and climatic factors in Europe, *Climatic Change*, 159, 385-405, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02622-3>.
- Agreste, 2023. Intrants agricoles. En 2022, une hausse historique du prix des intrants, *Synthèses Conjoncturelles*, 403, www.agreste.agriculture.gouv.fr.
- Agreste, 2022. Graph'Agri, 224 p., <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bc6p07pwf0z.texteImage> (consulté le 8 novembre 2024).
- Aguirrezzabal L., Martre P, Pereyra-Irujo G., Echarte M.M., Izquierdo N., 2015. Improving grain quality: ecophysiological and modeling tools to develop management and breeding strategies, in Sadras V.O., Calderini D.F. (Eds), *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*, 2^{de} édition, 423-465, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00017-0>.
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (Coords), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau, expertise scientifique collective, rapport Inra (France), 380 p.
- Andrianasolo F.N., Debaeke P., Champolivier L., Maury P., 2016. Analysis and modelling of the factors controlling seed oil content in sunflower: a review, *OCL, Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 23, D206, <https://doi.org/10.1051/ocl/2016004>.
- Asseng S., Martre P., Maiorano A., Rotter R.P., O'Leary G.J., Fitzgerald G.J. et al., 2019. Climate change impact and adaptation for wheat protein, *Global Change Biology*, 25, 155-173, <https://doi.org/10.1111/gcb.14481>.
- Attia Z., Pogoda C.S., Reinert S., Kane N.C., Hulke, B.S., 2021. Breeding for sustainable oilseed crop yield and quality in a changing climate, *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1817-1827, <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03770-w>.
- Bastos A., Gouveia C.M., Trigo R.M., Running S.W.N., 2014. Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe, *Biogeosciences*, 11, 3421-3435, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3421-2014>.
- Ben-Ari T., Boé J., Ciais P., Lecerf R., Van der Velde M., Makowski D., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France, *Nature Communications*, 9, 1627, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.
- Bento V.A., Ribeiro A.F.S., Russo A., Gouveia C.M., Cardoso R.M., Soares P.M.M., 2021. The impact of climate change in wheat and barley yields in the Iberian Peninsula, *Scientific Reports*, 11, 15484, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95014-6>.
- Bezner Kerr R., Hasegawa T., Lasco R., Bhatt I., Deryng D., Farrell A. et al., 2022. Food, fibre, and other ecosystem products, 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 713-906, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>.
- Bönecke E., Breitsameter L., Brüggemann N., Chen T.W., Feike T., Kage H. et al., 2020. Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes, *Global Change Biology*, 26, 3601-3626, <https://doi.org/10.1111/gcb.15073>.
- Boyer J.S., 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean, *Plant Physiology*, 46, 236-239, <https://doi.org/10.1104/pp.46.2.236>.
- Brás T.A., Seixas J., Carvalhais N., Jägermeyr J., 2021. Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe, *Environmental Research Letters*, 16, 65012, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>.
- Brilli L., Moriondo M., Ferrise R., Dibari C., Bindi M., 2014. Climate change and Mediterranean crops: 2003 and 2012, two possible examples of the near future, *Agrochimica*, 58, 20-33.
- Brisson N., Levraud F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impact sur les principales espèces*, Livre vert du projet Climator (2007-2010), Ademe, 338 p., ISBN 978-2-35838-278-6.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France, *Field Crops Research*, 119, 201-212, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>.

- Cammarano D., Rötter R.P., Asseng S., Ewert F., Wallach D., Martre P. *et al.*, 2016. Uncertainty of wheat water use: simulated patterns and sensitivity to temperature and CO₂, *Field Crops Research*, 198, 80-92, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.015>.
- Cammarano D., Ceccarelli S., Grando S., Romagosa I., Benbelkacem A., Akar T. *et al.*, 2019. The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin, *European Journal of Agronomy*, 106, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.03.002>.
- Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V. *et al.*, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437, 529-533 (2005), <https://doi.org/10.1038/nature03972>.
- Cooper G., McGechan M.B., Vinten A.J.A., 1997. The influence of a changed climate on soil workability and available workdays in Scotland, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68, 253-269, <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0204>.
- Crana, 2020. Oracle Nouvelle-Aquitaine. État des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Nouvelle-Aquitaine, Chambre régionale d'agriculture Nouvelle-Aquitaine, 197 p.
- Crao, 2023. Oracle Occitanie. État des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Occitanie, Chambre régionale d'agriculture Occitanie, 214 p
- DaMatta, F.M., Grandis A., Arenque B.C., Buckeridge M.S., 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality, *Food Research International*, 43, 1814-1823, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.11.001>.
- Debaeke P., Bertrand M., 2008. Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France, *Cahiers Agricultures*, 17, 437-443, <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0230>.
- Debaeke P., Casadebaig P., Flénet F., Langlade N., 2017. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe, *OCL, Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 24(1), D102, <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>.
- Donatelli M., Duveiller G., Fumagalli D., Srivastava A., Zucchini A., Angileri V. *et al.*, 2012. Assessing agriculture vulnerabilities for the design of effective measures for adaptation to climate change, rapport final du projet Avermac, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 176 p., <https://doi.org/10.2788/16181>.
- Donatelli M., Srivastava A.K., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D., 2015. Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe, *Environmental Research Letters*, 10, 075005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/075005>.
- Durand J.L., 2007. Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques, *Fourrages*, 190, 181-195.
- Durand J.L., 2020. Irriguer les prairies : entre un vrai potentiel agronomique et une ressource en baisse, *Fourrages*, 244, 39-46.
- Durand J.L., Bloor J.M.G., 2022. Influence of specific hazards on the sustainability and productivity of grasslands, *Fourrages*, 250, 79-88.
- Durand J.L., Sheehy J.E., Minchin F.R., 1987. Nitrogenase activity, photosynthesis and nodule water potential in soyabean plants experiencing water deprivation, *Journal of Experimental Botany*, 38, 311-321, <https://doi.org/10.1093/jxb/38.2.311>.
- Durand J.L., Bernard F., Lardy R., Graux I., 2010. Climate change and grassland: the main impacts, in Ademe (Coord.), *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Livre vert du projet Climator (2007-2010), 181-190.
- Durand J.L., Lorgeou J., Picon-Cochard C., Volaire F., 2013. Écophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique, *Fourrages*, 214, 111-118.
- Durand J.L., Delusca K., Boote K., Lizaso J., Manderscheid R., Weigel H.J. *et al.*, 2018. How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO₂ concentration levels with limited water supply on water use and yield?, *European Journal of Agronomy*, 100, 67-75, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.01.002>.

- Erbs M., Manderscheid R., Jansen G., Seddig S., Pacholski A., Weigel H., 2010. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136, 59-68, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.009>.
- Escriou H., Maupas F., Richard-Molard M. 2010. Évolution des rendements de la betterave sucrière : un effet favorable du changement climatique, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, séance du 5 mai 2010, 7 p.
- Fernando N., Panozzo J., Tausz M., Norton R., Fitzgerald G., Seneweera S., 2012. Rising atmospheric CO₂ concentration affects mineral content and protein concentration of wheat grain, *Food Chemistry*, 133, 1307-1311, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.105>.
- Forslund A., Tibi A., Schmitt B., Marajo-Petitzon E., Debaeke P., Durand J.L. *et al.*, 2023. Can healthy diets be achieved worldwide in 2050 without farmland expansion?, *Global Food Security*, 39, 100711, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100711>.
- Foster G.L., Royer D.L., Lunt D.J., 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years, *Nature Communications*, 8, 14845, <https://doi.org/10.1038/ncomms14845>.
- Franks P.J., Adams M.A., Amthor J.S., Barbour M.M., Berry J.A., Ellsworth D.S. *et al.*, 2013. Sensitivity of plants to changing atmospheric CO₂ concentration: from the geological past to the next century, *New Phytologist*, 197, 1077-1094, <https://doi.org/10.1111/nph.12104>.
- Gammans M., Mérel P., Ortiz-Bobea A., 2017. Negative impacts of climate change on cereal yields: statistical evidence from France, *Environmental Research Letters*, 12, 054007, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0c>.
- Gate P., 2007. Évolution du climat et production du blé : des contrastes régionaux marqués, *Perspectives Agricoles*, 336, 24-30.
- Gate P., Blondot A., Gouache D., Deudon O., Vignier L., 2008. Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France – Quelles solutions et quelles actions à développer ?, *OCL, Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 15, 332-336, <https://doi.org/10.1051/ocl.2008.0221>.
- Gate P., Brisson N., Gouache D., 2010. Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d'abord une origine climatique, *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 96(3), 17-23.
- Gate P., Lacroix B., Lorgeou J., Pinochet X., 2016. Dossier Agriculture et Climat. Évolution des productions : les cultures ne sont pas toutes logées à la même enseigne, *Perspectives Agricoles*, 430, 48-51.
- Gregory P.J., Marshall B.E., 2012. Attribution of climate change: a methodology to estimate the potential contribution to increases in potato yield in Scotland since 1960, *Global Change Biology*, 18, 1372-1388, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02601.x>.
- Grusson Y., Wesstrom I., Joel A., 2021. Impact of climate change on Swedish agriculture: Growing season rain deficit and irrigation need, *Agricultural Water Management*, 251, 106858, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106858>.
- Högy P., Wieser H., Köhler P., Schwadorf K., Breuer J., Franzaring J. *et al.*, 2009. Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO₂ enrichment experiment, *Plant Biology*, 11, 60-69, <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00230.x>.
- Högy P., Franzaring J., Schwadorf K., Breuer J., Schütze W., Fangmeier A., 2010. Effects of free-air CO₂ enrichment on energy traits and seed quality of oilseed rape, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139, 239-244, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.009>.
- Hristov J., Toreti A., Perez Domínguez I., Dentener F., Fellmann T., Elleby C. *et al.*, 2020. Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-10617-3, <https://doi.org/10.2760/121115>, JRC119632.
- Iizumi T., Sakurai G., Yokozawa M., 2014. Contributions of historical changes in sowing date and climate to U.S. maize yield trend: An evaluation using large-area crop modeling and data assimilation, *Journal of Agricultural Meteorology*, 70, 73-90, <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-13-00023>.
- Iizumi T., Ramankutty N., 2016. Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change, *Environmental Research Letters*, 11, 34003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003>.

- Iizumi T., Shiogama 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, 5405-5417, <https://doi.org/10.1002/joc.5818>.
- 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, 3056 p., <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Jaggard K., Qi A., Semenov M.A., 2007. The impact of climate change on sugarbeet yield in the UK: 1976-2004, *The Journal of Agricultural Science*, 145, 367-375, <https://doi.org/10.1017/S0021859607006922>.
- Kallida R., Zhouri L., Volaire F., Guérin A., Julier B., Shaimi N. et al., 2016. Combining drought survival via summer dormancy and annual biomass productivity in *Dactylis glomerata* L., *Frontiers in Plant Science*, 7, 82, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00082>.
- Kapsambelis D., 2022. Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050 : Application à la gestion économique du risque, thèse de doctorat, Agrocampus Ouest, Rennes (France), NNT : 2022NSARE061.
- Knox J., Daccache A., Hess T., Haro D., 2016. Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe, *Environmental Research Letters*, 11, 113004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113004>.
- Kolberg D., Persson T., Mangerud K., Riley H., 2019. Impact of projected climate change on workability, attainable yield, profitability and farm mechanization in Norwegian spring cereals, *Soil and Tillage Research*, 185, 122-138, <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.002>.
- Kornhuber K., Lesk C., Schleussner C.F., Jägermeyr J., Pfeiderer P., Horton R.M., 2023. Risks of synchronized low yields are underestimated in climate and crop model projections, *Nature Communications*, 14, 3528, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38906-7>.
- Kreins P., Henseler M., Anter J., Herrmann F., Wendland F., 2015. Quantification of climate change impact on regional agricultural irrigation and groundwater demand, *Water Resources Management*, 29, 3585-3600, <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1017-8>.
- Le Gouis J., Oury F.X., Charnet G., 2020. How changes in climate and agricultural practices influenced wheat production in Western Europe, *Journal of Cereal Science*, 93, 102960, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102960>.
- Lemaire G., Durand J.L., Lila M., 1989. A study of the change in forage quality of lucerne grown under irrigated and non-irrigated conditions, *Agronomie*, 9, 841-848, <https://doi.org/10.1051/agro:19890901>.
- Leung F., Sitch S., Tai A.P.K., Wiltshire A.J., Gornall J.L., Folberth G.A. et al., 2022. CO₂ fertilization of crops offsets yield losses due to future surface ozone damage and climate change, *Environmental Research Letters*, 17, 074007, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7246>.
- Litrico I., Barkaoui K., Barradas A., Barre P., Beguier V., Birouste M. et al., 2016. Utiliser les mélanges fourragers pour s'adapter au changement climatique : opportunités et défis, *Fourrages*, 225, 11-20.
- Liu K., Harrison M.T., Yan H., Liu D.L., Meinke H., Hoogenboom G. et al., 2023. Silver lining to a climate crisis in multiple prospects for alleviating crop waterlogging under future climates, *Nature Communications*, 14, 765, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36129-4>.
- Liu W., Ye T., Jägermeyr J., Müller C., Chen S., Liu X., Shi P., 2021. Future climate change significantly alters interannual wheat yield variability over half of harvested areas, *Environmental Research Letters*, 16, 094045, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1fbb>.
- Lizaso J.I., Ruiz-Ramos M., Rodríguez L., Gabaldon-Leal C., Oliveira J.A., Lorite I.J. et al., 2017. Modeling the response of maize phenology, kernel set, and yield components to heat stress and heat shock with CSM-IXIM, *Field Crops Research*, 214, 239-254, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.019>.
- Loladze I., 2002. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry?, *Trends in Ecology and Evolution*, 17, 457-461, [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02587-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02587-9).

- Ma S., Churkina G., Gessler A., Wieland R., Bellocchi G., 2016. Yield gap of winter wheat in Europe and sensitivity of potential yield to climate factors, *Climate Research*, 67, 179-190, <https://doi.org/10.3354/cr01367>.
- Manderscheid R., Erbs M., Weigel H.J., 2014. Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth, *European Journal of Agronomy*, 52, 11-21, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.12.007>.
- Marcinkowski P., Piniewski M., 2018. Effect of climate change on sowing and harvest dates of spring barley and maize in Poland, *International Agrophysics*, 32, 265-271, <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0015>.
- Martin G., Durand J.L., Duru M., Gastal F., Julier B., Litrico I. *et al.*, 2020. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 17, <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00620-9>.
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M. *et al.*, 2019. Chapter 5, 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*, Cambridge University Press, 437-550, <https://doi.org/10.1017/9781009157988.007>.
- Meilhac J., Durand J.L., Béguier V., Litrico I., 2019. Increasing the benefits of species diversity in multispecies temporary grasslands by increasing within-species diversity, *Annals of Botany*, 123, 891-900, <https://doi.org/10.1093/aob/mcy227>.
- Mereu V., Gallo A., Trabucco A., Carboni G., Spano D., 2021. Modeling high-resolution climate change impacts on wheat and maize in Italy, *Climate Risk Management*, 33, 100339, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100339>.
- Moore F., 2020. The fingerprint of anthropogenic warming on global agriculture, *EarthArXiv*, <https://doi.org/10.31223/x5q30z>.
- Moore F.C., Lobell D.B., 2015. The fingerprint of climate trends on European crop yields, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 112, 2670-2675, <https://doi.org/10.1073/pnas.1409606112>.
- Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J. *et al.*, 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition, *Nature*, 510, 139-143, <https://doi.org/10.1038/nature13179>.
- Nendel C., Reckling M., Debaeke P., Schultz M., Berg-Mohnicke M., Constantin J. *et al.*, 2023. Future area expansion outweighs increasing drought risk for soybean in Europe, *Global Change Biology*, 29, 1340-1358, <https://doi.org/10.1111/gcb.16562>.
- Oury F.X., Godin C., Mailliard A., Chassin A., Gardet O., Giraud A. *et al.*, 2012. A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France, *European Journal of Agronomy*, 40, 28-38, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.007>.
- Parent B., Leclère 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, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 115, 10642-10647, <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>.
- Piikki K., Vorne V., Ojanpera K., Pleijel H., 2007. Impact of elevated O₃ and CO₂ exposure on potato (*Solanum tuberosum* L. cv. Bintje) tuber macronutrients (N, P, K, Mg, Ca), *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118, 55-64, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.04.012>.
- Pleijel H., Uddling J., 2012. Yield *vs.* quality trade-offs for wheat in response to carbon dioxide and ozone, *Global Change Biology*, 18, 596-605, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.2489.x>.
- Poirier M., Durand J.L., Volaire F., 2012. Persistence and production of perennial grasses under water deficits and extreme temperatures: importance of intraspecific vs. interspecific variability, *Global Change Biology*, 18, 3632-3646, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02800.x>.
- Porter J.R., Xie L., Challinor A.J., Cochrane K., Howden S.M., Iqbal M.M. *et al.*, 2014. Food security and food production systems, 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 485-533.

- Ray D.K., Ramankutty N., Mueller N.D., West P.C., Foley J.A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation, *Nature communications*, 3, 1293, <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>.
- Rezaei E.E., Webber H., Asseng S., Boote K., Durand J.L., Ewert F. *et al.*, 2023. Climate change impacts on crop yields, *Nature Reviews Earth & Environment*, 4 (12), 831-846, <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0>.
- Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A.C., Müller C., Arneth A. *et al.*, 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 111, 3268-3273, <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>.
- Rouet S., Barillot R., Leclercq D., Bernicot M.H., Combes D., Escobar-Gutierrez A. *et al.*, 2021. Interactions between environment and genetic diversity in perennial grass phenology: a review of processes at plant scale and modeling, *Frontiers in Plant Science*, 12, 672156, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.672156>.
- Saadi S., Todorovic M., Tanasijevic L., Pereira L.S., Pizzigalli C., Lionello P., 2014. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield, *Agricultural Water Management*, 147, 103-115, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>.
- Sampoux J.P., Baudouin P., Bayle B., Béguier V., Bourdon P., Chosson J.F. *et al.*, 2013. Breeding perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) for turf usage: an assessment of genetic improvements in cultivars released in Europe, 1974-2004, *Grass and Forage Science*, 68, 33-48, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00896.x>.
- Saugier B., 1983. Aspects écologiques de la photosynthèse, *Bulletin de la Société Botanique de France, Actualités Botaniques*, 130, 113-128, <https://doi.org/10.1080/01811789.1983.10826594>.
- Schauberger B., Ben-Ari T., Makowski D., Kato T., Kato H., Ciais P., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century, *Scientific Reports*, 8, 16865, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>.
- Schewe J., Gosling S.N., Reyer C., Zhao F., Ciais P., Elliott J. *et al.*, 2019. State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes, *Nature Communications*, 10, 1005, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08745-6>.
- Shindell D.T., 2016. Crop yield changes induced by emissions of individual climate-altering pollutants, *Earth's Future*, 4, 373-380, <https://doi.org/10.1002/2016ef000377>.
- Soussana J.F., Lüscher A., 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review, *Grass and Forage Science*, 62, 127-134, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00577.x>.
- Spollen W.G., Sharp R.E., Saab I.N., Wu Y., 1993. Regulation of cell expansion in roots and shoots at low water potentials, in Smith J.A.C., Griffiths H. (Eds), *Water deficits. Plant responses from cell to community*, p. 37-52, Bios Scientific Publishers, Oxford, ISBN 1 872748 06 6.
- Stricevic R.J., Stojakovic N., Vujadinovic-Mandic M., Todorovic M., 2018. Impact of climate change on yield, irrigation requirements and water productivity of maize cultivated under the moderate continental climate of Bosnia and Herzegovina, *Journal of Agricultural Science*, 156, 618-627, <https://doi.org/10.1017/S0021859617000557>.
- Supit I., van Diepen C.A., de Wit A.J.W., Kabat P., Baruth B., Ludwig F., 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe, *Agricultural Systems*, 103, 683-694, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.009>.
- Taub D.R., Miller B., Allen H., 2008. Effect of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis, *Global Change Biology*, 14, 565-575, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01511.x>.
- Tibi A., Forslund A., Debaeke P., Schmitt B., Guyomard H., Marajo-Petitzon E. *et al.*, 2020. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire, rapport de synthèse de l'étude, INRAE (France), 159 p.
- Tomasek B.J., Williams II M.M., Davis A.S., 2017. Changes in field workability and drought risk from projected climate change drive spatially variable risks in Illinois cropping systems, *PLoS ONE*, 12, e0172301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172301>.

- Toreti A., Deryng D., Tubiello F. N., Müller C., Kimball B. A., Moser G. *et al.*, 2020. Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO₂ on crops, *Nature Food*, 1, 775-782, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00195-4>.
- Tovjanin M.J., Djurdjevic V., Pejic B., Novkovic N., Mutavdzic B., Markovic M. *et al.*, 2019. Modeling the impact of climate change on yield, water requirements, and water use efficiency of maize and soybean grown under moderate continental climate in the Pannonian lowland, *IDŐJÁRÁS Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 123, 469-486, <https://doi.org/10.28974/idojaras.2019.4.4>.
- Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Eitzinger J., Seguin B. *et al.*, 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change, *Global Change Biology*, 17, 2298-2318, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x>.
- Van Dingenen R., Dentener F.J., Raes F., Krol M.C., Emberson L., Cofala J., 2009 The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmospheric Environment*, 43, 604-618, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.033>.
- Van Grinsven H.J.M., ten Berge H.F.M., Dalgard T., Fraters B., Durand P., Hart A. *et al.*, 2012. Management, regulation and environmental impacts of nitrogen fertilization in northwestern Europe under the Nitrates Directive; a benchmark study, *Biogeosciences*, 9, 5143-5160, <https://doi.org/10.5194/bg-9-5143-2012>, 2012.
- Volaire F., Doria L.C., Lens F., Bristiel P., Violle C., Picon-Cochard C., 2016a. Resilience after extreme drought: the role of cavitation in herbaceous species, 5th International EcoSummit 2016-Ecological Sustainability: Engineering Change, 2016, Montpellier (France).
- Volaire F., Ahmed L.Q., Barre P., Bourgoin T., Durand J.L., Escobar-Gutiérrez A.J. *et al.*, 2016b. Quelle est la variabilité intra et interspécifique des caractères d'adaptation des espèces prairiales pérennes aux variables du changement climatique ?, *Fourrages*, 225, 1-19.
- Xiong W., Skalsky R., Porter C.H., Balkovic J., Jones J.W., Yang D., 2016. Calibration-induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on global maize yield, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 1358-1375, <https://doi.org/10.1002/2016MS000625>.
- Yan W., Hunt L.A., 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures, *Annals of Botany*, 84, 607-614, <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0955>.
- Webber H., Ewert F., Olesen J.E., Müller CC., Fronzek S., Ruane A.C. *et al.*, 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe, *Nature Communications*, 9, 4249, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>.
- Wu L., Wu L., Bingham I.J., Misselbrook T.H., 2022. Projected climate effects on soil workability and trafficability determine the feasibility of converting permanent grassland to arable land, *Agricultural Systems*, 203, 103500, <https://doi.org/10.1016/j.agrsy.2022.103500>.
- Zaka S., Ahmed L.Q., Escobar-Gutiérrez A.J., Gastal F., Julier B., Louarn G., 2017. How variable are non-linear developmental responses to temperature in two perennial forage species?, *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 433-442, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.004>.
- Zhao G., Webber H., Hoffman H., Wolf J., Siebert S., Ewert F., 2015. The implication of irrigation in climate change impact assessment: a European-wide study, *Global Change Biology*, 21, 4031-4048, <https://doi.org/10.1111/gcb.13008>.
- Zhao C., Liu B., Pia S., Wang X., Lobell D.B., Huang Y. *et al.*, 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 114, 9326-9331, <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.agrsy.2017.07.007>.
- Zwiers F.W., Zhang X., Feng Y., 2011. Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales, *Journal of Climate*, 24, 881-892, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3908.1>.

Chapitre 7

Impacts observés et projetés du changement climatique sur les filières de production : cas des cultures pérennes (vigne, arbres fruitiers)

Nathalie Ollat, Bénédicte Quilot, Cornelis Van Leeuwen, Bénédicte Wenden

Même si les productions fruitières pérennes et la vigne représentent des surfaces moindres que les cultures annuelles, leur importance économique et leur contribution à la sécurité alimentaire justifient les préoccupations engendrées par le changement climatique sur ces cultures. Le vignoble mondial s'étend sur 7,25 millions d'hectares (Mha). L'Espagne (0,96 Mha), la France (0,80 Mha) et la Chine (0,78 Mha) sont les trois premiers pays au regard de la surface exploitée. À cette échelle, 47,4 % des raisins sont utilisés pour la production de vin, 44,5 % pour le raisin de table et 8 % pour les raisins secs (OIV, 2023). Ils sont répartis en très grande majorité entre le 34° et le 51° de latitude nord, et le 36° et le 44° de latitude sud, sous une grande diversité de climats (Schultz, 2020). De très nombreux vignobles sont cependant situés dans des régions caractérisées par un climat de type méditerranéen aux étés très chauds et secs. En raison du changement climatique, la limite nord, considérée comme celle où la température moyenne pendant la période de croissance (avril à octobre) est supérieure à 12 °C, est en train de se déplacer vers le nord. On trouve maintenant des vignobles jusqu'en Norvège (59° de latitude nord), et en France, les plantations se multiplient en Bretagne, en Normandie et dans les Hauts-de-France. Pour les espèces fruitières, l'importance de la production se quantifie en tonnage. Le premier fruit produit dans le monde est la banane (110 Mt, millions de tonnes), suivi de la pomme (85 Mt) et de l'orange (74 Mt). La mandarine (33,1 Mt), le raisin de table (27,7 Mt), la pêche (24,5 Mt), la poire (23,6 Mt) et l'olive (21 Mt) sont également parmi les fruits les plus produits dans le monde (Regnard et Hutin, 2022). En France, la superficie des vergers (hors olivier) est seulement de 168 400 ha, en diminution tendancielle ; mais le pays est le quatrième producteur de fruits frais de l'Union européenne, avec 2,4 Mt de fruits produits par an, en France métropolitaine et ultramarine³⁴. Les départements producteurs sont principalement situés dans la moitié sud de la France, même si l'on peut trouver des vergers dans les Hauts-de-France. Outre ses conséquences sur le niveau de production et la composition des fruits à un endroit donné, le changement climatique modifie les équilibres entre les régions de production, ce qui a globalement des effets sur la compétitivité des filières. Ainsi, au-delà des impacts négatifs, il ne faut pas négliger les opportunités de diversification et d'apparition de nouvelles aires de culture.

34. <https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruittiere-et-maraichere-tres>

Sur le plan biologique strict, les cultures pérennes fruitières et la vigne présentent des spécificités qui influencent leurs réponses aux variables climatiques. Ces spécificités doivent être prises en compte dans les études d'impact et dans les réflexions sur l'adaptation au changement climatique. C'est pourtant assez peu le cas (Leisner, 2020; Medda *et al.*, 2022). Le caractère pérenne est la première des spécificités. Il conditionne le fait que la plante dispose de mécanismes particuliers tels que la dormance, l'acclimatation au froid, la mise en réserve qui lui permettent de survivre pendant les périodes où les conditions climatiques sont défavorables à la croissance. Ces processus sont très finement régulés par le climat. La pérennité est également conditionnée par des caractéristiques d'intégration des effets pluriannuels et cumulatifs des contraintes abiotiques, avec une possibilité de mémoire qui peut être en partie associée à des mécanismes épigénétiques (Gallusci *et al.*, 2022). De plus, ces espèces ont souvent un cycle reproducteur qui s'étale sur deux années (l'induction florale est réalisée au cours de l'été qui précède la floraison), ce qui induit une dépendance de la production aux conditions climatiques sur au moins deux années, le tout pour une récolte annuelle. Elles ont aussi des caractéristiques végétatives particulières avec, entre autres, un système racinaire (souvent un porte-greffe) qui peut explorer les couches profondes du sol, un tronc qui constitue un lieu de stockage des réserves, et une architecture globale qui conditionne l'interception du rayonnement et les propriétés hydrauliques de la plante. Finalement, ces espèces sont cultivées pour leurs fruits (une partie de la biomasse totale produite), consommés frais ou transformés, dont la composition est un facteur clé de la qualité nutritionnelle ou hédonique. Cette composition dépend largement des interactions de la plante avec l'environnement.

Ces spécificités biologiques conditionnent les caractères majeurs d'intérêt agronomique tels que la phénologie, le rendement, la qualité et la résilience face aux fortes contraintes biotiques et abiotiques, qui sont centraux dans la réponse au changement climatique et qui feront l'objet de ce chapitre. Enfin, la durée de vie de ces espèces, mais aussi la durée de la période juvénile (nombre d'années avant la première récolte des fruits) justifient une nécessité d'anticipation bien plus grande que pour les cultures annuelles. Cette nécessité motive d'autant plus les travaux de recherche sur le sujet.

► La phénologie

La phénologie est l'étude des événements périodiques, principalement saisonniers, dans le monde vivant tels que le débourrement, la floraison, la maturation, la sénescence, si l'on considère les plantes des milieux tempérés. Ces événements sont régulés par des processus endogènes à la plante, mais sont également soumis à un fort contrôle environnemental, notamment des températures, ce qui les rend particulièrement sensibles au changement climatique (Chuine *et al.*, 2010). Ainsi, les différents impacts observés et prédis du changement climatique sur la phénologie sont susceptibles d'affecter fortement la mise à fruits, la production et les calendriers de récolte, avec des conséquences importantes sur le rendement et sur la qualité des fruits. Les changements de phénologie doivent également être intégrés dans les études d'impact pour prendre en compte les risques en fonction des stades de développement de la plante.

Chez les espèces pérennes, les bourgeons qu'ils soient végétatifs et/ou reproducteurs sont soumis à des processus développementaux le plus souvent bisannuels, depuis leur initiation et organogénèse, leur induction puis leur différentiation florales, leur entrée

en dormance (dormance estivale, paradormance, endodormance, écodormance), jusqu'à leur débourrement et à la croissance des structures végétatives et reproductrices qui en sont issues. Les conditions climatiques rencontrées pendant ces deux cycles auront donc un impact sur la chronologie et sur l'intensité du développement des différents organes.

Impacts observés et attendus sur la date de débourrement

Levée de l'endodormance et manque de froid

Chez les espèces pérennes à feuilles caduques, y compris la vigne, l'entrée en endodormance des bourgeons au cours du cycle précédent leur débourrement est considérée comme une étape importante permettant la survie dans des conditions environnementales défavorables. L'augmentation des températures à l'automne peut perturber le processus d'endurcissement et augmenter la sensibilité au gel d'hiver dans les régions à hiver froid (Kovaleski *et al.*, 2023). La levée de l'endodormance conditionne quant à elle l'intensité et l'homogénéité du débourrement. Si l'état d'hydratation des bourgeons semble jouer un rôle, c'est l'effet prolongé à des températures basses qui détermine principalement la date de levée de dormance (Legave *et al.*, 2022). Les températures critiques sont variables d'une espèce à une autre, et les besoins en froid sont également très variables entre espèces et même entre variétés au sein d'une même espèce (Erez, 2000; Londo *et al.*, 2014). La vigne a globalement des besoins en froid moindres que les autres espèces fruitières. Avec l'augmentation des températures associée au changement climatique, un retard de la date de levée de dormance a déjà été observé pour le pommier dans plusieurs régions françaises avec un effet sur la date de floraison. Un travail de modélisation conduit sur le cerisier (variété burlat) révèle que les régions méridionales, méditerranéennes et atlantiques de l'Europe pourraient être particulièrement exposées à un risque d'insuffisance de la satisfaction des besoins en froid d'ici la fin du XXI^e siècle (Wenden *et al.*, 2022) (figure 7.1). Les conséquences

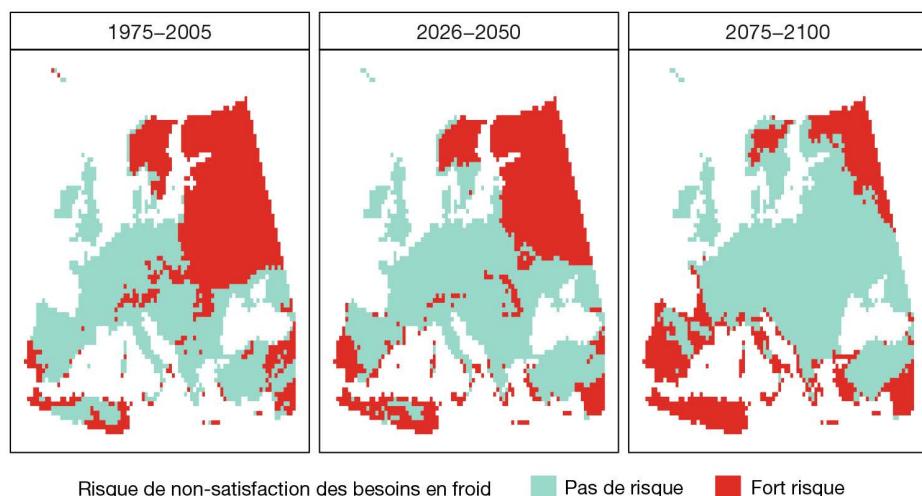


Figure 7.1. Exemple de zonation à l'échelle européenne de la satisfaction des besoins en froid estimés en portions de froid (modèle Dynamic) pour la variété de cerisier burlat et pour trois horizons temporels : actuel, futur proche, futur lointain, selon les prédictions du scénario climatique RCP8.5 (pessimiste). Source : figure reproduite avec l'autorisation de Wenden *et al.* (2022).

du manque de froid hivernal sont, outre un retard de débourrement, un débourrement erratique, une mauvaise qualité de floraison, l'apparition de nécroses des organes floraux et d'anomalies florales, l'allongement de la période de floraison et la désynchronisation des cycles saisonniers de l'arbre et des polliniseurs (arbres-arbres et arbres-insectes) (Wenden *et al.*, 2022).

Augmentation des températures et débourrement

Lorsque l'endodormance est levée, le débourrement est activé par la température. Depuis la fin des années 1980, on constate un débourrement et une floraison (pour les espèces où les fleurs apparaissent en premier) plus précoces pour de nombreuses espèces fruitières ligneuses, dont la vigne (tableau 7.1). L'avancée du débourrement a pu dépasser trois jours par décennie pour la vigne, et celle de la floraison du cerisier atteindre treize jours depuis 1989 en Nouvelle-Aquitaine (Legave *et al.*, 2022). Cette avancée pourrait se poursuivre au cours du xxie siècle, à condition que les besoins en froid hivernal soient satisfaits, ce qui ne sera pas forcément le cas dans certaines régions méridionales et pour certaines espèces comme l'abricotier (Wenden *et al.*, 2022) (figure 7.2). Le risque majeur d'un développement végétatif et reproductive toujours plus précoce est le gel de printemps. En effet, même si la température moyenne augmente, la date de dernier jour de gel ($T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$) n'avance pas forcément à la même vitesse que le développement des végétaux, ces derniers étant particulièrement sensibles aux faibles températures à ce stade. Les conséquences sur la production de fruits peuvent être dramatiques, notamment si les organes reproducteurs sont détruits. La modélisation des risques de gel dans le cadre du changement climatique donne des résultats contradictoires, notamment en fonction des modèles de débourrement utilisés dont la précision reste de quelques jours (Sgubin *et al.*, 2018; Bois *et al.*, 2023) (figure 7.3).

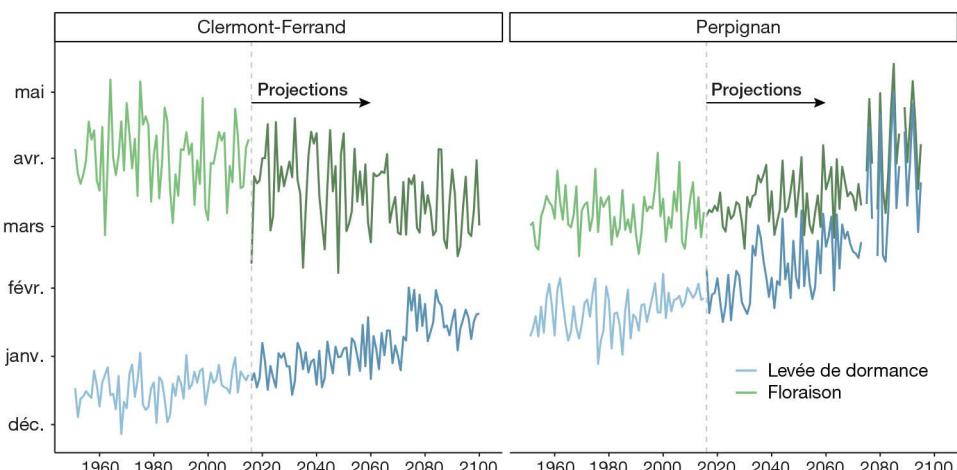


Figure 7.2. Simulation des dates de levée d'endodormance et de pleine floraison (BBCH65) de l'abricotier rouge du Roussillon sous un climat continental (Clermont-Ferrand) et sous un climat méditerranéen (Perpignan) de 1950 à 2100 selon un modèle séquentiel à deux phases et sur la base du scénario climatique RCP8.5. Source : figure reproduite avec l'autorisation de Wenden *et al.* (2022).

Tableau 7.1. Moyennes de l'avancée des principaux stades de développement de la vigne en nombre de jours par décennie depuis 1989.

Nombre de jours par décennie	Colmar	Bordeaux	Avignon
Débourrement	-3,0	-0,6	-3,5
Floraison	-5,6	-2,4	-4,2
Véraison	-6,1	-3,0	-4,5

Données observées et simulées avec les modèles Brin et Wang (chardonnay pour Colmar, cabernet sauvignon pour Bordeaux et syrah pour Avignon). Source : d'après Ollat et Touzard (2020).

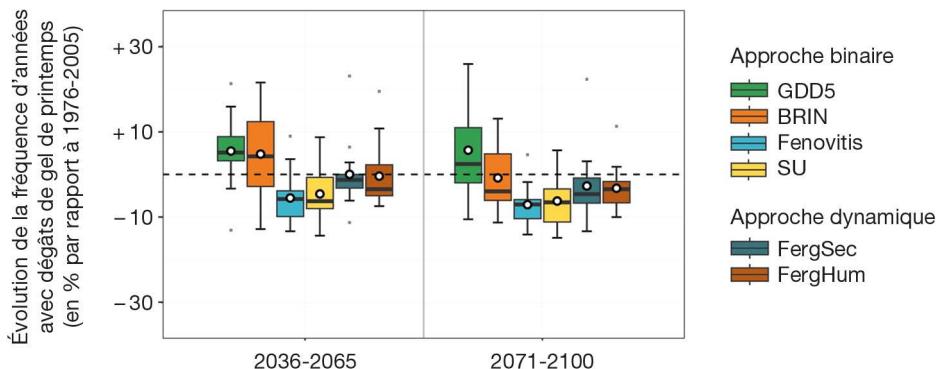


Figure 7.3. Distribution de l'écart (différence à la période 1976-2005) de la fréquence d'années avec dégâts de gels pour la région de Chablis (Bourgogne, France) en 2050 et 2100. Source : d'après Bois *et al.* (2023).

Les box-plots présentent la distribution des écarts calculés pour quatorze modèles de climat. Le point blanc au centre de chaque boîte indique la moyenne de la différence de fréquence d'années gélives par les différents modèles de climat (scénario RCP8.5/CMIP5) et la barre noire horizontale, la médiane. Chaque boîte correspond à un des six modèles de sensibilité au gel de printemps comparés.

Impacts observés et attendus sur le développement ultérieur et notamment sur les dates de maturation et de récolte

La augmentation de la température moyenne conduit à une avancée de tous les stades phénologiques et de la vitesse de développement, entraînant également un raccourcissement de la durée entre deux stades, ces différents processus étant très fortement corrélés aux sommes thermiques. De tels phénomènes ont déjà été enregistrés pour la plupart des espèces fruitières et pour la vigne depuis la fin des années 1980 (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017; Legave *et al.*, 2022; Berthoumieu *et al.*, 2022). Ces tendances devraient se poursuivre, avec par exemple une avancée de la date de véraison (début de maturation des raisins) de plus d'un mois, prédictive en Champagne pour la fin du XXI^e siècle par rapport à la période de référence (1975-2005) (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017; Zito *et al.*, 2023). La maturation des fruits a lieu également de manière plus précoce, avec pour les fruits qui mûrissent normalement en fin d'été, un décalage vers des périodes plus estivales et donc plus chaudes (Duchêne *et al.*, 2010 et 2017). Ainsi, une augmentation de la température moyenne pendant la phase de maturation des raisins a déjà pu être mise en évidence au cours des trente

dernières années avec + 2,4 °C à Avignon, + 1,5 °C à Bordeaux et + 3 °C à Colmar, et cette augmentation devrait se poursuivre (Ollat et Touzard, 2020). Outre les effets sur la composition des fruits qui seront traités ultérieurement, ces avancées de la maturation, variables d'une région à l'autre et d'une espèce ou d'une variété à l'autre, frappent l'étalement dans le temps des calendriers de récolte qui sont un élément déterminant de la durabilité économique de la filière fruitière. Les écarts de précocité en nombre de jours entre variétés précoces et tardives pourraient également se réduire, limitant ainsi l'intérêt du levier variétal pour retarder la maturation. Il faut également mentionner l'effet de températures extrêmes rencontrées lors des vagues de chaleur pendant les phases précoces de développement des fruits qui ont quant à elles un effet retardant sur la date de véraison des raisins (Lecourieux *et al.*, 2017; Ollat *et al.*, 2020).

► Les rendements

Liens entre le climat et les composantes du rendement

Si les liens entre le changement climatique et la phénologie sont bien établis, l'évaluation de l'impact observé et attendu sur les rendements et ses composantes reste soumise à de très fortes incertitudes. Outre les aléas majeurs comme le gel de printemps ou la grêle qui affectent la régularité de production, les relations entre le climat et le rendement sont complexes, car elles impliquent de nombreux processus qui se déroulent pendant au moins deux années consécutives. Chez les espèces fruitières, il a été rapporté que l'augmentation des températures peut retarder et réduire l'initiation florale (Legave *et al.*, 2022). La contrainte hydrique au cours de l'année précédente peut également affecter l'initiation florale dans les bourgeons qui se développeront l'année suivante chez la vigne (Guilpart *et al.*, 2014) et les autres espèces fruitières (Regnard et Coupel-Ledru, 2022). La différenciation des structures florales (primordia inflorescentiels ou floraux) au cours de l'année N-1 est très dépendante de la température. Des températures froides (< 20 °C) ou très chaudes (> 30 °C) peuvent réduire le nombre d'inflorescences initiées chez la vigne ou provoquer la formation de pistils doubles chez les rosacées fruitières (Keller, 2010; Legave *et al.*, 2022). Des températures automnales et hivernales trop élevées sont susceptibles d'engendrer des avortements d'organes floraux dans les bourgeons de ces espèces fruitières, mais pas chez la vigne, où les boutons floraux ne se différencient qu'au moment du débourrement de l'année N. Des températures élevées à ce stade favorisent l'allongement des inflorescences sans affecter le nombre de fleurs. Les conditions climatiques au moment de la floraison sont capitales pour le bon déroulement de cette dernière, en lien avec la réceptivité des stigmates et la germination du pollen, et la nouaison des jeunes fruits. La croissance des fruits paraît ensuite très dépendante de l'état hydrique de la plante (Gautier *et al.*, 2022), surtout au début de leur développement (Ollat *et al.*, 2002; Pellegrino *et al.*, 2014; Regnard et Coupel-Ledru, 2022). Des travaux récents de modélisation montrent un lien entre un indice de sécheresse de la culture sur la période floraison-véraison et les pertes de rendement potentielles dans différents vignobles européens au cours des trente dernières années (Yang *et al.*, 2022). Un déficit hydrique hivernal peut également affecter les différentes composantes du rendement, comme cela a été rapporté pour un vignoble en situation irriguée (Mendez-Costabe *et al.*, 2014). Bécart *et al.* (2022), toujours sur la vigne, rapportent une corrélation statistique positive entre le poids des baies et le nombre de jours

humides (humidité relative supérieure à 60 %) pendant la période véraison-récolte à partir de données recueillies sur un seul cépage en vallée du Rhône pendant cinquante ans. Cette étude montre aussi une corrélation négative entre le poids des baies et la température moyenne pendant la période entre la floraison et la fin de la première phase de croissance (figure 7.4).

À l'échelle de la plante entière, il faut également tenir compte globalement de l'effet des températures sur les équilibres entre le développement végétatif et reproductif dont dépend la disponibilité en substrats carbonés pour la croissance des fruits. Ainsi, chez la vigne, une température supérieure à 30 °C favorise le développement végétatif aux dépens du développement reproducteur (Greer *et al.*, 2017; Luchaire *et al.*, 2017). À 40 °C, c'est l'ensemble du développement (végétatif et reproducteur) qui est affecté, car la photosynthèse est réduite (Greer *et al.*, 2017; Venios *et al.*, 2020). Par ailleurs, une élévation de température conduit à une augmentation des coûts respiratoires qui limite les effets bénéfiques sur l'assimilation du carbone jusqu'à l'optimum thermique (Torregrosa *et al.*, 2017). Enfin, le raccourcissement du cycle en raison de l'augmentation des températures réduit la durée de grossissement des fruits, ce qui peut affecter le rendement si celui-ci n'est pas compensé par une augmentation de l'assimilation carbonée (Costes *et al.*, 2016). Enfin, même si les travaux sont peu nombreux sur l'impact de l'augmentation en CO₂ sur la productivité des cultures pérennes, une étude menée depuis 2014 dans un vignoble cultivé à une concentration en CO₂ de plus de 20 % dans un système Face (Free Atmospheric CO₂ Enrichment) en Allemagne révèle une augmentation de rendement systématique d'environ 10 % depuis 2017 (Wohlfart *et al.*, 2018; Kahn *et al.*, 2022).

Les températures extrêmes (> 40 °C) rencontrées pendant des vagues de chaleur, mais également des excès de rayonnement lumineux (UVB), peuvent provoquer des décolorations, voire des brûlures sur les fruits, qualifiées de « coups de soleil » ou échaudages. Cela peut conduire à des pertes de rendement non négligeables, quelles que soient les espèces fruitières considérées, y compris la vigne (jusqu'à 70 % dans des vergers de pommiers en Australie en 2009) (Webb *et al.*, 2009; Legave *et al.*, 2022). Même s'ils sont partiellement touchés, cela diminue le nombre de fruits réellement commercialisables, avec un fort impact économique (Dalhaus *et al.*, 2020). Par ailleurs, des déséquilibres des apports en eau (trop ou pas assez) peuvent provoquer un éclatement des fruits et l'apparition de microcraquelures, portes d'entrée des micro-organismes pathogènes comme la moniliose chez le pêcher (Gibert *et al.*, 2009). Les fruits éclatés ou malades ne sont alors plus vendables (Gautier *et al.*, 2022). De nombreux autres paramètres climatiques (humidité de l'air, vent) interagissent pour limiter ou pour aggraver l'effet des facteurs principaux. Enfin, il a été observé que des combinaisons de stress thermiques et hydriques peuvent également induire un développement anticipé des bourgeons l'année de leur formation.

Simulation des rendements sous l'effet du changement climatique

Étant donné la complexité des processus décrits ci-dessus, il est difficile de prédire quels pourront être les effets du changement climatique sur le rendement des productions fruitières pérennes et des vignobles. Dans ce contexte, la modélisation apparaît comme l'approche la plus pertinente pour se projeter dans le futur et pour évaluer les conséquences des modifications du climat (Moriondo *et al.*, 2015).

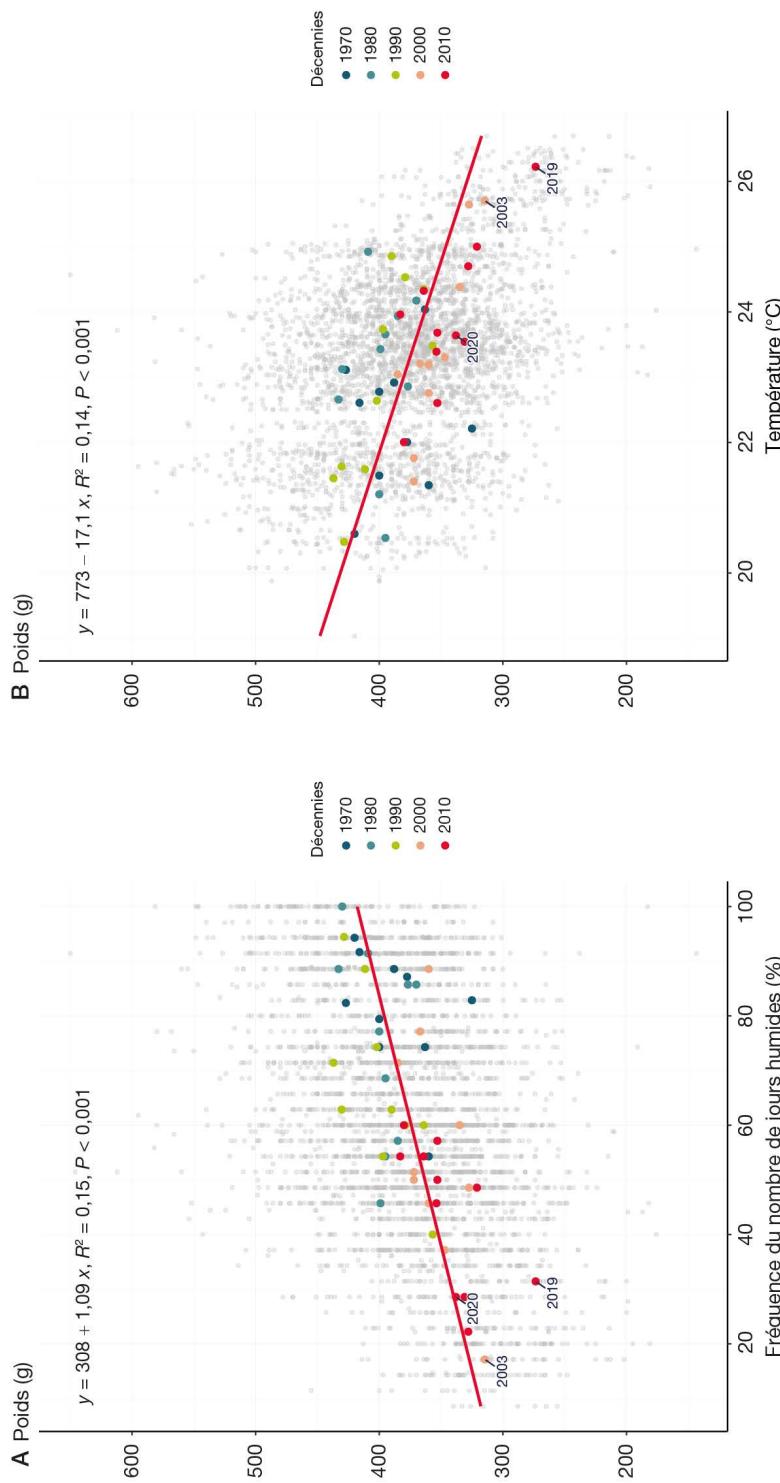


Figure 7.4. Évolution du poids de 200 baies du cépage grenache depuis 1970 en fonction de la fréquence du nombre de jours humides (humidité relative HR > 60%) entre la véraison et la récolte (à gauche), et de la température moyenne entre la nouaison et la fin de phase de latence (à droite). Source : d'après Bécart *et al.* (2022).

Plusieurs types de modèles existent et peuvent apporter des informations complémentaires (voir chapitre 4). Certains sont basés sur des relations statistiques, d'autres sur la description des processus biophysiques et de leurs interactions avec les paramètres du climat. Les modèles basés sur des processus (*process-based models*) fonctionnent à l'échelle de la plante ou de la culture. Pour simuler les rendements, les modèles dits «de culture» tels que Stics semblent les plus adéquats. Leur mobilisation dans des études d'impact du changement climatique a débuté dans les années 2000 sur la vigne (Bindi *et al.*, 2000; García de Cortázar-Atauri, 2006; Webb, 2006; Pieri et Lebon, 2010). Stics adapté à la vigne a été mobilisé depuis dans de nombreuses études d'impact. Pour cette espèce, il existe également des modèles statistiques de rendement tels que Gray (Naulleau *et al.*, 2022). Une simulation de l'impact des rendements basée sur une approche statistique a récemment été publiée pour les vignobles australiens (Puga *et al.*, 2023). Sur les espèces fruitières, il n'existe pas de modèle intégré à l'échelle de la culture (Gautier *et al.*, 2022). Une étude publiée pour la Californie (Lobell *et al.*, 2006) mobilise une approche statistique. Pour ces espèces, il existe cependant des modèles intégrés à l'échelle de l'arbre tels que QualiTree qui permettent de simuler la croissance et la qualité des fruits sur le pommier et le pêcher (Lescourret *et al.*, 2011), mais des études d'impact sur les rendements basés sur ce type de modèle n'ont pas été identifiées dans la littérature scientifique.

Les travaux conduits sur la vigne ont montré qu'à l'échelle d'un pays les impacts sur le rendement pouvaient être très variables avec des baisses de 15 % à 30 % dans les zones les plus chaudes et sèches, et de fortes augmentations dans les régions septentrionales ou tempérées (García de Cortázar-Atauri, 2006; Puga *et al.*, 2023). L'ordre de grandeur des baisses attendues en zone méditerranéenne (France) a été confirmé à travers l'étude conduite par Naulleau *et al.* (2022) (figure 7.5). Sur l'ensemble de l'Europe, Fraga *et al.* (2016) rapportent des augmentations quasi généralisées du rendement, sauf dans les zones les plus sèches d'Espagne, du Portugal, d'Italie et de Grèce. Les incertitudes combinées des modèles climatiques pour les précipitations et des modèles de rendement expliquent sans nul doute ces différences.

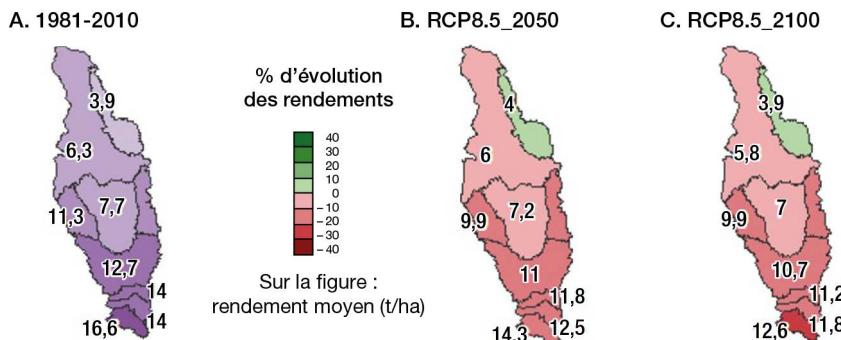


Figure 7.5. Impacts du changement climatique (RCP8.5) sur les rendements moyens selon les différents secteurs de production du bassin-versant du Rieutort (45 km², 43,5°N, 3,1°E). Source : d'après Naulleau *et al.* (2021).

Chiffres moyens sur trente ans des rendements simulés (en t/ha/an) pour chacun des huit secteurs. Les couleurs correspondent aux variations par rapport à la période 1981-2010 (A) et pour les horizons 2050 (B) et 2100 (C).

L'étude conduite par Lobell et Field (2011) rapporte des baisses de rendement simulées entre 0 % et 40 % pour la Californie au cours du xxie siècle. Ces baisses sont variables en fonction des espèces, la vigne étant la culture la moins touchée, et l'avocat, la plus affectée.

► La qualité de la récolte

Comme nous l'avons vu précédemment, le changement climatique affecte déjà et va continuer à affecter les conditions de maturation des fruits quels qu'ils soient, période pendant laquelle s'élabore la composition finale des fruits qui détermine leur qualité. En fonction des espèces considérées, différents critères de qualité sont à considérer, comme le calibre, la forme, la couleur et l'aspect visuel, la texture, la teneur en métabolites primaires qui détermine souvent la qualité gustative et technologique des fruits, la teneur en métabolites secondaires, comme les polyphénols, les vitamines, les antioxydants qui contribuent à la fois à la qualité gustative et nutritionnelle, et enfin les éléments minéraux qui contribuent principalement à la qualité nutritionnelle des fruits.

S'il existe de nombreuses séries temporelles de la composition des raisins à maturité qui permettent de retracer son évolution au cours des dernières décennies (Duchêne et Schneider, 2005; Ollat *et al.*, 2013; Ollat et Touzard, 2014; Bécart *et al.*, 2022), ces relevés semblent plus rares pour les autres espèces fruitières (Sugiura *et al.*, 2013). Les observations concernant l'impact des facteurs climatiques pris individuellement sur les composantes de la qualité peuvent être extrapolées avec précaution, car d'une part les combinaisons de plusieurs facteurs ont rarement des effets additifs (Ollat *et al.*, 2022), d'autre part certains effets peuvent être considérés comme positifs sur la qualité globale, au moins jusqu'à un certain seuil. C'est le cas, par exemple, pour les vins rouges des vignobles français en façade atlantique (Gambetta et Kurtural, 2021), mais aussi des vins blancs des zones septentrionales (Biss et Ellis, 2021). La modélisation peut là aussi s'avérer un outil précieux pour envisager les impacts du changement climatique sur la composition des fruits sur le long terme. On peut citer QualiTree (Lescourret *et al.*, 2011) et GrapevineXL (Zhu *et al.*, 2018) qui intègrent le développement et certains paramètres de la composition des fruits à l'échelle de la plante, en tenant compte de certaines variables environnementales.

La question du calibre et de la déformation de certains fruits a été traitée plus haut. La texture semble être affectée par les fortes températures, mais avec des effets variables en fonction des fruits. Une diminution de la fermeté des pommes depuis les années 1970 a été observée au Japon (Sugiura *et al.*, 2013), de manière corrélée à l'augmentation des températures. Des résultats analogues ont été rapportés pour la pêche avec une perte de fermeté précoce sous haute température, alors que la teneur en sucres n'est pas maximale (Lopez et Dejong, 2007). La chair des pommes soumises à des températures élevées apparaît moins dense et craquante (Costes *et al.*, 2016), alors que des mandarines exposées au soleil et subissant une température de 35 °C sont plus fermes que celles grossissant à l'ombre (20 °C) (Bhattacharjee *et al.*, 2022).

Impacts sur les métabolites primaires

L'augmentation de la température associée au changement climatique ainsi que celle de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère favorisent la photosynthèse et, par conséquent, l'accumulation des sucres dans les fruits. Des enregistrements, réalisés sur des raisins

depuis les années 1950 à Bordeaux, montrent un accroissement régulier de la teneur en sucres (ou en alcool potentiel) à partir de la fin des années 1980. Cette augmentation est générale dans toutes les régions viticoles et varie entre 0,5° à 1,0° d'alcool potentiel par décennie (Van Leeuwen et Darriet, 2016; Ollat et Touzard, 2020; Bécart *et al.*, 2022) (figure 7.6). L'augmentation de la teneur en sucres des pommes depuis les années 1970 a également été rapportée au Japon (Sugiura *et al.*, 2013). Une contrainte hydrique modérée peut également induire une augmentation de la concentration en sucres, par diminution de la taille des fruits, comme cela a été montré pour le raisin (Dai *et al.*, 2009), la pêche et la cerise (Medda *et al.*, 2022).

L'acidité, qui est un critère majeur de qualité gustative et technologique pour tous les fruits, est particulièrement affectée par le changement climatique. La dégradation des acides organiques est très liée à la température et cette baisse d'acidité pose déjà un réel problème. Elle a déjà été mise en évidence pour le raisin (van Leeuwen et Darriet, 2016; van Leeuwen *et al.*, 2024) (figure 7.6), la pomme (Sugiura *et al.*, 2013) et les agrumes (Sadka *et al.*, 2019; Gautier *et al.*, 2022). Chez les agrumes, le catabolisme du citrate (acide organique majeur) conduit à l'accumulation d'alcool, d'aldéhydes et d'autres métabolites secondaires qui peuvent affecter le goût et induire un dépérissement des fruits (Sadka *et al.*, 2019). Chez le raisin, l'acidité a des conséquences technologiques car, en tant que composante majeure du pH des vins, elle agit sur les équilibres gustatifs, la couleur et la capacité de conservation. La contrainte hydrique peut également contribuer à la baisse d'acidité (Medda *et al.*, 2022; van Leeuwen *et al.*, 2024).

Impacts sur les métabolites secondaires

Les conditions climatiques ont une grande influence sur le métabolisme secondaire qui est central pour la qualité des fruits. Les métabolites secondaires contribuent à la couleur, à l'arôme et à la texture des fruits. Ils ont également des propriétés anti-oxydantes et certains sont considérés comme des vitamines, mais aussi comme des molécules de défense contre les agressions biotiques. Toutes les catégories de métabolites secondaires (phénylpropanoïdes, alcaloïdes, terpénoïdes, glycosides cyanogéniques) peuvent être affectées par le changement climatique.

Les anthocyanes interviennent dans la couleur de la pellicule de nombreux fruits tels que les raisins, les pommes, les poires et certains agrumes. La contrainte hydrique favorise en général l'accumulation des anthocyanes, quels que soient les fruits considérés (Castellarin *et al.*, 2007; Medda *et al.*, 2022). À l'inverse, les hautes températures conduisent à une plus faible accumulation d'anthocyanes et les mécanismes moléculaires associés à la voie de synthèse des phénylpropanoïdes qui contrôlent cet effet sont bien identifiés (Lecourieux *et al.*, 2017). Les effets de la température sur la teneur en flavonols, flavan-3-ols et proanthocyanidines sont plus variables (Gouot *et al.*, 2019).

Les composés de type caroténoïdes sont majeurs pour la couleur de la peau de nombreux agrumes et sont source de vitamines et de composés antioxydants tels que la vitamine C. Les fortes températures, mais également la contrainte hydrique, conduisent à un retard de leur accumulation ou à une diminution de leur concentration (Gautier *et al.*, 2022; Medda *et al.*, 2022). Pour certaines productions comme la clémentine de Corse en indication géographique protégée (IGP) où la coloration est un critère de déclenchement des récoltes, les conséquences sont importantes sur la qualité finale des fruits.

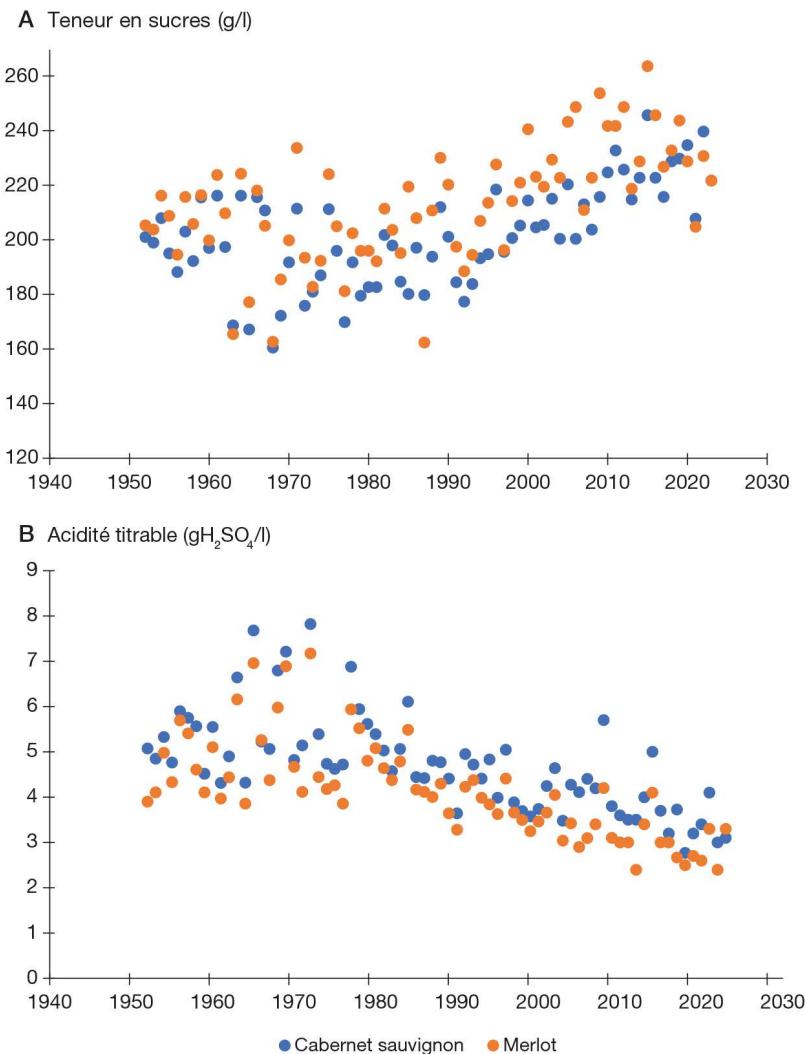


Figure 7.6. (A) Teneur moyenne en sucres (g/L); et (B) acidité titrable de raisins à maturité dans sept parcelles de vigne situées près de Bordeaux pour les cépages merlot et cabernet sauvignon depuis 1950. Source : www.bordeauxraisins.fr, www.bordeauxprof.com, UMR CEnologie, ISVV.

Les conséquences des paramètres climatiques sur les composés aromatiques des fruits ont surtout été décrites pour le raisin. Ce sont, pour une partie d'entre eux, des composés volatils présents dans le raisin tels que les méthoxypyrazines ou certains terpènes, ou existants sous forme de précurseurs non volatils et non odorants tels que les précurseurs de thiols (Thibon *et al.*, 2024). Il a été montré que l'augmentation de la température et du rayonnement a un effet négatif sur la teneur en méthoxypyrazines (arôme herbacé de certains vins rouges) et en thiols volatils (Wu *et al.*, 2019), mais un effet positif ou variable sur des composés de type C13-norisoprénoïdes ou terpéniques (Schütler *et al.*, 2015; Duchêne *et al.*, 2016). Globalement, les températures élevées favorisent les arômes de fruits cuits et un bouquet de vieillissement

complexe (Pons *et al.*, 2017; van Leeuwen *et al.*, 2022). De son côté, la contrainte hydrique modérée limite l'accumulation des méthoxypyrazines et augmente celle des terpènes et de précurseurs d'arômes, conduisant à un bouquet de vieillissement plus agréable (Le Menn *et al.*, 2019). Une contrainte hydrique plus marquée peut conduire à l'accumulation de composés moins agréables (van Leeuwen *et al.*, 2024).

La qualité : le résultat d'interactions complexes

L'exposé précédent au sujet des impacts des principales variables climatiques que sont la température et la disponibilité en eau sur les composantes de la qualité révèle bien la complexité des processus et par conséquent la difficulté à envisager les conséquences sur le long terme.

La figure 7.7 présente de manière schématisée l'effet de la température sur différents composants des raisins. Il est clair que l'augmentation de la température conduit à une modification des équilibres entre les différents composés avec des conséquences non négligeables sur la qualité finale.

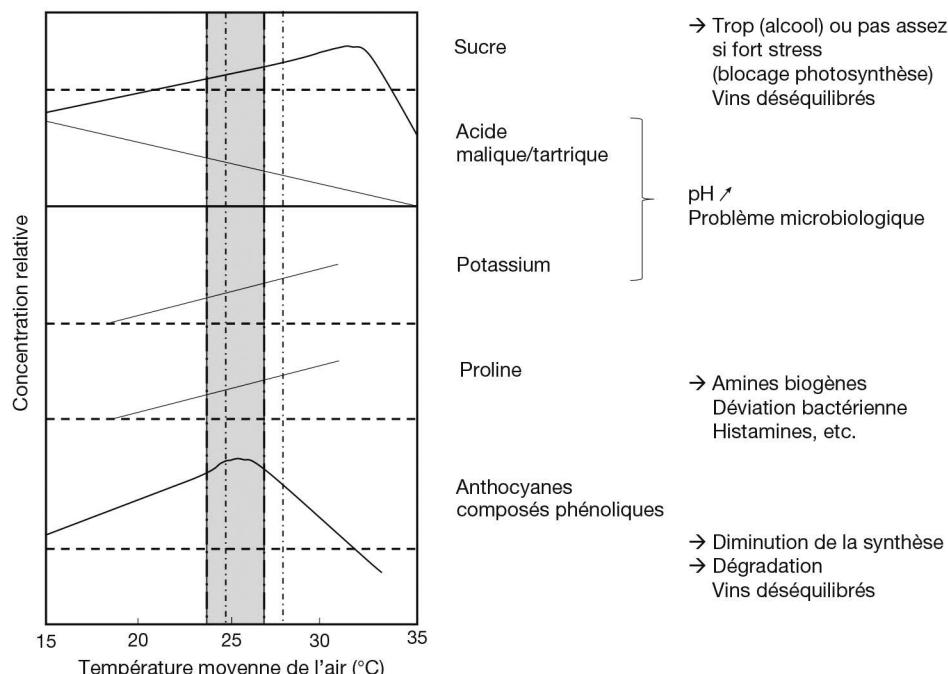


Figure 7.7. Résumé schématique des principaux effets de la température sur la concentration de quelques composés majeurs du raisin. Source : figure adaptée de Coombe (1987) par Goutouly, reproduit avec l'autorisation des auteurs.

Le décalage entre l'accumulation des sucres et celui des anthocyanes dans les raisins lorsque la température augmente a été décrit par plusieurs auteurs (Sadras *et al.*, 2012; Martinez-Lüscher *et al.*, 2016). Il affecte fortement le processus décisionnel de la date des vendanges, puisqu'il faut choisir entre des raisins moins sucrés, mais dont la maturité phénolique n'est pas complète, ou des raisins plus (trop) riches

en sucres avec une bonne maturité phénolique. Martinez-Lüscher *et al.* (2016) ont montré que le rayonnement UVB peut corriger ce décalage entre l'accumulation des sucres et des anthocyanes.

Par ailleurs, l'influence du génotype est également à prendre en compte, puisque, au sein d'une même espèce, il existe une grande diversité de composantes de la qualité et de sensibilité aux variables de l'environnement.

► La résilience face aux fortes contraintes

Outre les fonctions de production traitées ci-dessus, le changement climatique pourrait affecter la survie des espèces fruitières et de la vigne dans un lieu donné. Ces effets pourraient être associés à la fréquence et à l'intensité d'événements extrêmes ou de combinaison de ces événements, ainsi qu'à une modification des contraintes biotiques en fonction des évolutions climatiques et de l'état physiologique des arbres.

Des stress abiotiques extrêmes

Même si les espèces fruitières pérennes et la vigne paraissent relativement peu sensibles aux phénomènes d'embolie et de rupture hydraulique au niveau des rameaux avec des seuils de potentiel de tige de -2 MPa (vigne, agrumes) à -3 MPa (pommier, poirier) (Gambetta *et al.*, 2020; Regnard et Coupel-Ledru, 2022), des sécheresses extrêmes et répétées pourraient avoir des conséquences importantes sur la productivité et la survie de ces plantes pérennes. Une variabilité intercépage pour la sensibilité à l'embolie au niveau des tiges a été récemment mise en évidence chez la vigne, ce qui a conduit à une cartographie des risques à l'échelle mondiale compte tenu de l'encépagement majoritaire dans 653 zones viticoles (Lamarque *et al.*, 2023). La vigne présente cependant une forte capacité de récupération d'une année sur l'autre, même quand la contrainte hydrique a conduit à une forte défoliation et à une perte de conductivité hydraulique quasi totale (Tombesi *et al.*, 2018) (figure 7.8). Les compromis entre la croissance, la mise en réserves, la réponse à la contrainte hydrique l'année N, la récupération hydraulique et les effets pluriannuels d'une contrainte hydrique ou de contraintes hydriques répétées sont à considérer pour évaluer les risques de mortalité sur le long terme (Tomasella *et al.*, 2019; Charrier *et al.*, 2021; Regnard et Coupel-Ledru, 2022). Par exemple, Falchi *et al.* (2019) rapportent qu'un stress hydrique modéré peut limiter la croissance et augmenter la teneur en réserves carbonées dans les rameaux. Cependant, il existe peu de travaux sur les effets de contraintes hydriques sévères et prolongées, comme celles rencontrées en 2022-2023 dans certains vignobles du sud de la France. Pour les vergers, dont la plupart sont irrigués, se pose la question de la vulnérabilité accrue des arbres en cas d'arrêt accidentel ou forcé de l'irrigation par manque d'eau. Le système racinaire d'arbres irrigués est en général plus superficiel, ce qui peut conduire à une moindre capacité à tolérer une contrainte hydrique soudaine. Par ailleurs, des températures élevées en fin de cycle peuvent perturber la capacité d'acclimatation et d'endurcissement des espèces pérennes vis-à-vis du froid hivernal, et augmenter le risque de gel hivernal lorsque ces espèces sont en limite « froide » d'aire de culture. Les processus d'acclimatation étant liés à l'accumulation de métabolites clés tels que les sucres, les acides aminés et les protéines (Charrier *et al.*, 2021; Hébert-Haché *et al.*, 2023), toute contrainte abiotique ayant limité l'accumulation de réserves peut agraver la sensibilité au gel. Cependant, comme le rapportent



Figure 7.8. Souche de cépage mourvèdre sous forte contrainte hydrique, complètement défoliée (Piolenc, Vaucluse, 2008). Crédit photo : © E. Lebon (INRAE).

Charrier *et al.* (2021), une contrainte hydrique peut aussi réduire la sensibilité au gel en raison d'une teneur en eau plus réduite dans les tissus et d'une concentration en solutés plus importante, de processus physiologiques de régulation communs ou d'un effet mémoire. Un épisode de gel de printemps peut quant à lui aggraver les effets d'une contrainte hydrique postérieure en induisant une demande en carbone supplémentaire pour la repousse et en décalant le cycle végétatif vers une période où le manque d'eau peut être plus sévère. Globalement, la combinaison des contraintes abiotiques, soit simultanément soit de manière successive, a des conséquences souvent bien plus graves que les contraintes considérées de manière individuelle (références citées par Ollat *et al.*, 2022). On peut sans trop de doute affirmer que le changement climatique en générant plus de situations contraignantes et extrêmes conduit à une fragilisation des espèces pérennes et augmente les risques de mortalité.

Enfin, la combinaison des effets des températures élevées et de la sécheresse augmente également les risques d'incendie. Les rapports successifs du Giec alertent sur le fait que ce danger augmente avec chaque augmentation de température (IPCC, 2021). Situées souvent en zones sensibles, de nombreuses régions viticoles à travers le monde, en Australie, au Chili, en Californie et en France, font déjà face à ce fléau. Cependant, il apparaît que des vignobles bien entretenus peuvent servir de coupe-feu (Thach, 2018 ; Ascoli *et al.*, 2021). Lors des récents incendies qui ont touché les vignobles des Pyrénées-Orientales, les vignes en production ont été peu touchées, même si les systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte ont été détruits. En revanche, les friches viticoles et certaines parcelles mal entretenues ont joué un rôle accélérateur avec la présence de buissons et d'herbes sèches facilement inflammables. Dans les parcelles ayant subi le feu, les vignes peuvent être plus ou moins endommagées,

mais la vigne a une grande capacité de récupération. Les vignes pour lesquelles les dégâts sont les plus importants l'année N présentent une croissance, une teneur en amidon dans les bois et une fertilité des bourgeons réduites l'année N+1. La récupération se fait en un ou deux cycles, notamment dans les vignobles irrigués (Collins *et al.*, 2022).

Quelles menaces sanitaires ?

Les agents pathogènes et les ravageurs, appelés bioagresseurs par la suite, des arbres fruitiers et de la vigne dépendent fortement pour leur développement des variables climatiques telles que la température, la pluie, l'humidité relative et la durée d'humectation (Gouache *et al.*, 2010; Bois *et al.*, 2017; Ollat *et al.*, 2018; Brun *et al.*, 2022). Leur incidence dépend également du stade phénologique et de l'état physiologique de l'hôte (l'arbre). La question de l'impact du changement climatique sur leur biologie et sur leur agressivité vis-à-vis des cultures est donc centrale. Les interactions biotiques sont cependant extrêmement complexes et, dans la majorité des cas, l'incertitude est totale et la prudence doit être la règle. La littérature scientifique s'accorde à dire qu'une des conséquences principales du changement climatique et de la globalisation (changement de pratiques, transport, modification des lois sur les pesticides, etc.) sera une augmentation du niveau d'imprédictibilité des interactions, spatiales et temporelles, entre les cultures et leur environnement (Ollat *et al.*, 2018). Prévoir les impacts à moyen et long terme apparaît donc comme un exercice difficile. Une revue systématique de littérature réalisée spécifiquement pour la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2024) montre que, pour l'ensemble des interactions rapportées (un pathosystème et une variable climatique), les effets sont positifs dans 30 % des cas (induisant plus de dégâts), négatifs dans 20 % des cas ou neutres dans 50 % des cas. Par ailleurs, une enquête conduite à l'échelle mondiale pour la vigne (Bois *et al.*, 2017) révèle que l'occurrence de certains bioagresseurs peut dépendre du climat global des vignobles. Pourtant, les bioagresseurs les plus dommageables sont en général présents dans des conditions climatiques très variées, rendant difficile notre capacité à extrapoler ce que pourront être les problèmes parasitaires à l'avenir. Globalement on constate déjà une modification de l'aire de répartition de certains bioagresseurs, avec des progressions vers les latitudes les plus élevées pour certains ravageurs comme les cochenilles et des régressions pour d'autres comme certaines espèces de pucerons (Brun *et al.*, 2022). Dans d'autres cas, des espèces de bioagresseurs déjà présentes peuvent devenir plus agressives en raison du développement de nouvelles souches ou de conditions climatiques à un stade donné devenant plus favorables à leur pathogénicité.

De très nombreux insectes ravageurs sont sensibles aux effets de la température qui est la variable majeure du taux de croissance des populations. Cependant les relations ne sont pas linéaires, ce qui rend difficile toute extrapolation. Par ailleurs, il existe une grande variabilité de sensibilité à la température entre espèces de ravageurs, mais aussi au cours de leur cycle de développement. Enfin, des processus de réponses et d'acclimatation très performants et rapides permettent à certains insectes de faire varier rapidement les seuils de température critique comme c'est le cas pour la mouche du fruit méditerranéenne, ou de modifier les équilibres populationnels comme cela a été observé pour la tordeuse orientale du pêcher (Brun *et al.*, 2022). Dans le passé, un ravageur majeur de la vigne, le ver de la grappe, ou l'eudémis, accomplissait généralement

trois générations en Nouvelle-Aquitaine, la dernière étant nettement séparée des deux précédentes et située tard en septembre. Aujourd’hui, cette troisième génération succède rapidement à la deuxième et il n’est pas rare de trouver une quatrième génération en octobre ou novembre (Thiery, 2008). Un travail de simulation pour ce ravageur révèle que les risques associés au développement, au moment de la récolte, d’une quatrième génération causant d’importants dégâts pourraient augmenter dans l’hémisphère Nord. En revanche, le taux de mortalité de cette quatrième génération pourrait également s’accroître dans les zones méridionales en raison d’une augmentation de la température au-dessus du seuil létal (Castex *et al.*, 2023).

Le cycle des agents pathogènes et les dégâts provoqués sur les hôtes dépendent également du climat. Par exemple, la maturation des ascospores de *Venturia inaequalis*, l’agent fongique de la tavelure du pommier, est très liée à la température en hiver et au printemps. Les ascospores matures sont projetées par les pluies sur les organes sensibles, la contamination successive dépendant ensuite de la température et de la durée d’humectation. Dans le futur, l’augmentation des températures au printemps pourrait accroître les risques de contamination. Les dégâts du chancre bactérien de l’abricotier lié à *Pseudomonas syringae* s’observent au printemps après des hivers rigoureux. Le changement climatique avec des hivers plus doux pourrait contribuer à une diminution des symptômes (Brun *et al.*, 2022). Pareillement, il a été montré que les symptômes d’esca, maladie de la vigne associée à des champignons vasculaires, sont réduits en situation de contrainte hydrique (Bortolami *et al.*, 2021). De nombreuses espèces fruitières (y compris la vigne) sont aussi menacées par la propagation de la bactérie *Xylella fastidiosa* se développant dans les tissus vasculaires des végétaux et dont certaines souches ravagent des vergers provoquant la mort des arbres en affectant notamment le métabolisme carboné et la conductivité hydraulique (Fanton *et al.*, 2022). Un travail de modélisation a montré que de nombreux pays européens ont un climat déjà favorable au développement de deux sous-espèces de la bactérie, bien que celles-ci soient encore cantonnées aux régions méridionales. Le froid hivernal pourrait être un facteur limitant de l’extension de la bactérie, ce qui fait craindre une modification potentielle de l’aire effective de répartition en lien avec le réchauffement climatique. Des températures estivales extrêmes peuvent cependant limiter le développement des populations, ce qui rend les prédictions particulièrement difficiles (Godefroid *et al.*, 2019).

Dans le cadre des études des impacts du changement climatique, quelques exercices de modélisation de l’incidence de maladies fongiques ont été conduits. Certains se focalisent sur les conditions climatiques favorables au développement du champignon, comme la température et la durée d’humectation (Gouache *et al.*, 2010). La figure 7.9 présente les résultats de la simulation des degrés-jours humectés en France (soit le produit de la durée d’humectation par la température moyenne de la période d’humectation) avec une augmentation à prévoir d’ici la fin du xxie siècle dans certains sites, notamment au printemps. Cela signifie que les conditions d’infection seront, en tendance, un peu plus favorables, au printemps, pour les maladies à optimum thermique élevé (Gouache *et al.*, 2010).

D’autres approches plus complexes combinent des modèles de fonctionnement de l’agent pathogène à des modèles de culture pour tenir compte des interactions hôte-pathogène, comme simplement les décalages de phénologie (Gouache *et al.*, 2010;

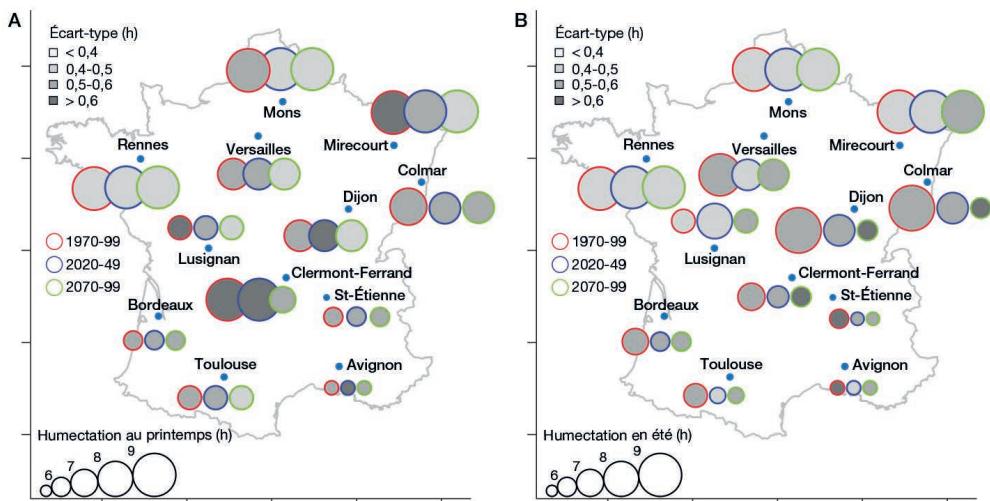


Figure 7.9. Simulation des degrés-jours humectés (soit le produit de la durée d'humectation par la température moyenne de la période humectée et divisée par 24 pour être ramenée au jour) au printemps (A) et en été (B), selon la méthode de régionalisation TT décrite dans le *Livre vert du projet Climator* pour trois périodes : en rouge, le passé récent (PR, 1971-2000); en bleu, le futur proche (FP, 2020-2050); en vert, le futur lointain (FL, 2070-2100). Source : figure reproduite avec la permission de Gouache *et al.* (2010).

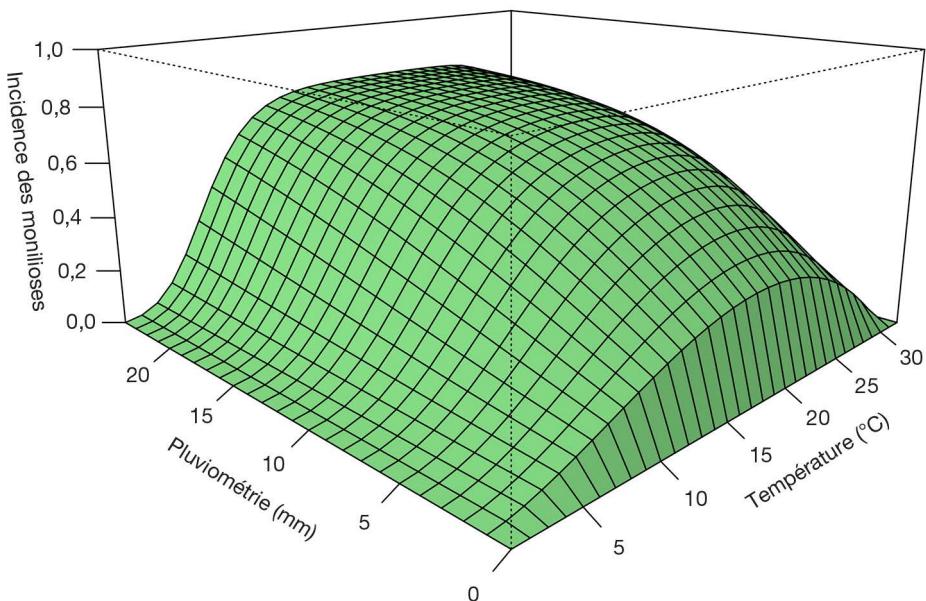


Figure 7.10. Modélisation du pourcentage de fleurs contaminées par les monilioses en fonction de la pluviométrie et de la température. Source : figure adaptée de Tresson *et al.* (2020).

Caubel *et al.*, 2014; Tresson *et al.*, 2020). Chez l'abricotier, les dégâts de moniliose sur les fleurs et les rameaux sont très fortement liés aux conditions climatiques au moment de la floraison. Le couplage d'un modèle épidémiologique avec un modèle de phénologie de l'abricotier a permis d'explorer le risque d'infection dans des scénarios climatiques futurs (Tresson *et al.*, 2020). Le changement climatique provoque une floraison plus précoce des abricotiers. Sous les effets conjugués de ce décalage de période de floraison et de conditions climatiques changeantes, des effets différents sur le développement de la maladie sont prévus selon la variété. Dans un avenir proche, les variétés à floraison intermédiaire à tardive pourraient présenter un risque plus élevé alors que dans un avenir lointain, les variétés à floraison intermédiaire pourraient présenter un risque moindre de monilia sur fleurs (figure 7.10).

Chez la vigne, le mildiou (*Plasmopara viticola*) et l'oïdium (*Erysiphe necator*) sont les maladies fongiques qui causent le plus de dégâts. À l'heure actuelle, les travaux de modélisation pour ces maladies conduisent souvent à des résultats contradictoires et à de nombreuses incertitudes, en raison notamment de la difficulté à prédire les précipitations. Pour le mildiou de la vigne, Caubel *et al.* (2014) décrivent une baisse d'incidence à Bordeaux et en Bourgogne, en raison d'une réduction de la durée et de l'occurrence d'humectation des feuilles et des températures supérieures à l'optimum d'infection. D'autres publications rapportent cependant l'inverse dans d'autres vignobles. Pour l'oïdium, les différents résultats obtenus ne permettent pas de tirer de conclusions quant à l'augmentation ou à la baisse de l'incidence de la maladie dans le futur pour la Bourgogne et la Champagne (Zito, 2021). Des simulations conduites sur l'incidence du botrytis pour le cépage merlot (figure 7.11) dans le projet Climator (Brisson et Levraud, 2010) révèlent une tendance à la baisse du risque épidémique pour tous les vignobles traditionnels.

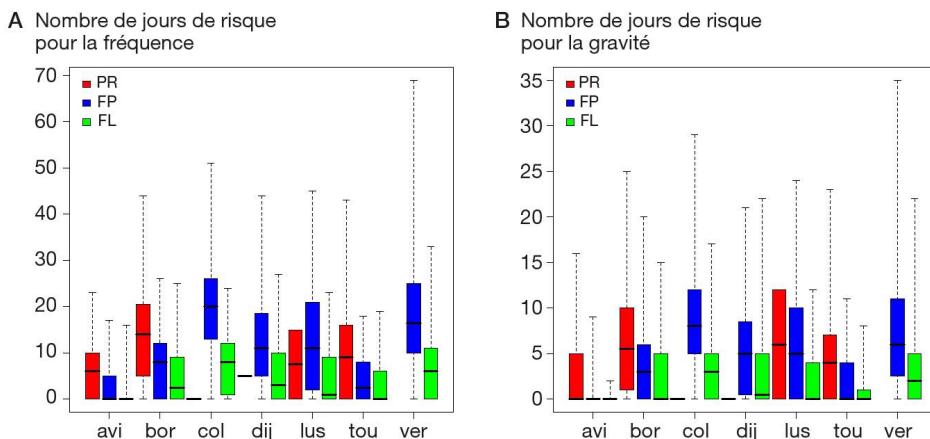


Figure 7.11. Évolution de la nuisibilité du botrytis sur des baies de raisin de merlot et de sa variabilité (extrêmes, médiane, 2^e et 8^e déciles). Source : figure reproduite avec la permission de Gouache *et al.* (2010).

La nuisibilité et la variabilité sont exprimées en nombre de jours de risque pour la fréquence (A) et la gravité (B) pour sept régions : Avignon (avi), Bordeaux (bor), Colmar (col), Dijon (dij), Lusignan (lus), Toulouse (tou) et Versailles (ver). En rouge est représenté le passé récent (PR, 1971-2000) ; en bleu, le futur proche (FP, 2020-2050) ; en vert, le futur lointain (FL, 2070-2100).

► Conclusion

Par leur importance économique et leurs spécificités biologiques, les espèces fruitières pérennes et la vigne peuvent être particulièrement menacées par le changement climatique, notamment en Europe méridionale. De nouvelles opportunités peuvent cependant se présenter dans les régions plus septentrionales. Le caractère pérenne, la durée de vie, mais aussi les caractéristiques de valorisation de ces productions (en lien avec le système des appellations, ou fortement basées sur le commerce international) en font des espèces particulières pour étudier les impacts et les processus d'adaptation (biologiques et au sens large) au changement climatique, avec une forte nécessité d'anticipation (trois à cinq ans entre la plantation et l'entrée en production, et une durée d'exploitation de dix à vingt-cinq ans, voire plus pour la vigne et pour d'autres espèces comme les agrumes). Les études d'impact et l'évaluation des risques à moyen et long terme nécessitent le développement d'approches de modélisation qui devront rendre compte du caractère pérenne, des effets pluriannuels, des processus de mise en réserve et de développement racinaire. La qualité est également un élément central de ces productions, ce qui rajoute un facteur de complexité qui doit être considéré. Les travaux pluridisciplinaires réalisés sur la vigne dans le cadre du projet Laccave (Ollat et Touzard, 2024) peuvent servir de cadre méthodologique pour aborder la grande diversité des questions qui se posent. Ces études doivent servir à mieux anticiper pour sélectionner les meilleures stratégies d'adaptation combinant des aspects techniques, géographiques, organisationnels et réglementaires (voir chapitres 11 et 13).

► Références

- Ascoli D., Moris J.V., Marchetti M., Sallustio L., 2021. Land use change towards forests and wooded land correlates with large and frequent wildfires in Italy, *Annals of Silvicultural Research*, 46, 177-188, <https://doi.org/10.12899/asr-2264>.
- Bécart V., Lacroix R., Puech C., García de Cortázar-Atauri I., 2022. Assessment of changes in Grenache grapevine maturity in a Mediterranean context over the last half-century, *OENO One*, 56, 53-72, <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.1.4727>.
- Berthoumieu J.-F., Debert P., Mathieu V., Legave J.-M., 2022. Les conséquences des changements phénologiques sur la complémentarité et la régularité de production, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 193-226.
- Bhattacharjee P., Warang O., Das S., 2022. Impact of climate change on fruit crops: A review, *Current World Environment*, 17(2), <https://doi.org/10.12944/CWE.17.2.4>.
- Bindi M., Fibbi L., 2000. Modelling climate change impacts at the site scale on grapevine, in Downing T.E., Harrison P.A., Butterfield R.E., Lonsdale K.G. (Eds), *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe*, Environmental Change Institute, p. 117-134.
- Biss A., Ellis R., 2021. Modelling Chablis vintage quality in response to inter-annual variation in weather, *OENO One*, 55, 209-228, <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.3.4709>.
- Bois B., Zito S., Calonnec A., 2017. Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: the first results of a global survey, *OENO One*, 51, 133-139, <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.0.0.1780>.
- Bois B., Gavrilescu C., Zito S., Richard Y., Castel T., 2023. Uncertain changes to spring frost risks in vineyards in the 21st century, *Ives Technical Reviews*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7514>.
- Bortolami G., Gambett, G.A., Cassan C., Dayer S., Farolli E., Ferrer N. et al., 2021. Grapevines under drought do not express esca leaf symptoms, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 118, e2112825118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2112825118>.

- Brisson N., Levraud F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Livre vert du projet Climator (2007-2010), Ademe, 338 p., <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3893-changement-climatique-agriculture-et-foret-en-france-simulations-d-impacts-sur-les-principales-especes.html>.
- Brun L., Parisi L., Pincebourde S., Saudreau M., 2022. L'anticipation des impacts du changement climatique sur les bioagresseurs en arboriculture fruitière, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 319-356.
- Castellarin S.D., Matthews M.A., Gaspero G., Gambetta G.A., 2007. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries, *Planta*, 227, 101-112, <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0598-8>.
- Castex V., García de Cortázar-Atauri I., Beniston M., Moreau J., Semenov M., Stoffel M. et al., 2023. Exploring future changes in synchrony between grapevine (*Vitis vinifera*) and its major insect pest, *Lobesia botrana*, *OENO One*, 57, 161-174, <https://doi.org/10.20870/oenone.2023.57.1.7250>.
- Cauvel J., Launay M., García de Cortázar-Atauri I., Ripoche D., Huard F., Buis S. et al., 2014. A new integrated approach to assess the impacts of climate change on grapevine fungal diseases: the coupled MILA-STICS model vine growing and wine making in France challenging climate change, *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*, Spécial Laccave, 48, 45-54.
- Charrier G., Martin-StPaul N., Damesin C., Delpierre N., Hänninen H., Torres-Ruiz J.M. et al., 2021. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks, *Annals of Forest Science*, 78, 40, <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01052-5>.
- Chuine I., 2010. Why does phenology drive species distribution?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 3149-3160, <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0142>.
- Collins C., Ritchie M., James A., O'Brien P., Ma S., De Bei R. et al., 2022. Grapevine recovery after fire and a first look at rapid damage assessment with satellite imagery, *OENO One*, 56, 265-278, <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.2.5444>.
- Coombe B.G., 1987. Influence of temperature on composition and quality of grapes, *Acta Horticulturae*, 206, 23-36, <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.1987.206.1>.
- Costes E., Khadari B., Zaher H., Moukhli A., Morillon R., Legave J.-M. et al., 2016. Adaptation of Mediterranean fruit tree cultivation to climate change, in Thiébault S., Moatti Jean-Paul (Ed.), *The Mediterranean region under climate change: a scientific update*, Marseille, IRD-AllEnvi, 503-510. ISBN 978-2-7099-2219-7.
- Dai Z., Vivin P., Robert T., Milin S., Li S.H., Génard M., 2009. Model-based analysis of sugar accumulation in response to source-sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries, *Functional Plant Biology*, 36, 527-540, <https://doi.org/10.1071/fp08284>.
- Dalhaus T., Schlenker W., Blanke M.M., Bravin E., Finger R., 2020. The effects of extreme weather on apple quality, *Scientific Reports*, 10, 7919, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64806-7>.
- Duchêne E., Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace, *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 93-99, <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>.
- Duchêne E., Huard F., Dumas V., Schneider C., Merdinoglu D., 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41, 193-204, <https://doi.org/10.3354/cr00850>.
- Duchêne E., Butterlin G., Claudel P., Jaegli N., 2016. Consequences of elevated temperatures during ripening on the biosynthesis of monoterpenols in grape berries, *Conférence Climwine2016*, 2016, Bordeaux, France.
- Duchêne E., Coupel-Ledru A., Lebon E., Marguerit E., Ollat N., Simonneau T., 2017. Grapevine genetics and climate change, in Ollat N., Touzard J.-M., García de Cortázar-Atauri I., Quénol H., Van Leeuwen C. (Eds), *Sustainable Grape and Wine Production in the Context of Climate Change*, Vigne&Vin Publications Internationales, p. 131-140.
- Erez A., 2000. Bud dormancy: Phenomenon, problems and solutions in the tropics and subtropics, in Erez A. (Ed.), *Temperate Fruit Crops in Warm Climates*, Springer, Dordrecht, 17-48, https://doi.org/10.1007/978-94-017-3215-4_2.

- Falchi R., Petrussa E., Zancani M., Casolo V., Beraldo P., Nardini A. *et al.*, 2019. Summer drought stress: differential effects on cane anatomy and non-structural carbohydrate content in overwintering Cabernet Sauvignon and Syrah vines, *Bio Web of Conferences*, 13, 03007, <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191303007>.
- Fanton A.C., Furze M.E., Brodersen C.R., 2022. Pathogen-induced hydraulic decline limits photosynthesis and starch storage in grapevines (*Vitis* sp.), *Plant, Cell & Environment*, 45, 1829-1842, <https://doi.org/10.1111/pce.14312>.
- Fraga H., García de Cortázar-Atauri I., Malheiro A.C., Santos J.A., 2016. Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe, *Global Change Biology*, 22, 3774-3788, <https://doi.org/10.1111/gcb.13382>.
- Gallusci P., Agius D.R., Moschou P.N., Dobránszki J., Kaiserli E., Martinelli F., 2022. Deep inside the epigenetic memories of stressed plants, *Trends in Plant Science*, 28, 142-153, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.09.004>.
- Gambetta G.A., Kurtural S.K., 2021. Global warming and wine quality: are we close to the tipping point?, *OENO One*, 55, 353-361, <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.3.4774>.
- Gambetta G.A., Herrera J.C., Dayer S., Feng Q., Hochberg U., Castellarin S.D., 2020. The physiology of drought stress in grapevine : towards an integrative definition of drought tolerance, *Journal of Experimental Botany*, 71, 4658-4676, <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245>.
- García de Cortázar-Atauri I., 2006. Adaptation du modèle Stics à la vigne (*Vitis vinifera* L.) : utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France, thèse de doctorat, ENSA (Montpellier).
- García de Cortázar-Atauri I., Duchêne E., Destrac-Irvine A., Barbeau G., de Rességuier L., Lacombe T. *et al.*, 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions on the context of climate change, *OENO One*, 51, 115-126, <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.0.0.1622>.
- Gautier H., Baldazzi V., Bertin N., Vercambre G., Génard M., Quilot-Turion B. *et al.*, 2022. Anticiper les impacts du changement climatique sur la qualité des fruits et le rendement : l'apport de la modélisation, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 289-318.
- Gibert C., Chadœuf J., Nicot P., Vercambre G., Génard M., Lescourret F., 2009. Modelling the effect of cuticular crack surface area and inoculum density on the probability of nectarine fruit infection by *Monilia laxa*, *Plant Pathology*, 58, 1021-1031, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02121.x>.
- Godefroid M., Cruaud A., Streito J.C., Rasplus J.-Y., Rossi J.-P., 2019. *Xylella fastidiosa*: climate suitability of European continent, *Scientific Reports*, 9, 8844, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45365-y>.
- Gouache D., Roche R., Pieri P., Bancal M.-O., 2010. Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne, in Brisson N., Levraud F. (Coords), *Livre vert du projet Climator*, Ademe, p. 113-125.
- Gouot J.C., Smith J.P., Holzapfel B.P., Walker A.R., Barril C., 2019. Grape berry flavonoids: A review of their biochemical responses to high and extreme high temperatures, *Journal of Experimental Botany*, 70, 397-423, <https://doi.org/10.1093/jxb/ery392>.
- Greer D.H., 2017. Responses of biomass accumulation, photosynthesis and the net carbon budget to high canopy temperatures of *Vitis vinifera* L. cv. Semillon vines grown in field conditions, *Environmental and Experimental Botany*, 138, 10-20, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.03.001>.
- Guilpart N., Métay A., Gary C., 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year, *European Journal of Agronomy*, 54, 9-20, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.002>.
- Hébert-Haché A., Willwerth J.J., Kemp B., Inglis, D.L., 2023. Correlation between dehydrin-like proteins and cold hardiness of grapevine, *Canadian Journal of Plant Science*, 103, 494-506, <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0048>.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 3-32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

- Kahn C., Tittmann S., Hilbert G., Renaud C., Gomès E., Stoll M., 2022. VineyardFACE: Investigation of a moderate (+20%) increase of ambient CO₂ concentration on berry ripening dynamics and fruit composition of Cabernet-Sauvignon, *OENO One*, 56, 193-204, <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.2.5440>.
- Keller M., 2010. The science of grapevine: anatomy and physiology, Academic Press, Elsevier, Amsterdam, 375 p.
- Kovaleski A.P., North M.G., Martinson T.E., Londo J.P., 2023. Development of a new cold hardiness prediction model for grapevine using phased integration of acclimation and deacclimation responses, *Agricultural and Forest Meteorology*, 331, 109324, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109324>.
- Lamarque L.J., Delmas C.E.L., Charrier G., Burlett R., Dell'Acqua N., Pouzoulet J. *et al.*, 2023. Quantifying the grapevine xylem embolism resistance spectrum to identify varieties and regions at risk in a future dry climate, *Scientific Reports*, 13, 7724, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34224-6>.
- Lecourieux F., Kappel C., Pieri P., Charon J., Pillet J., Hilbert G. *et al.*, 2017. Dissecting the biochemical and transcriptomic effects of a locally applied heat treatment on developing Cabernet Sauvignon grape berries, *Frontiers in Plant Science*, 8, 53, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00053>.
- Legave J.-M., Bonhomme M., Mathieu V., Guédon Y., 2022. Les impacts du changement climatique sur la phénologie et les composantes du rendement des espèces fruitières, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 159-192.
- Leisner C.P., 2020. Review: Climate change impacts on food security- focus on perennial cropping systems and nutritional value, *Plant Science*, 293, 110412, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110412>.
- Le Menn N., van Leeuwen C., Picard M., Riquier L., de Revel G., Marchand S., 2019. Effect of vine water and nitrogen status, as well as temperature, on some aroma compounds of aged red Bordeaux wines, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67, 7098-7109, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00591>.
- Lescuret F., Moitrier N., Valsesia P., Génard M., 2011. QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development, *Trees*, 25, 519-530, <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0531-9>.
- Lobell D.B., Field C.B., 2011. California perennial crops in a changing climate, *Climatic Change*, 109, 317-333, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0303-6>.
- Lobell D.B., Field C.B., Cahill K.N., Bonfils C., 2006. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties, *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 208-218 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.006>.
- Londo J.P., Johnson L.M., 2014. Variation in the chilling requirement and budburst rate of wild *Vitis* species, *Environmental and Experimental Botany*, 106, 138-147, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.12.012>.
- Lopez G., Dejong T. M., 2007. Spring temperatures have a major effect on early stages of peach fruit growth, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82, 507-512, <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512266>.
- Luchaire N., Rienth M., Romieu C., Nehe A., Chatbanyong R., Houel C. *et al.*, 2017. Microvine, a new model to study growth and developmental patterns in grapevine, *American Journal of Enology and Viticulture*, 68, 283-292, <https://doi.org/10.5344/ajev.2017.16066>.
- Martínez-Lüscher J., Sánchez-Díaz M., Delrot S., Aguirreolea J., Pascual I., Gomès E., 2016. Ultraviolet-B alleviates the uncoupling effect of elevated CO₂ and increased temperature on grape berry (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) anthocyanin and sugar accumulation, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22, 87-95, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12213>.
- Medda S., Fadda A., Mulas M., 2022. Influence of climate change on metabolism and biological characteristics in perennial woody fruit crops in the mediterranean environment, *Horticulturae*, 8, 273, <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040273>.
- Mendez-Costabe M.P., Wilkinson K.L., Bastian S.E.P., Jordans C., McCarthy M., Ford C.M., Dokoozlian N., 2014. Rainfall, yield, green aromas. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20, 100-110, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12060>.

- Moriondo M., Ferrise R., Trombi G., Brilli L., Dibari C., Bindi M., 2015. Modelling olive trees and grapevines in a changing climate, *Environmental Modelling & Software*, 72, 387-401, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.016>.
- Naulleau A., Prévot L., Gary C., Hossard L., 2021. Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation, *Revue Agronomie, Environnement & Sociétés*, 11-2, 14 p., <https://doi.org/10.54800/rtr361>.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Berteloot V., Fabre J.-C., Crevoisier D. et al., 2022. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed, *Environmental Modelling & Software*, 150, 105342, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105342>.
- OIV, 2023. <https://www.oiv.int/fr/what-we-do/global-report?oiv>.
- Ollat N., Touzard J.-M., 2014. Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry, *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, Spécial Laccave, 75-78.
- Ollat N., Touzard J.-M., 2020. The wine industry confronted by climate change, projet Laccave, Horizon 2050, <https://hal.inrae.fr/hal-02538191>.
- Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 284 p.
- Ollat N., Diakou-Verdin P., Carde J.P., Barrieu F., Gaudillière J.P., Moing A., 2002. Grape berry development : a review, *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 36, 109-131, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2002.36.3.970>.
- Ollat N., Brisson N., Denoyes B., García de Cortázar-Atauri I., Goutouly J.P., Kleinhentz M. et al., 2013. Activités agricoles, in R. Aquitaine (Coord.), *Prévoir pour agir : La région Aquitaine anticipe le changement climatique*, Presses universitaires de Bordeaux, p. 108-125.
- Ollat N., Gastal F., Pellerin S., Barillot R., Calonnec A., Chéry P. et al., 2018. Quelle agriculture demain en Nouvelle Aquitaine ?, in R. Aquitaine (Coord.), *Anticiper les changements climatiques demain en Nouvelle-Aquitaine pour agir dans les territoires : Prévoir pour agir n° 2*, éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 250-279.
- Ollat N., Marguerit E., Hilbert G., Gomès E., Gambetta G., van Leeuwen C., 2022. Climate change impacts: a multi-stress issue, *IVES Conference Series, Terclim 2022*, <https://ives-openscience.eu/13046/>.
- Pellegrino A., Clingeffer P., Cooley N., Walker R., 2014. Management practices impact vine carbohydrate status to a greater extent than vine productivity, *Frontiers in Plant Science*, 5, 283, <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00283>.
- Pieri P., Lebon E., 2010. Changement climatique et culture de la vigne : l'essentiel des impacts, in Brisson N., Levraud F. (Coords), *Livre vert du projet Climator*, Ademe, p. 213-223.
- Pons A., Allamy L., Schüttler A., Rauhut D., Thibon C., Darriet P., 2017. What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grapes?, *OENO One*, 51, 141-146, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1868>.
- Puga G., Anderson K., Doko Tchatoka F., 2023. The impact of climate change on grape yields: Evidence from Australia, *OENO One*, 57, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7280>.
- Regnard J.-L., Coupel-Ledru A., 2022. Comprendre et limiter les effets du déficit hydrique chez les espèces fruitières, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 259-288.
- Regnard J.L., Hutin C., 2022. Les filières de production fruitière face aux défis du changement climatique et aux enjeux de compétitivité, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 41-82.
- Sadka A., Shlizerman L., Kamara I., Blumwald E., 2019. Primary metabolism in Citrus fruit as affected by its unique structure, *Frontiers in Plant Science*, 10, 1167, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01167>.
- Sadras V.O., Moran M.A., 2012. Elevated temperature decouples anthocyanins and sugars in berries of Shiraz and Cabernet Franc, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18, 5-22, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2012.00180.x>.
- Schultz H.R., 2020. L'émergence de vignobles dans les régions froides, un forçage du changement climatique ?, Rencontres du Clos-Vougeot 2019, Beaune, France, 205-214.

- Schüttler A., Guthier C., Stoll M., Darriet P., Rauhut D., 2015. Impact of grapes clusters defoliation on TDN potential in cool climate Riesling wines, *BIO Web of Conferences*, 5, 01006, <https://doi.org/10.1051/bioconf/20150501006>.
- Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Pagé C. *et al.*, 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate, *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>.
- Sugiura T., Ogawa H., Fukuda N., Moriguchi T., 2013. Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change, *Scientific Reports*, 3, 2418, <https://doi.org/10.1038/srep02418>.
- Tomasella M., Petrussa E., Petruzzellis F., Nardini A., Casolo V., 2020. The possible role of non-structural carbohydrates in the regulation of tree hydraulics, *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 144, <https://doi.org/10.3390/ijms21010144>.
- Thach L., 2018. The amazing resilience of wine grape vineyards, *Wine Economics and Policy*, 7, 1-2, <https://doi.org/10.1016/j.wep.2018.04.002>.
- Thibon C., Rolland A., Darriet P., Teissèdre P.-L., Jourdes M., Pons A., 2024. Impacts du changement climatique sur la qualité des vins, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 67-75.
- Thiery D., 2008. Les Tordeuses nuisibles au vignoble, in *Les Ravageurs de la vigne*, Bordeaux, éditions Féret, 230 p.
- Tombesi S., Frioni T., Poni S., Palliotti A., 2018. Effect of water stress “memory” on plant behavior during subsequent drought stress, *Environmental and Experimental Botany*, 150, 106-114, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.009>.
- Torregrosa L., Bigard A., Doligez A., Lecourieux D., Rienth M., Luchaire N. *et al.*, 2017. Developmental, molecular and genetic studies on the grapevine response to temperature open breeding strategies for adaptation to warming, *OENO One*, 51, 155-165, <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.0.0.1587>.
- Tresson P., Brun L., García de Cortázar-Atauri I., Audergon J.M., Buléon S., Chenevotot H. *et al.*, 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France, *European Journal of Agronomy*, 112, 125960, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125960>.
- Van Leeuwen C., Darriet P., 2016. The impact of climate change on viticulture and wine quality, *Journal of Wine Economics*, 11, 150-167, <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>.
- Van Leeuwen C., Barbe J.C., Darriet P., Destrac-Irvine A., Gowdy M., Lytra G. *et al.*, 2022. Aromatic maturity is a cornerstone of terroir expression in red wine, *OENO One*, 56, 335-351, <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.2.5441>.
- Van Leeuwen C., Simonneau T., Delmas C.E.L., 2024. Effets des stress thermiques et hydriques sur le fonctionnement et le développement de la vigne, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 48-66.
- Venios X., Korkas E., Nisiotou A., Banilas G., 2020. Grapevine responses to heat stress and global warming, *Plants*, 9, 1754, <https://doi.org/10.3390/plants9121754>.
- Webb L.B., 2006. The impact of projected greenhouse gas-induced climate change on the Australian wine industry, thèse de doctorat, School of Agriculture and Food Systems, université de Melbourne, 277 p.
- Webb L., Watt A., Hill T., Whiting J., Wigg F., Dunn G. *et al.*, 2009. Extreme heat: managing grapevine response, summer heatwave report, www.landfood.unimelb.edu.au/vitum.
- Wenden B., Chuine I., Farrera I., García de Cortázar-Atauri, Legave J.-M., 2022. Des modèles prédictifs comme outils d’anticipation des changements phénologiques chez les espèces fruitières, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l’heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 227-258.
- Wohlfart Y., Smith J.P., Tittman S., Honermeier B., Stoll M., 2018. Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE), *European Journal of Agronomy*, 101, 149-162, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.005>.
- Wu J., Drappier V., Hilbert G., Guillaumie S., Dai Z., Geny L. *et al.*, 2019. The effects of a moderate grape temperature increase on berry secondary metabolites, *OENO One*, 53, 321-333, <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.2.2434>.

Yang C.Y., Menz C., Fraga H., Costafreda-Aumedes S., Leolini L., Ramos M.C. *et al.*, 2022. Assessing the grapevine crop water stress indicator over the flowering-veraison phase and the potential yield loss rate in important European wine regions, *Agricultural Water Management*, 261, 107349, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107349>.

Zhu J., Génard M., Poni S., Gambetta G.A., Vivin P., Vercambre G. *et al.*, 2018. Modelling grape growth in relation to whole-plant carbon and water fluxes, *Journal of Experimental Botany*, 70, 2505-2521, <https://doi.org/10.1093/jxb/ery367>.

Zito S., 2021. Évolution du risque phytosanitaire au vignoble dans le nord-est de la France en lien avec le changement climatique : observations et modélisation. Cas de l'oïdium de la vigne, thèse de doctorat, université Bourgogne Franche-Comté, 223 p., <https://theses.hal.science/tel-03585501/>.

Zito S., Pergaud J., Richard Y., Castel T., Le Roux R., García de Cortázar-Atauri I. *et al.*, 2023. Projected impacts of climate change on viticulture over French wine regions using downscaled CMIP6 multi-model data, *OENO One*, 57, 431-446, <https://doi.org/10.20870/oenone.2023.57.2.7441>.

Chapitre 8

Santé des plantes et changement climatique

*Marie Launay, Marie-Odile Bancal, Nathalie Colbach,
Sylvain Pincebourde, Tiphaine Vidal*

Les plantes sont constamment confrontées à des organismes nuisibles (dits bioagresseurs), dont les impacts sanitaires, économiques et alimentaires sont particulièrement notables dans les agrosystèmes. Aux échelles française, européenne et mondiale, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)³⁵, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa)³⁶ et l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)³⁷ contribuent à assurer le maintien de la performance des végétaux (comme la croissance, la fructification) en prévenant l'émergence, voire les invasions des bioagresseurs, tout en s'inscrivant dans une réduction d'usage des pesticides pour préserver la santé humaine et l'environnement³⁸. Ainsi, la santé des végétaux est un concept clé du courant One Health, qui propose de prendre en compte les liens entre santé humaine, animale, végétale et environnementale (Duru, 2023). Le concept de santé des plantes se définit comme «la capacité des plantes à maintenir leurs fonctions physiologiques au mieux de leur potentiel génétique», selon l'environnement local et sous la contrainte de multiples bioagresseurs (Agrios, 2005). Ces derniers couvrent une diversité d'organismes : champignons, virus, insectes, adventices («mauvaises herbes»), entre autres. La santé des plantes intègre donc à la fois les capacités de résilience individuelles ou populationnelles des plantes et le système complexe d'organismes en interactions dynamiques (Döring *et al.*, 2012), dans leur contexte climatique et plus largement environnemental. Cette vision holistique appelle donc nécessairement à des approches inter et transdisciplinaires. Néanmoins, la gestion monodisciplinaire et axée sur un unique bioagresseur est la plus fréquente historiquement pour régler une urgence sanitaire (par exemple le mildiou de la pomme de terre, voir Semal, 1995). Or, les méthodes de contrôle, qui font souvent appel à des approches chimiques (traitements phytosanitaires) ou génétiques, peuvent conduire soit à des échecs par contournement de résistances variétales (champignons, virus,

35. <https://www.anses.fr/fr>

36. <https://www.efsa.europa.eu/fr>

37. <https://www.fao.org/home/fr>

38. <https://www.anses.fr/fr/thematique/sant%C3%A9-des-v%C3%A9g%C3%A9taux>; <https://www.inserm.fr/expertise-collective/pesticides-et-sante-nouvelles-donnees-2021/>

etc.) (Mundt, 2014) ou par développement de résistances aux pesticides (adventices, insectes) (Hawkins *et al.*, 2019), soit au développement d'autres bioagresseurs une fois la niche écologique vacante (*Phaeosphaeria nodorum* remplacé par *Zymoseptoria tritici*) (Solomon *et al.*, 2006; Shaw *et al.*, 2008). L'implémentation multiéchelle du concept de santé des plantes avec l'intégration de l'ensemble des composantes biotiques reste complexe et nécessite une bonne compréhension des mécanismes en jeu. Ce chapitre vise à donner les clés pour mieux comprendre les processus biotiques associés à la santé des plantes, et leur évolution dans le contexte du changement climatique. Trois grandes classes de contraintes biotiques altèrent la santé des végétaux : les organismes animaux ou ravageurs (par exemple les mammifères, les arthropodes), les micro-organismes phytopathogènes (comme les bactéries, les champignons, les virus) et enfin les plantes dites adventices. La dynamique des populations de ces différents organismes peut fortement limiter l'adaptation des plantes cultivées à leur environnement et à leur productivité. La diversité des interactions est grande. Certains organismes entretiennent une relation de parasitisme facultatif (comme la plupart des ravageurs) ou obligatoire (pour ce qui est de certains virus ou agents pathogènes), quand d'autres rentrent essentiellement en compétition pour les ressources ou les habitats avec les plantes cultivées (comme c'est le cas des adventices non parasites). Les adventices se distinguent des autres bioagresseurs sur un point crucial : elles se développent mieux en l'absence de plantes cultivées, alors que tous les autres bioagresseurs profitent de la présence des plantes cultivées. La vision holistique du concept de santé des plantes implique l'intégration de l'ensemble de ces interactions dans un seul et même cadre, permettant ainsi de considérer les effets à la fois directs des bioagresseurs sur les plantes, mais également les effets indirects *via* les relations biotiques entre bioagresseurs et les influences du climat sur chaque élément de la chaîne trophique. Ce chapitre illustre de manière non exhaustive comment cette intégration peut se réaliser, et surtout la puissance de telles approches.

Si les déterminants climatiques ont un impact majeur dans les évolutions des bioagresseurs et dans la santé des végétaux (Juroszek et von Tiedemann, 2013), les évolutions des pratiques et des systèmes de culture des xx^e et xxI^e siècles reconfigurent fortement la diversité des bioagresseurs et leurs ennemis naturels présents dans le paysage. D'une part, l'intensification, l'artificialisation et la simplification des systèmes de culture adoptés à l'issue de la Seconde Guerre mondiale pour atteindre une autonomie alimentaire ont fortement accru le recours aux intrants synthétiques et aux produits phytosanitaires. Leur impact alarmant sur la biodiversité limite de manière avérée le potentiel de régulation des écosystèmes cultivés (Mamy *et al.*, 2022; Pesce *et al.*, 2023). D'autre part, la biodiversité cultivée reste limitée, en particulier dans le cas des grandes cultures; ainsi les diversifications intra et interspécifiques restent faibles aux échelles intra ou interparcellaires, ce qui affecte la santé des végétaux (Tibi *et al.*, 2023). Dans une optique de transition agroécologique, assurer la santé des végétaux face au changement climatique nécessite donc de repenser en profondeur les systèmes agricoles pour promouvoir notamment les régulations biologiques des bioagresseurs et pour ainsi réduire la dépendance aux pesticides. Évaluer la résilience de tels systèmes face au changement climatique nécessite des approches prédictives. Ce chapitre vise donc également à documenter différentes approches prédictives permettant de mieux représenter les trajectoires de la performance des plantes dans le futur sous la contrainte du changement global.

► Les différents concepts au cœur de la santé des plantes

Importance des stress biotiques

Les bioagresseurs des plantes cultivées sont responsables de pertes majeures de production en quantité et en qualité soit pendant le cycle cultural en affectant le bon fonctionnement physiologique des plantes soit durant la période de stockage en attaquant directement les produits récoltés. Les bioagresseurs des plantes affectent ainsi les quatre piliers de la sécurité alimentaire : l'accès, la disponibilité, l'utilisation et la stabilité (Rizzo *et al.*, 2021). Les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs sur les principales grandes cultures sous protection phytosanitaire (blé, maïs, pomme de terre et soja) se produisent périodiquement, quasiment à chaque cycle cultural (Savary *et al.*, 2019). Sans protection phytosanitaire et en incluant les adventices, ces pertes pourraient même atteindre 50 % à 82 % (Oerke, 2006). Dans le passé, les adventices étaient les bioagresseurs les mieux contrôlés par les produits phytosanitaires disponibles (herbicides), mais elles ont depuis développé des résistances à de nombreuses matières actives (Heap, 2023). Les ravageurs (insectes, acariens, nématodes, etc.) et agents pathogènes (champignons, bactéries, virus, etc.) se partagent les dégâts équitablement à hauteur de 8 % à 15 % chacun (Oerke, 2006) (figure 8.1). Enfin, les crises sanitaires les plus importantes sont fréquemment associées à des ravageurs et à des maladies émergents ou réémergents tels que la rouille noire du blé, la chenille légionnaire d'automne, la nécrose létale ou encore la striga sur maïs, la pourriture brune de la pomme de terre ou la rouille du soja (Savary *et al.*, 2019). Entre 1845 et 1848, un million et demi d'Irlandais sont ainsi morts de faim et à peu près autant ont quitté l'Irlande en raison d'une épidémie récurrente de mildiou de la pomme de terre (Agrios, 2005). Plus récemment, l'extension de la mouche suzukii, celle de la bactéries *Xylella fastidiosa* ou encore celle de l'orobanche rameuse (*Phelipanche ramosa* L.), plante parasite non chlorophyllienne, ont mobilisé les filières agricoles touchées afin d'accroître les connaissances sur ces bioagresseurs et de développer des méthodes de lutte efficaces. Les adventices non parasites sont plutôt un problème endémique : elles sont présentes tous les ans et dans toutes les cultures. La gestion des adventices doit donc être permanente pour éviter que les semences produites par une flore mal maîtrisée au cours d'une année donnée ne causent des infestations importantes pendant plusieurs années à venir.

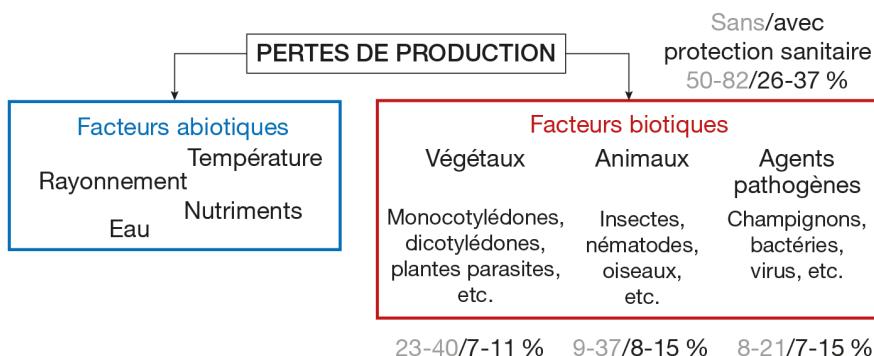


Figure 8.1. Répartition des causes de pertes de production (%), selon leur origine biotique ou abiotique. Source : figure adaptée de Oerke (2006).

Fonctionnement des bioagresseurs

Cycle des bioagresseurs

Une épidémie se définit comme le développement et la propagation rapide d'une population de bioagresseurs, ici, insectes, agents pathogènes et adventices parasites, dans une population de plantes hôtes. Dans le cas des adventices non parasites, une épidémie se traduit par une infestation d'un champ cultivé par les adventices. Il n'y a pas de relation hôte-parasite pour ces adventices, mais les plus abondantes et les plus nuisibles miment souvent les périodes de levée et de reproduction (Nichols *et al.*, 2015), voire la morphologie (Barrett, 1983) de la culture donnée. On considérera ici la culture principale infestée par des adventices comme une plante hôte, bien que ce terme soit rarement appliqué au cas des adventices.

La réussite d'une épidémie est inféodée à la réussite d'un ou de plusieurs cycles du bioagresseur (mono ou polycyclique). La figure 8.2 montre une généralisation du cycle de développement d'un bioagresseur (insecte, agent pathogène ou adventice).

Si cette généralisation n'a pas l'ambition de représenter tous les cas de figure, elle permet de mettre en exergue des points communs d'importance dans la dynamique des épidémies : (1) une propagule (spores, œufs ou semences) (2) s'installe (a) et se multiplie (b) sur, dans ou au milieu de la population hôte, d'où elle est (3) dispersée à plus ou moins longue distance pour y réaliser d'autres cycles et/ou (4) pour être bloquée sous une forme de survie dans l'attente de conditions favorables. Bien sûr, des différences biologiques importantes entre les bioagresseurs modulent leur réponse aux facteurs de l'environnement : la croissance du bioagresseur, en fonction du stade de développement et du spectre de plantes hôtes (les ravageurs et agents pathogènes peuvent être spécialistes d'un hôte ou généralistes, tandis que les adventices ne peuvent lever et se reproduire que dans un seul type de culture ou dans toutes les cultures) ; la dispersion du bioagresseur, active (insectes), passive ou liée à des vecteurs (adventices et agents pathogènes) ; et la durée de survie du bioagresseur, de quelques mois à plusieurs décennies.

Triangle épidémique généralisé

La santé végétale est affectée lorsqu'un ou plusieurs bioagresseurs se développent suffisamment sur une culture pour altérer son fonctionnement, sa croissance et *in fine* son rendement ou sa qualité. Le dommage occasionné résulte d'interactions nécessaires au développement d'une maladie (au sens large) ou d'un stress biotique qui traduit le triangle épidémique généralisé (figure 8.3).

Cela nécessite donc la cooccurrence :

- de propagules vivantes dans l'environnement local : spores de champignons phytopathogènes, semences d'adventices, œufs d'insectes, etc. ;
- d'un environnement local favorable au développement et à la croissance des plantes hôtes et des bioagresseurs : physique (microclimat), chimique (nutriments, pollutions aériennes et racinaires non rédhibitoires) et biologique (vecteurs, diversité végétale naturelle, etc.) ;
- d'un « habitat végétal » favorable (c'est-à-dire sensible aux maladies et aux insectes ou peu compétitif vis-à-vis des adventices) ; cela recouvre d'une part la présence de l'hôte

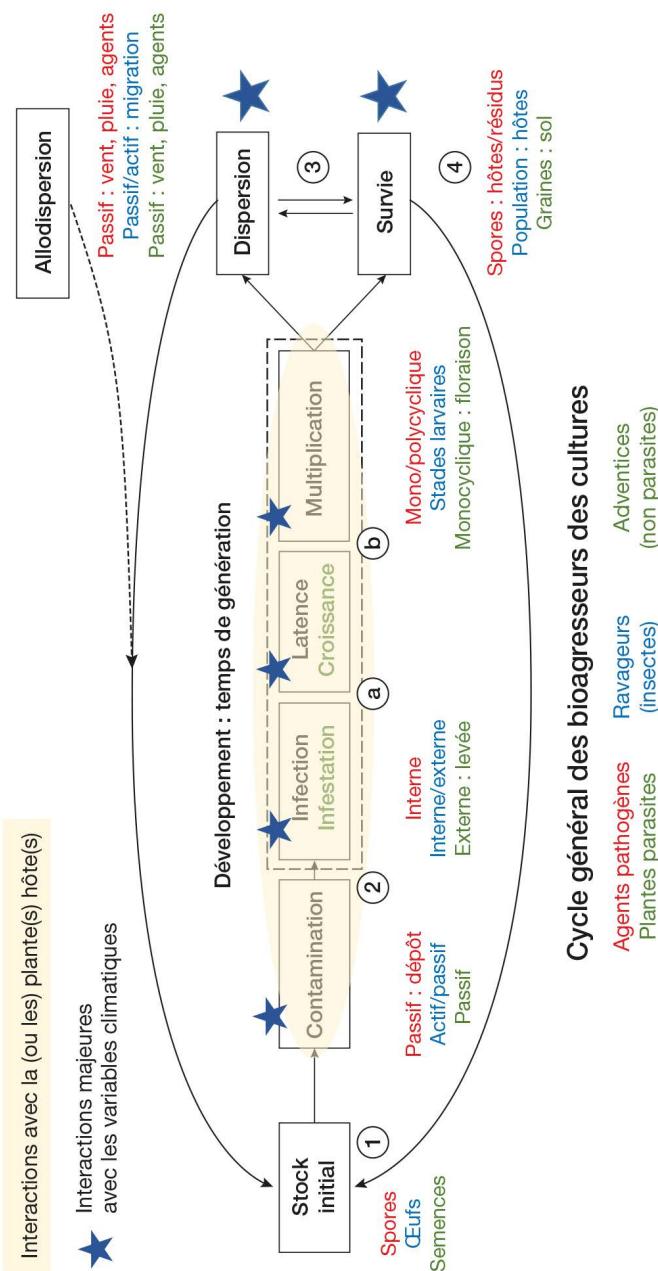


Figure 8.2. Cycle général des bioagresseurs des cultures.

Cette figure généralise le cycle de vie des principaux bioagresseurs des cultures, micro-organismes phytopathogènes, ravageurs et plantes adventices, afin de mettre en exergue les principales similitudes et différences dans les étapes et dans le vocabulaire employé. Ainsi, l'espèce préférentielle dans laquelle s'installe un agent pathogène, un ravageur ou une plante adventice sera une plante hôte. De la même manière, on parlera d'*infection* lorsque les agents pathogènes, ravageurs ou plantes parasites s'installent dans les tissus de la plante hôte et y puisent des ressources pour leur croissance, et d'*infestation* lorsque la multiplication des bioagresseurs reste externe tout en modifiant l'accès aux ressources de la plante (adventices).

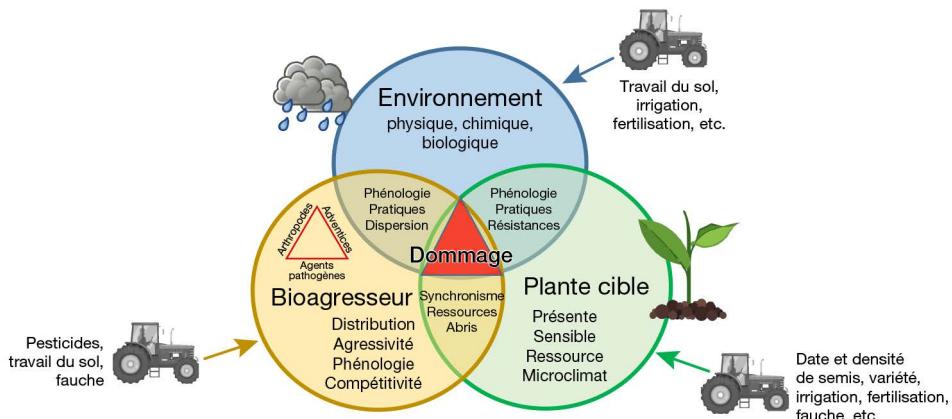


Figure 8.3. Généralisation du concept de triangle épidémique défini à tout bioagresseur. Source : d'après Fones *et al.* (2020).

Des dégâts (symptômes) ou des dommages (baisse de performance) sur la plante cible cultivée surviennent si plusieurs conditions s'appliquent de manière synchronie d'une part pour la population de plante hôte ou cible, d'autre part pour la ou les populations de bioagresseurs concernés, et ce dans un environnement physique, chimique et biologique favorable à l'interaction. Ces trois conditions sont fortement modulées par le climat en interaction avec les pratiques culturales.

(sauf dans le cas des adventices où une absence de plantes cultivées est un avantage), sa sensibilité génétique et phénologique au bioagresseur, sa sensibilité physiologique en lien avec son statut nutritionnel et/ou son état de stress, et d'autre part le micro-environnement physique qui résulte du filtrage par le peuplement cultivé.

Les pratiques agronomiques, comme le choix variétal (impliquant une période de culture et une phénologie des phases sensibles) et la conduite de la culture (incluant les traitements phytosanitaires, le biocontrôle, etc.), influencent largement ce système complexe, en particulier le développement de dommages liés aux bioagresseurs. Enfin, même si cette situation est moins évoquée dans la littérature, quand plusieurs bioagresseurs sont présents simultanément dans une culture, c'est leur compétition pour les ressources ou leur réponse différentielle au micromilieu généré qui orientent *in fine* le profil de bioagresseurs. À noter que si les adventices ont un statut un peu à part du fait de leur interaction indirecte avec la plante hôte (voir section « Effets indirects du climat sur le bioagresseur grâce à la culture cible et aux changements de pratiques culturales » de ce chapitre, p. 196), les plantes parasites telles que l'orobanche et la striga (*Striga* spp.) sont des adventices au comportement proche des champignons telluriques, avec un inoculum persistant dans la parcelle, dans une relation fonctionnelle de parasitisme.

► Impacts observés et attendus du changement climatique sur les bioagresseurs

L'évolution attendue des variables climatiques influençant l'installation et le développement des bioagresseurs est dans la continuité de ce qui a été observé ces dernières décennies en France : une augmentation générale des températures, et cela, de manière plus importante en été qu'en hiver, une augmentation des précipitations en hiver et une baisse en été, et une intensification de la fréquence et de l'intensité

des événements extrêmes (sécheresses, vagues de chaleur, etc.) (voir chapitre 1). Les réponses des bioagresseurs aux évolutions de ces variables climatiques sont multiples, dépendant de leur diversité taxonomique et de leurs besoins climatiques, mais également de l'évolution de leur environnement physique (en particulier le sol), chimique (anthropique ou émission par les plantes) et biologique (en particulier les plantes hôtes) sous l'effet du changement climatique. On distingue toutefois deux axes d'effets : les effets directs du climat sur les bioagresseurs et les effets indirects médiés par la plante cultivée et par les pratiques agricoles.

Effets des conditions climatiques et de leur évolution présente et future

Effets directs du climat sur les bioagresseurs

Les organismes nuisibles traités dans ce chapitre sont ectothermes et, à ce titre, ils sont soumis aux variations de température de leur environnement. La température est ainsi le déterminant principal de leur développement ou croissance, de leur activité physiologique (métabolisme, photosynthèse) ou encore de leur dispersion (figure 8.4). Chaque processus suit une fonction de réponse générale à la température ou « norme de réaction » (Schulte, 2015) entre une température minimale, optimale et maximale en deçà et au-delà desquelles le développement est faible ou cesse (Sinclair *et al.*, 2016). Ces températures cardinales sont spécifiques de l'organisme (Caubel *et al.*, 2012; Woods *et al.*, 2015), de son stade (Ma *et al.*, 2021), ou du trait de performance considéré (Sinclair *et al.*, 2016). Elles expliquent donc en grande partie les aires de distribution des espèces (voir par exemple Forrest et Miller-Rushing, 2010; Sunday *et al.*, 2019; Iler *et al.*, 2021) et l'adaptation au climat local des différentes espèces (Mariette *et al.*, 2016; Pincebourde et Casas, 2019). De manière générale, une compréhension *quantitative* de la sensibilité thermique des organismes est donc nécessaire afin d'identifier et d'anticiper les effets des variations climatiques.

La température réellement vécue par les bioagresseurs est une information primordiale pour faire ce lien entre les changements environnementaux et la performance de ces organismes. Les stations météorologiques mesurent la température de l'air en milieu ouvert à environ deux mètres du sol, ce qui ne représente pas les conditions thermiques pour un insecte endogène, un micro-organisme pathogène en surface des feuilles éclairées ou ombrées, ou encore une graine d'aventice dans le sol. Les conditions climatiques auxquelles est directement soumis le bioagresseur durant la majeure partie de son cycle sont celles du microclimat. Ce concept de microclimat est crucial, car la température mesurée à très fine échelle peut varier de l'ordre de 20 °C entre les différentes surfaces ou structures depuis le sol jusque dans le couvert de la plante hôte ou cible (Suggitt *et al.*, 2011; Pincebourde *et al.*, 2016). Le microclimat résulte de transferts de matière (eau, CO₂, etc.) et d'énergie (chaleur, rayonnement) entre l'atmosphère, le sol et la plante, les adventices participant à ces échanges au même titre que les plantes cultivées. Ces échanges déterminent une température généralement hétérogène (Guilioni *et al.*, 2000; Saudreau *et al.*, 2017; Boixel, 2020), des conditions d'humidité et de rayonnement au sein du couvert végétal, à la surface ou à l'intérieur des organes sensibles, très différentes des conditions climatiques atmosphériques. Par exemple, le fonctionnement biophysique d'une mine, galerie forée par une larve d'insecte dans l'épaisseur d'une feuille, provoque généralement une hausse de la température intérieure qui peut atteindre 12 °C de plus que l'air ambiant, conditionnant le développement des stades

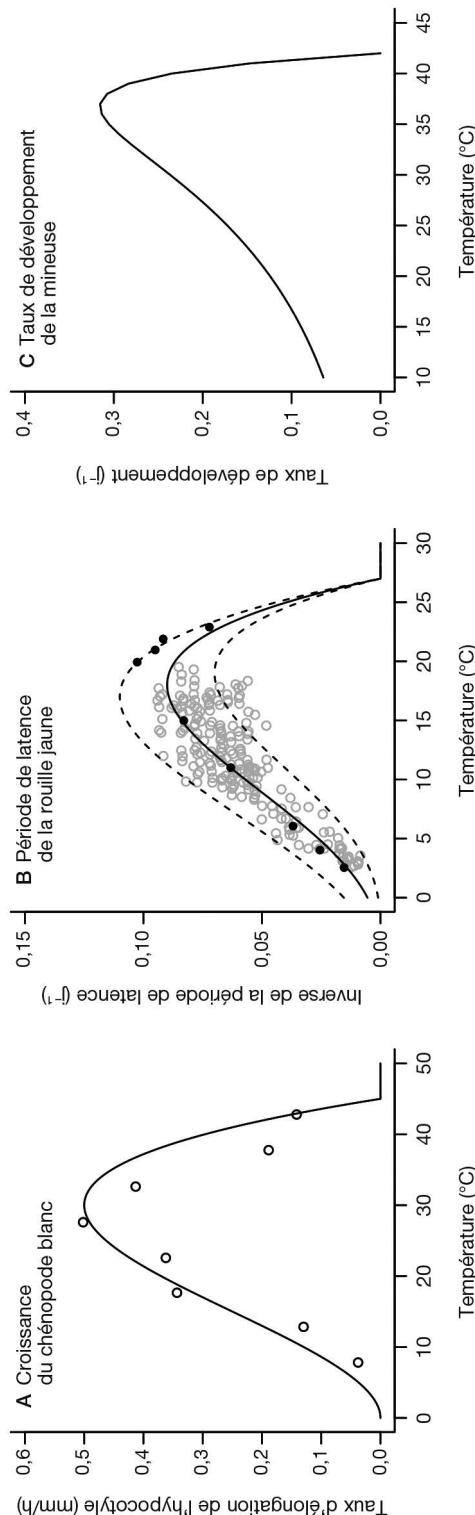


Figure 8.4. Impact de la température sur la performance : (A) la vitesse d'élongation de l'hypocotyle du chénopode blanc, (B) l'inverse de la durée de latence de la rouille jaune, (C) le taux de développement de la mineuse. Sources : d'après (A) Roman *et al.*, 1999, (B) Vidal *et al.*, 2022 et (C) Pincebourde *et al.*, 2007.

larvaires (Pincebourde et Casas, 2006). Les bioagresseurs (autres que les adventices) étant de petite taille en général (plus particulièrement pour les insectes et les phytopathogènes), des approches à fine échelle (mesure, modélisation) sont requises pour évaluer le microclimat de l'organisme, à l'échelle du centimètre pour la plupart des arthropodes par exemple (Pincebourde et Woods, 2020). Le cas des adventices est un peu différent. La température de l'air favorise certes leur croissance et leur développement, mais c'est le microclimat du sol qui est primordial pour déterminer quand ces plantes apparaissent. Or, la température dans le sol varie considérablement entre l'horizon de surface et les horizons sous-jacents (Illston et Fiebrich, 2017), alors que les semences adventices peuvent être enfouies profondément en fonction de l'outil de travail du sol (Colbach *et al.*, 2000; Colbach *et al.*, 2014).

La température n'est cependant pas la seule variable qui détermine la performance de ces organismes. Dans le cas des agents pathogènes et des adventices, la présence d'eau liquide ou d'une humidité relative seuil du sol ou de l'air est également une condition nécessaire à la germination des propagules, permettant la levée des adventices et l'infection par les agents pathogènes. Dans les deux cas, on représente les besoins conjoints en température et en humectation pour la germination et la levée des adventices depuis un événement déclencheur (pluie ou travail du sol) (Gardarin *et al.*, 2012) ou la réussite de l'infection (Magarey *et al.*, 2005). Une fois levées, les plantes adventices continuent à prélever de l'eau, tout comme les plantes cultivées. La réduction des pluies estivales va ainsi amplifier la compétition pour l'eau entre les adventices et les cultures, et le stress hydrique résultant va non seulement réduire la croissance des plantes cultivées (Kramer et Boyer, 1995), mais aussi changer leur morphologie (Moreau *et al.*, 2022). Enfin, un microclimat plus sec encourage également la présence d'insectes polyphages, prédateurs généralistes de nombreux insectes herbivores des cultures (Griffiths *et al.*, 2008).

Au contraire, une fois installés dans les tissus des plantes, les agents pathogènes et les insectes endogènes ne sont plus limités en eau, et leur développement ne dépend principalement que de la température interne des organes qu'ils colonisent (voir par exemple Pincebourde et Casas, 2006); les organismes restant en surface dépendent de la température de surface des organes (voir par exemple Bernard *et al.*, 2013). Dans ces deux cas, le rayonnement et le vent à l'échelle de l'organe infecté joueront un rôle important dans la température perçue par l'organisme et auront des conséquences pour son développement (Woods *et al.*, 2022). La pluie et le vent sont d'ailleurs deux facteurs climatiques clés dans la dispersion passive à courte (Šantl-Temkiv *et al.*, 2022) et longue distance (Corredor-Moreno et Saunders, 2020; Meyer *et al.*, 2017) des propagules. Bien que l'efficacité de la dispersion soit directement liée à la taille des propagules (Chaudhary *et al.*, 2022) ou encore à la hauteur de la source émettrice (Thomson *et al.*, 2011), le patron de diffusion des organismes à dispersion passive reste largement hétérogène dans l'espace, du fait de la variabilité spatiale et temporelle du vent et des précipitations (Byrne *et al.*, 1996; Aylor, 1999). Par ailleurs, l'augmentation du CO₂ atmosphérique favorise la croissance des plantes adventices au même titre que celle des plantes hôtes, et indirectement le développement des bioagresseurs biotrophes. La fermeture stomatique favorisée par l'augmentation du CO₂ est également susceptible de limiter la pénétration de certains bioagresseurs (Mcelrone *et al.*, 2005).

Enfin, l'effet de conditions climatiques particulières à un instant donné dépend du contexte saisonnier. La plupart des bioagresseurs en milieu tempéré ont évolué selon des stratégies leur permettant de survivre aux conditions sous-optimales de l'hiver (diapause pour les insectes, dormance pour les adventices et les agents pathogènes) (Sinclair, 2015; Gardarin et Colbach, 2015). Ces processus dépendent des variations de températures et, dans une moindre mesure, d'humidité, qui opèrent un filtrage saisonnier entre et au sein des populations de bioagresseurs (Suffert *et al.*, 2018). Là encore, les bioagresseurs montrent une grande diversité dans les réponses physiologiques aux variations saisonnières. Les conditions requises pour lever la dormance des adventices dépendent du type d'espèce : le froid lève la dormance des espèces à levée printanière, tandis que le chaud induit de la dormance, et vice versa pour les espèces automnales (Allen *et al.*, 2007). L'entrée et la sortie de diapause des insectes sont souvent reliées à la température ; les changements de température hivernale, dans son patron général et sa variabilité, peuvent induire des dommages physiologiques et altérer les balances énergétiques et hydriques de l'insecte, provoquant un avancement ou un retard dans la phénologie avec des conséquences sur la dynamique des populations au printemps suivant (Williams *et al.*, 2015).

Effets indirects du climat sur le bioagresseur grâce à la culture cible et aux changements de pratiques culturelles

Le contexte microclimatique (voir ci-dessus) génère une interaction entre les conditions climatiques et les pratiques culturelles dans la réponse du bioagresseur aux changements environnementaux. L'intervention agronomique (taille, coupe, etc.) en modifiant l'architecture des couverts cultivés peut déterminer le niveau d'hétérogénéité des températures de surface des organes ainsi que sa configuration spatiale (Woods *et al.*, 2018). La gestion de l'architecture des couverts peut donc être un levier agronomique pour moduler les effets des températures élevées sur certains bioagresseurs. Cette hypothèse, très peu testée sur des cultures de plein champ, semble néanmoins peu plausible pour les arthropodes ravageurs (notamment en vergers, voir Saudreau *et al.*, 2013). De même, la densité de plantes et le schéma de plantation (distances entre plantes et interrang, orientation des rangs par rapport aux points cardinaux, aux vents dominants, etc.) conditionnent la circulation de l'air et les phénomènes d'éclaboussures au sein du couvert, favorisant ou non la dispersion des spores chez les champignons pathogènes. En diminuant la pénétration du rayonnement, la structure du couvert cultivé réduit l'interception de ce rayonnement par les adventices, ce qui limite leur activité photosynthétique et leur croissance. Cela peut également limiter l'évapotranspiration, ce qui réduit la durée d'humectation et par conséquent le risque de contamination par certains champignons pathogènes (Schoeny *et al.*, 2010).

Les stress abiotiques engendrés par l'évolution du climat sont susceptibles de modifier la vulnérabilité de l'espèce hôte vis-à-vis des attaques par les bioagresseurs. Deux types d'interactions ont été décrits : la « protection croisée », quand la résistance des plantes aux stress biotiques est augmentée par l'occurrence d'un stress abiotique, et la « vulnérabilité croisée », quand la sensibilité des plantes aux stress biotiques est accrue sous l'effet de stress abiotiques (Fones et Gurr, 2017; Sturrock *et al.*, 2011). Dans un contexte où le changement climatique favorise les stress thermiques et hydriques, le mécanisme de vulnérabilité croisée profite particulièrement aux agents pathogènes opportunistes et émergents, infectant les plantes stressées. Ainsi, *Biscogniauxia mediterranea*, une maladie du chêne en expansion, est favorisée par des conditions arides plus fréquentes

(Vannini *et al.*, 2009). En revanche, Bortolami *et al.* (2021) ont montré que si la sécheresse supprimait complètement les symptômes foliaires de l'esca, maladie vasculaire de la vigne, l'esca et la sécheresse modifiaient de manière distincte le transport de l'eau et le bilan carboné de la plante. Cet exemple révèle la complexité et l'imprévisibilité des interactions de stress supposées être à l'origine de la mortalité des plantes. Les conditions environnementales peuvent également altérer la résistance des plantes, comme l'ont constaté Desaint *et al.* (2021), montrant que la plupart des résistances identifiées sont moins efficaces sous l'effet de l'élévation de la température, quel que soit l'espèce végétale ou l'agent pathogène. Dans le cas du colza, la résistance au phoma est réduite en cas d'augmentation des précipitations pendant la phase de colonisation foliaire du champignon à l'automne, ou d'augmentation de la température pendant le stade de développement de nécroses à la base des tiges (Huang *et al.*, 2018).

En jouant sur la dynamique de croissance et de développement des plantes cultivées, l'évolution du climat modifie non seulement l'habitat et les ressources trophiques pour les bioagresseurs, mais également le synchronisme entre la culture hôte et son bioagresseur. Ces effets indirects peuvent s'avérer décisifs pour le développement du bioagresseur lorsque ce dernier attaque la culture à des stades phénologiques particuliers, comme le débourrement (pour l'éclosion des œufs du puceron du pommier, voir Miñarro et Dapena, 2014) ou la floraison (pour la contamination de l'abricotier par la moniliose, voir Tresson *et al.*, 2020), ou des organes particuliers comme les épis de céréales par la fusariose (Buerstmayr *et al.*, 2020). Lorsque des processus de compétition pour les ressources du milieu sont en jeu, comme dans le cas des cultures et des adventices (ou au sein de la flore adventice), les décalages phénologiques peuvent donner l'avantage aux individus dont le développement est le plus précoce (Forcella *et al.*, 2000; Fahad *et al.*, 2015).

L'adaptation des systèmes cultivés au changement climatique redessine les pratiques culturelles et leurs effets sur les bioagresseurs. En premier lieu, des cultures moins sensibles aux stress hydriques et thermiques sont peu à peu introduites dans les rotations. Or, la diversité des cultures, au regard des familles botaniques et des saisons de semis, influence fortement la diversité et la nuisibilité de la flore adventice (Adeux *et al.*, 2019; Weisberger *et al.*, 2019). Par ailleurs, l'évitement des périodes de forts stress abiotiques (vagues de chaleur, sécheresses) consiste à décaler le cycle cultural en avançant les semis ou en choisissant des variétés plus précoces. Cette stratégie influence le synchronisme entre le cycle cultural et le développement des bioagresseurs, réduisant ou au contraire élargissant les périodes potentielles d'attaque ou de compétition (Tresson *et al.*, 2020; Van de Wouw *et al.*, 2021). Les semis précoces, notamment des cultures d'hiver, favorisent les adventices, les pucerons et certains champignons telluriques comme le piétin-verse des céréales (*Pseudocercospora herpotrichoides*). Les semis tardifs laissent ainsi plus de temps aux semences adventices pour germer en interculture et pour les détruire par le travail du sol, réduisant ainsi le potentiel infestant du sol pour les cultures à venir (Colbach et Saur, 1998; Lutman *et al.*, 2013). Dans ce cas, l'effet bénéfique du semis tardif peut être amplifié par des opérations de faux semis, par exemple du travail du sol visant à déclencher des germinations de semences adventices pour réduire le stock semencier restant. L'efficacité de cette technique dépend cependant fortement de l'humidité du sol au moment de l'opération (Labreuche *et al.*, 2020), et risque de diminuer avec l'augmentation des sécheresses estivales liée au changement climatique.

Ces stratégies sont également susceptibles de décaler le moment où, dans le cas où des techniques de biocontrôle sont appliquées, les ennemis naturels (prédateurs et parasitoïdes) sont libérés pour réguler les populations de ravageurs (Nicot *et al.*, 2019; O'Sullivan *et al.*, 2021). L'apport de ressources complémentaires est une deuxième stratégie utilisée. Par exemple, l'usage plus fréquent de l'irrigation pour faire face aux épisodes de sécheresse favorise la levée des adventices en culture, l'infection par les champignons pathogènes en augmentant l'humidité dans le couvert et/ou la dispersion de certaines propagules *via* les gouttelettes d'eau au sein du couvert. L'irrigation peut également faciliter le maintien d'un couvert vivant pendant l'intersaison susceptible d'assurer la survie des agents pathogènes biotrophes (Bradshaw *et al.*, 2022). De même, l'ajustement de la fertilisation en azote et en phosphore (Lekberg *et al.*, 2021), pour tenir compte des besoins croissants de la culture dans une atmosphère plus riche en CO₂, pourrait favoriser les bioagresseurs dépendants de la nutrition azotée de leur hôte (Robert *et al.*, 2004; Précigout *et al.*, 2020), ou de la disponibilité en azote du sol (Moreau *et al.*, 2014). Au-delà de la zone cultivée, les pratiques de contrôle biologique par conservation, qui consistent à créer des zones de refuge aux abords des cultures (management des zones interculturelles, des bandes enherbées, de l'agroforesterie, etc.), bénéficient souvent aux prédateurs naturels des ravageurs de culture (Griffiths *et al.*, 2008) ou des adventices (Petit *et al.*, 2023). Les températures plus basses et moins variables dans ces zones refuges préservent la fécondité de ces ennemis naturels, en limitant la perte des réserves nécessaires au maintien de l'activité métabolique basale durant la survie hivernale (Griffiths *et al.*, 2008).

En outre, les interactions entre la plante et l'environnement façonnent les microbiomes végétaux, activant les voies de défense et l'immunité de la plante (Pélassier *et al.*, 2021). Ainsi la réponse des plantes à la sécheresse ou à d'autres stress abiotiques *via* les exsudats racinaires induit le recrutement de microbes bénéfiques facilitant la repousse de la végétation après la levée du stress (Williams et de Vries, 2020). Cette modification de la composition, de l'abondance et du fonctionnement du microbiome module la réponse immunitaire de la plante *via* des modes de communication chimiques entre la plante et son microbiome (Trivedi *et al.*, 2022). Enfin, les besoins en ressources du microbiome peuvent se superposer à ceux de l'agent pathogène, limitant potentiellement l'infection ou l'invasion, en stoppant le cycle du bioagresseur (Wei *et al.*, 2015). Ces recherches sur le microbiome des plantes (souterrain comme aérien) sont relativement récentes, mais leur importance dans la réponse de l'écosystème aux variations environnementales suggère de le prendre explicitement en compte comme un axe supplémentaire du triangle épidémique (Bernardo-Cravo *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2023). La relation entre les insectes ravageurs et les virus des plantes génère également des effets indirects parfois subtils. Le virus de la jaunisse nanisante de l'orge, par exemple, induit une meilleure résistance à la chaleur chez son puceron vecteur, contribuant à une dispersion plus importante (Porras *et al.*, 2020). Le changement climatique bouleverse également le fonctionnement physiologique des vecteurs, des ennemis naturels ainsi que des autres bioagresseurs qui interagissent par le biais de phénomènes de compétition ou de commensalisme (comme dans le cas des fourmis défendant certaines espèces de pucerons dans les vergers de pommiers contre les prédateurs et les parasitoïdes).

Insectes et ravageurs

La distribution géographique des insectes ravageurs évolue de façon marquée sous l'influence du changement climatique. Une forte expansion vers les pôles de la plupart

des ravageurs, et en particulier des lépidoptères, acariens, diptères et coléoptères, a été identifiée avec une avancée de presque 3 km/an en moyenne (Bebber *et al.*, 2013). Cette avancée spectaculaire, combinée avec l'introduction de nouveaux ravageurs *via* le transport de marchandises par exemple, implique une distribution généralisée de la plupart des ravageurs, avec environ 10% des espèces nuisibles ayant déjà colonisé plus de la moitié des pays cultivant leur plante hôte (Bebber *et al.*, 2014). D'ailleurs, on prédit déjà un grand nombre d'espèces potentiellement nuisibles pour nos cultures, mais encore non observées dans la plupart des pays émergents, comme la Chine, l'Inde et le Brésil (Bebber *et al.*, 2019). Toutefois, la sévérité des dégâts générés par ces insectes ravageurs n'évolue pas nécessairement dans le même sens que leur expansion inquiétante. La réponse de ces insectes au réchauffement doit se lire au travers de plusieurs facettes : leur expansion géographique, la dynamique des populations ou encore leur position dans les réseaux trophiques. Tandis que la plupart des ravageurs induisent bel et bien des effets sévères sur les plantes cultivées avec le réchauffement, la majorité montre finalement des réponses plutôt complexes et mitigées — si bien que la sévérité d'un insecte ravageur peut aussi bien augmenter ou diminuer avec le réchauffement selon le contexte agroécologique, trophique et climatique (Lehmann *et al.*, 2020).

Le réchauffement induit généralement des périodes de croissance plus longues et des hivers plus courts. Cela a pour conséquence des changements phénologiques permettant un plus grand nombre de générations dans l'année pour les espèces dites multivoltines, comme le carpocapse (*Cydia pomonella*) sur le pommier pour lequel l'apparition d'une troisième génération larvaire deviendrait courante dans les régions du sud de la Suisse à l'horizon 2050, alors qu'elle est extrêmement rare dans les conditions climatiques actuelles (Hirschi *et al.*, 2012). Un plus grand nombre de générations dans l'année permet une croissance populationnelle accrue.

La grande diversité des réponses au changement climatique des insectes ravageurs est connectée de manière générale à la forte variabilité des traits de tolérance et de performance de ces insectes (Ma *et al.*, 2021). Certains ravageurs montrent une grande capacité d'acclimatation physiologique leur permettant de survivre aux températures extrêmes, comme l'accumulation de polyols (mannitol, sorbitol) chez *Aphis gossypii* ou *Bemisia argentifolii* qui préviennent la dénaturation des protéines par les hautes températures (Hendrix et Salvucci, 1998). De manière générale, il est très probable que le changement climatique imposera une forme de sélection vers les espèces les plus aptes à tolérer ou à résister aux fortes chaleurs (Ma *et al.*, 2021), ce qui peut exacerber la nature invasive de certaines espèces capables de convertir cet avantage sélectif en une démographie exponentielle (Nyamukondiwa *et al.*, 2010). Cette règle n'est toutefois probablement pas universelle, en particulier pour les ravageurs qui sont aujourd'hui plutôt contraints par la partie hivernale de leur cycle de vie. Par exemple, *Drosophila suzukii*, un ravageur majeur des productions fruitières, profite certainement des hivers plus doux pour s'installer durablement dans des régions autrefois trop froides par rapport à son seuil de tolérance (Tarapacki *et al.*, 2021).

Micro-organismes pathogènes

Tout comme les insectes ravageurs, la répartition géographique de nombreux agents pathogènes continue d'évoluer (Bebber *et al.*, 2013) en suivant l'extension de leurs niches climatiques vers de plus hautes latitudes. Cette évolution est étroitement contrainte

ou favorisée par leur dispersion naturelle ou par le biais des transports commerciaux. Les phénomènes météorologiques extrêmes, amenés à être plus intenses et fréquents, favorisent ainsi la propagation des agents pathogènes, comme ce fut le cas de la rouille du soja introduite aux États-Unis par un ouragan (Fones *et al.*, 2020). Si des agents pathogènes s'installent sur de nouveaux territoires, c'est également à la faveur d'une évolution de l'occupation des sols qui mettrait en place un habitat favorable à leur survie, à leur développement et à leur reproduction.

Des hivers plus doux favorisent la survie hivernale de nombreux micro-organismes; ainsi, la bactérie *Xylella fastidiosa* responsable de la maladie de Pierce sur la vigne voit son aire de distribution en Europe potentiellement s'étendre (Godefroid *et al.*, 2022). Les champignons pathogènes montrent un étalement de la maturation des ascospores au printemps (Lagarde, 1988). Des humectations printanières associées à des températures plus élevées augmentent quant à elles le risque de contamination fongique comme dans le cas de la tavelure du pommier (Brun *et al.*, 2022). L'accélération des cycles par le réchauffement climatique facilite l'apparition de nouvelles souches dans les populations d'agents pathogènes susceptibles de contourner les résistances variétales (Singh *et al.*, 2023).

Le changement climatique influence également la dynamique des populations et le potentiel adaptatif des bioagresseurs en réponse à l'hétérogénéité thermique (Boixel *et al.*, 2022). L'évolution de l'humidité et du régime des pluies est toutefois plus incertaine et hétérogène que celle des températures. Or, pour nombre de bioagresseurs, l'humidité de l'air, dans le couvert ou dans le sol, détermine la réalisation d'étapes clés de leur cycle de vie (dispersion et infection). On peut s'attendre dans certains cas à ce que les effets potentiellement bénéfiques d'une hausse des températures soient amoindris, voire annihilés par un régime plus sec (Launay *et al.*, 2014).

En réponse aux stress abiotiques plus intenses et plus fréquents, mais également à de nouvelles opportunités climatiques, les pratiques culturales et les systèmes de culture, voire la structuration des paysages dans une perspective agroécologique (Vialatte *et al.*, 2021), sont à même d'évoluer et d'interférer sur l'évolution du risque sanitaire. Ainsi, une incidence accrue de fusariose du blé pourrait résulter de l'opportunité future de cultiver du maïs en Écosse, les débris de maïs favorisant la survie de l'inoculum (Skelsey et Newton, 2015). Le choix des espèces et des variétés cultivées pourrait répondre à la nécessité de maintenir une production stable et résiliente face aux événements climatiques pénalisants (sécheresses, vagues de chaleur, etc.), en présentant toutefois des effets sur le risque sanitaire *via* les résistances variétales mises en œuvre et les caractères plus ou moins favorables des habitats combinés spatialement et successivement (Papaïx *et al.*, 2014; Xu, 2011).

Enfin, certains champignons phytopathogènes produisent dans les tissus infectés des mycotoxines très dommageables à la santé humaine; leur teneur à la récolte est fortement réglementée (Eskola *et al.*, 2020). Parmi les mycotoxines les plus communes, le déoxynivalénol (ou DON) est produit par un complexe d'espèces de champignons phytopathogènes qui contaminent aujourd'hui 60% à 80% des cultures, au-delà des seuils sanitaires européens dans 5% à 10% des cas (Johns *et al.*, 2022). Leur production est très dépendante d'une part des conditions climatiques (température, pluviométrie et humidité), par exemple pour l'infection à la floraison par *Fusarium graminearum*, l'espèce la plus fréquente et, d'autre part, des

pratiques culturales (gestion des précédents et résidus de culture, travail du sol, date de récolte, etc.) qui affectent fortement l'inoculum primaire et la phénologie de la culture (Roucou *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023). Entre 2010 et 2019, Johns *et al.* (2022) montrent déjà une augmentation de la concentration de DON aux faibles latitudes européennes, avec des cocontaminations plus fréquentes par plusieurs toxines. Différents modèles de prédictions statistiques à semi-mécanistes simulent une augmentation générale des mycotoxines des grains de céréales avec le changement climatique (Liu et Van der Fels-Klerx, 2021). Par ailleurs, si la faisabilité de la culture du maïs se déplace vers le nord à l'horizon 2050, cela s'accompagnerait d'une diminution du risque de mycotoxines avec la latitude (Focker *et al.* 2023). *In fine*, le changement climatique va non seulement modifier de manière directe les épidémies des différentes espèces du complexe fusarien et la production des mycotoxines associées, mais également de manière indirecte l'aire de répartition des cultures et des pratiques culturales.

Adventices

L'observation des effets du changement climatique sur les adventices, et notamment sur l'évolution des aires de répartition des adventices, est délicate, car les effets des systèmes de culture brouillent les relations entre les traits des espèces et le climat (Bourgeois *et al.*, 2021). La littérature propose essentiellement des pronostics basés sur la biologie des espèces et sur les changements climatiques attendus. Les effets du changement climatique sur les adventices sont ainsi classés en trois catégories de déplacements se produisant à différentes échelles : déplacements (1) de l'aire de répartition à l'échelle du paysage, (2) de la niche à l'échelle de la communauté, et (3) des traits des espèces individuelles à l'échelle de la population (Peters *et al.*, 2014).

Des hivers plus humides et plus doux sont susceptibles d'augmenter la survie de certaines adventices annuelles hivernales, tandis que les étés plus chauds et les saisons de croissance plus longues devraient permettre aux adventices estivales et thermophiles de pousser dans des régions plus au nord (Bloomfield *et al.*, 2006; Walck *et al.*, 2011; Hanzlik et Gerowitz, 2012). Avec le changement climatique, les fluctuations saisonnières du climat local sont susceptibles de se produire plus fréquemment et avec des amplitudes plus importantes (voir chapitre 1). Les adventices présentant une faible plasticité phénotypique face à ces fluctuations sont susceptibles de décliner (Peters *et al.*, 2014). Contrairement aux maladies, il y a peu de preuves empiriques que des températures plus élevées augmentent l'implantation de plantes invasives en raison de la durée de survie des semences dans le sol (Hulme, 2017). Toutefois, il existe de rares exceptions comme celle du suivi de levées d'une espèce adventice (*Avena fatua* L., folle-avoine en Argentine) sur une période de trente ans sur un site : l'effet combiné d'une réduction de la fréquence des précipitations et de la température minimale moyenne est corrélé avec une augmentation de l'échelonnement des levées (Renzi *et al.*, 2022).

Par ailleurs, des expérimentations consacrées à l'étude des effets isolés ou combinés de la température et de la concentration atmosphérique en CO₂ sur la croissance des adventices, ou des études mobilisant des modèles, permettent de consolider des hypothèses sur l'évolution des adventices sous l'effet du changement climatique (Renzi *et al.*, 2022).

► Comment étudier un phénomène qui n'a pas encore eu lieu ?

L'anticipation des effets du changement climatique sur les systèmes de culture nécessite non seulement une bonne compréhension des mécanismes en jeu au sein de ce triangle épidémique, comme expliqué ci-dessus, mais également de développer et d'appliquer des outils prédictifs. La modélisation de manière générale doit donc jouer un rôle primordial dans notre capacité à prédire les dynamiques des différentes catégories de bioagresseurs. L'apport des données expérimentales reste évidemment irremplaçable pour générer des hypothèses de travail ou pour estimer des vulnérabilités, mais aussi pour le paramétrage des modèles prédictifs.

Outils et méthodes

Utiliser les données expérimentales pour estimer le risque à venir

De manière générale, des données expérimentales sont souvent à la base de la construction de modèles statistiques permettant d'estimer la dynamique du bioagresseur dans de nouvelles conditions. Par exemple, des données expérimentales peuvent être utiles pour estimer le risque lié aux bioagresseurs des cultures. En effet, ces données permettent de construire des courbes de réponse aux conditions climatiques. Ce type de travail a été réalisé dans le cas de la rouille jaune du blé (de Vallavieille-Pope *et al.*, 2018) (figure 8.5). Des courbes de réponse ont été ajustées à des données d'expérimentations en conditions contrôlées afin de décrire l'impact de la température sur l'efficacité d'infection. L'efficacité d'infection a ensuite été calculée à partir de données de température passées, actuelles et futures.

De la même manière, on peut calculer un temps hydrothermique nécessaire à la levée des adventices après une pluie ou après un travail du sol. Pour ce faire, on établit des courbes de réponse à la température (voir figure 8.4) et au potentiel hydrique du sol pour la germination et la croissance en prélevée de chaque espèce (Gardarin *et al.*, 2012).

Plus généralement, l'utilisation d'indicateurs de risque construits à partir de données actuelles peut être intéressante. Une limite de ces approches est qu'elles supposent un comportement inchangé des populations de ravageurs dans les nouveaux climats, alors que l'on sait que des adaptations sont possibles. Enfin, ces courbes et ces indicateurs individuels ne permettent d'évaluer ni l'ensemble du cycle des bioagresseurs ni les effets combinés du climat et du système de culture. Pour cela, les informations sur les processus et sur les variables individuelles doivent être agrégées dans des modèles plus complexes.

Utiliser des modèles prédictifs

Un modèle prédictif est un outil particulièrement intéressant pour anticiper la dynamique d'un bioagresseur dans des conditions climatiques qui sont attendues dans le futur. Les courbes de réponse expérimentales mentionnées ci-dessus peuvent servir de base à la construction de modèles statistiques (ou corrélatifs) dont l'intérêt réside dans le relativement faible besoin de données d'entrée, à l'inverse des modèles mécanistes qui nécessitent un grand effort de paramétrisation, mais qui ont l'avantage d'aider à la compréhension des processus en jeu. Nous présentons ci-dessous une sélection d'exemples utilisant ces deux types de modélisation.

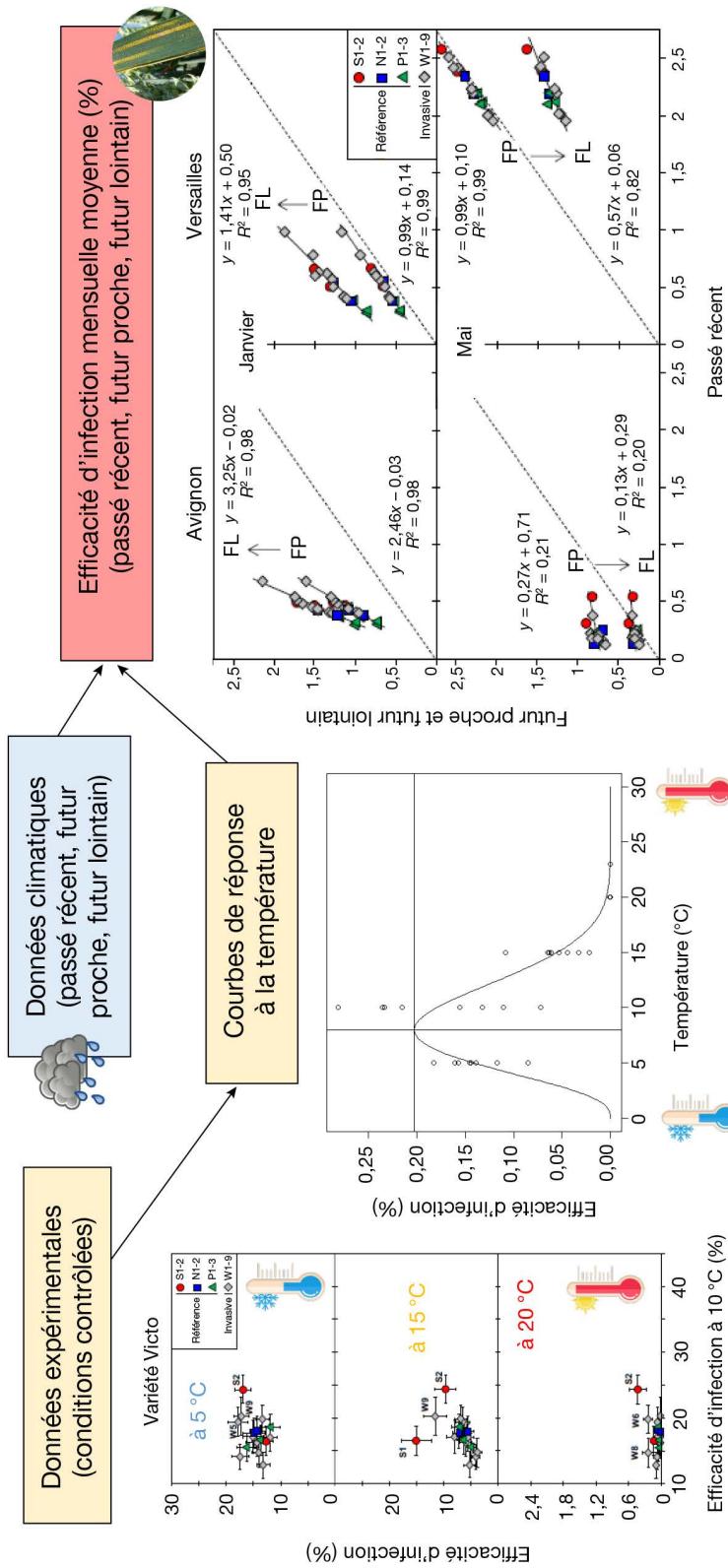


Figure 8.5. Exemple de réponse de l'efficience d'infection d'un champignon pathogène (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, agent de la rouille jaune du blé) à la température et traduction en courbe de réponse pour la projection de l'évolution des risques d'infection dans un climat futur. Source : d'après de Vallavielle-Pope *et al.* (2018).

Prédiction de la phénologie de l'abricotier limitant le risque futur de moniliose

Un indicateur de risque a ainsi été construit sur la base d'expérimentations menées en vergers, pour anticiper les épidémies de moniliose de l'abricotier. Cette maladie est due à un champignon, *Monilinia laxa* ou *Monilinia fructicola*, qui attaque principalement les pétales de fleurs d'abricotiers durant la courte période de la floraison. En s'appuyant sur les fonctions de réponse de ce champignon pathogène à la température (pour l'infection) et à la pluie (pour la dispersion et l'infection), un indicateur de risque a été calculé à partir des événements pluvieux et de la température ambiante durant la phase de floraison de l'arbre (Tresson *et al.*, 2020) (figure 8.6). Cet indicateur de risque (modèle corrélatif) a été mis en œuvre pour des scénarios climatiques futurs, en intégrant l'effet du réchauffement climatique sur le positionnement calendaire de la phase de floraison. On a ainsi montré que, pour des variétés précoces, la phase de floraison serait soumise à un climat plus chaud et plus sec, réduisant le risque d'infection par la moniliose. En revanche, pour des variétés plus tardives, l'avancée de la floraison est telle que le climat serait plus froid et tout aussi pluvieux, maintenant le risque d'épidémie pour ces variétés.

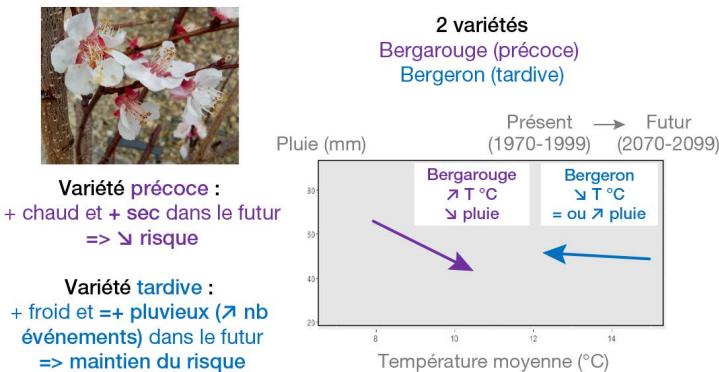


Figure 8.6. Évolution des risques de moniliose durant la floraison des abricotiers, en fonction du choix de précocité variétale. Source : figure adaptée de Tresson *et al.* (2020).

Prédiction du déplacement des aires d'extension d'une adventice

Afin de prédire les futures aires de répartition en Grande-Bretagne et les pertes de rendement en blé dues au vulpin (*Alopecurus myosuroides* Huds., adventice graminée automnale très fréquente et nuisible aussi en France), des simulations mécanistes ont été faites avec le modèle Sirius 2010 qui simule la croissance et la dynamique de populations de blé et de vulpin en fonction des conditions de température, d'humidité et de CO_2 (Stratonovitch *et al.*, 2012). Les scénarios climatiques à l'échelle locale ont été générés à l'aide de Lars-WG et basés sur les projections HadCM3 pour les périodes 2046-2065 et 2080-2099.

Les résultats des simulations ont montré :

- un possible déplacement vers le nord de l'aire de répartition de la graminée adventice (figure 8.7). Les paramètres phénologiques, notamment le temps thermique nécessaire pour atteindre la maturité, limitent actuellement la propagation de l'adventice vers le nord;

– une plus faible perte de rendement du blé due à l'adventice avec le changement climatique (figures 8.7 et 8.8). L'équilibre concurrentiel a été modifié en faveur de la culture dont les racines seraient plus profondes, en particulier sur des sols plus légers, en raison des sécheresses plus fréquentes et plus sévères.

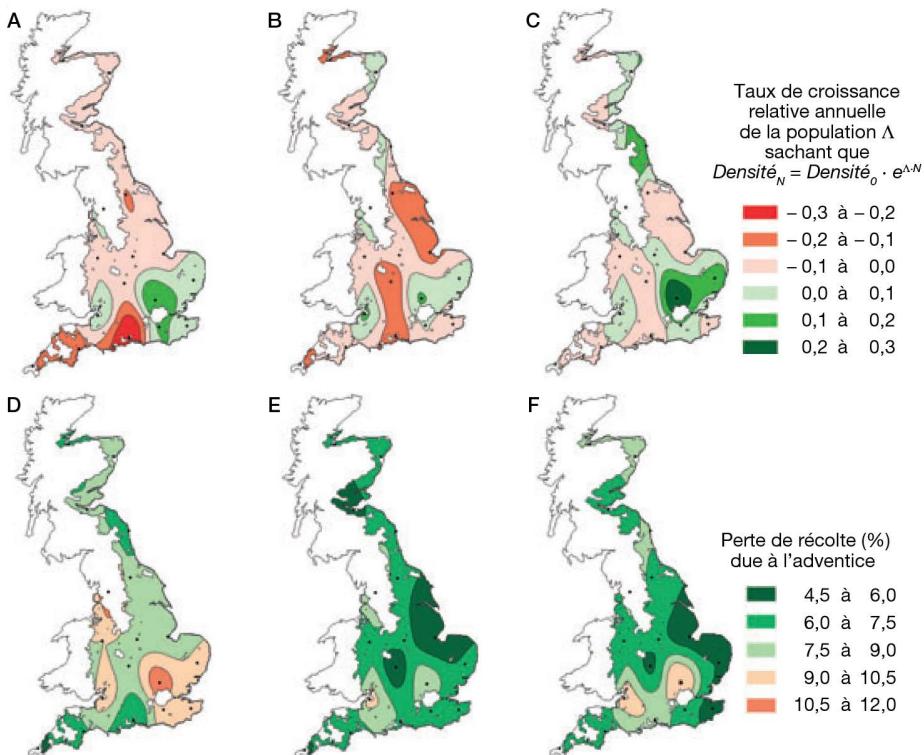


Figure 8.7. Déplacement de l'aire de répartition du vulpin (A-C) et pertes de rendement du blé en découlant (D-F) pour le climat historique (A, D), 2046-2065 (B, E) et 2080-2099 (C, F). Résultats de Sirius 2010 pour dix-huit sites interpolés à travers le Royaume-Uni. Source : d'après Strattonovitch *et al.* (2012).

Sur tous les sites, l'adventice et la culture lèvent quelques jours plus tôt avec le changement climatique. La date de levée de l'adventice est bien plus variable que celle de la culture. Blé et vulpin mûrissent quelques semaines plus tôt en cas de changement climatique.

Prédition des taux de mortalité d'un ravageur en intégrant le microclimat

La mineuse tentiforme (*Phyllonorycter blancarella*) attaque le feuillage du pommier en créant des mines, des sortes de galeries creusées entre le parenchyme et l'épiderme de la feuille au cours du nourrissage. En se développant au sein des tissus foliaires, la chenille génère et subit un microclimat bien distinct des conditions climatiques au sein du couvert. Plus précisément, la température au sein de la mine peut dépasser la température ambiante de 10°C à 15°C lorsque la feuille est exposée aux radiations solaires. Ce réchauffement est lié directement à une plus forte absorbance de l'énergie solaire dans le proche infrarouge et à une fermeture stomatique dans les tissus minés

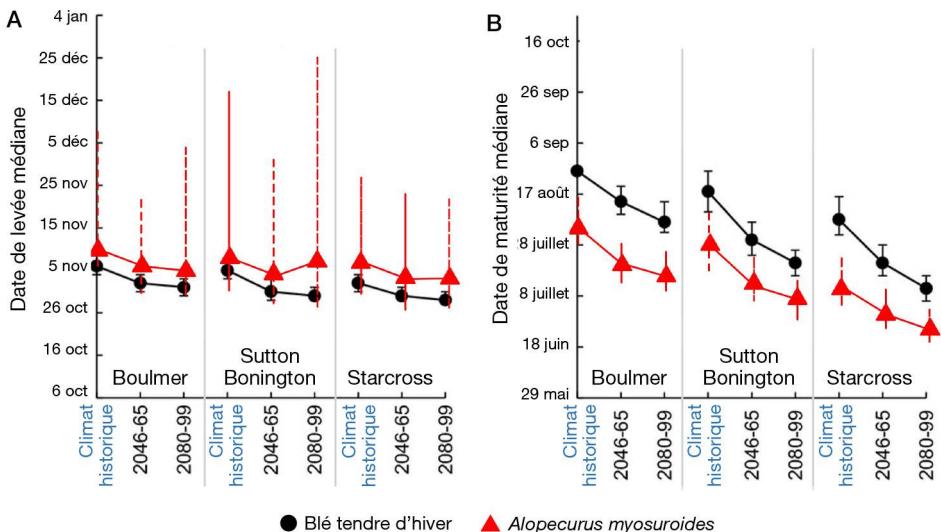


Figure 8.8. Impact du changement climatique sur la phénologie du blé et d'*Alopecurus myosuroides* pour trois sites sélectionnés représentant le gradient climatique nord-sud au Royaume-Uni : Boulmer ($1^{\circ}36'W - 55^{\circ}25'N$), Sutton Bonington ($1^{\circ}13'W - 52^{\circ}49'N$) et Starcross ($3^{\circ}27'W - 50^{\circ}37'N$). Source : d'après Strattonovitch *et al.* (2012).

Le jour médian de levée et de maturité pour chaque site et chaque période est représenté par des barres représentant le percentile de 95 % dérivé des 1 500 simulations annuelles pour chaque période.

(Pincebourde et Casas, 2006). Cet insecte a un seuil de tolérance à la température assez élevé (Pincebourde et Casas, 2015). Toutefois, il pourrait subir plus fortement les vagues de chaleur et le réchauffement graduel sur le long terme. Des modélisations mécanistes intégrant les échanges de chaleur entre la mine et son micro-environnement (modèles biophysiques) démontrent que (1) des taux de mortalité significatifs sont attendus pour l'horizon 2100 seulement, en se basant sur l'utilisation du modèle écophysiologique RATP, basé sur le scénario A1B du Giec (Saudreau *et al.*, 2013) et intégrant donc uniquement le réchauffement graduel, et que (2) la mineuse reste toutefois extrêmement vulnérable aux vagues de chaleur, car son microclimat la constraint à se rapprocher dangereusement de son seuil de tolérance dès lors que la température ambiante dépasse les $33^{\circ}C$ en région Centre en France (Pincebourde et Casas, 2019). Cette approche de modélisation biophysique de la température des microhabitats permet donc de mettre en lumière que les événements extrêmes devraient avoir bien plus d'impact sur les ravageurs que le réchauffement sur le long terme.

Vers une approche holistique prédictive ?

Les modèles dont nous disposons, qu'ils soient corrélatifs ou mécanistes, ne permettent pas en général de prédire de manière concomitante les dynamiques épidémiques, la nuisibilité, les rétroactions du couvert malade sur les épidémies, les interactions entre plusieurs bioagresseurs, ni celles avec les ennemis naturels. Certains modèles tentent de prendre partiellement en compte cette complexité, se focalisant sur les interactions fines entre la plante hôte et un bioagresseur donné (Garin *et al.*, 2014; Caubel *et al.*, 2017; Vidal *et al.*, 2018). D'autres considèrent plusieurs bioagresseurs

simultanément pour en déduire une nuisibilité globale (Dionisi *et al.*, 2023; Aubertot *et al.*, 2013; Willocquet *et al.*, 2002; Willocquet *et al.*, 2008; Pinnschmidt *et al.*, 1995), et simulent l'impact des pratiques sur le risque sanitaire (Aubertot et Robin, 2013) ou sur le déplacement spatial des individus de bioagresseurs et/ou d'ennemis en fonction de l'arrangement spatial du système cultivé (Collard *et al.*, 2018).

Considérer un système complexe et dynamique

Dans la partie précédente, les expérimentations et les modèles qui en découlent se focalisent sur des phases clés du pathosystème pour prédire un risque sanitaire. Mais étant donné la déformation du pathosystème avec l'évolution du climat, ces indicateurs de risque validés par le passé pourraient ne pas être pertinents pour projeter un risque futur. La question se pose donc de considérer au mieux l'ensemble des processus et des interactions en jeu (complexe), ainsi que leur évolution dans le temps (dynamique), de manière à anticiper des situations sanitaires auxquelles l'agriculture devra faire face dans les décennies à venir. Cette partie s'appuie sur des études récentes pour illustrer une approche plus systémique de la question.

Exemple d'interaction entre un système de culture et le changement climatique, et conséquences pour les services et dysservices liés à la flore adventice

Pour tester la robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices, le changement climatique a été abordé par une approche de simulations climatiques régionalisées (Cavan *et al.*, 2020). Des systèmes de culture existants et prospectifs (conçus par des ateliers de coconception impliquant des agriculteurs) ont été comparés en matière de gestion de la flore adventice et de son impact sur la production agricole et sur la biodiversité, avec deux scénarios de climats futurs régionalisés à l'échelle locale depuis les trajectoires de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5). Pour cela, 44 systèmes de cinq régions ont été simulés avec le modèle de dynamique de la flore adventice FlorSys (Colbach *et al.*, 2021). Ces systèmes diffèrent notamment au regard des rotations, de l'intensité de travail du sol et de l'usage d'herbicides.

Les travaux de Cavan *et al.* (2020) montrent qu'en cas de changement climatique, la perte de rendement due aux adventices augmente globalement en grandes cultures (figure 8.9). Avec le climat historique, la biomasse adventice était plus faible que la biomasse cultivée dans la plupart des systèmes de culture analysés. Ensuite, pendant la première moitié du XXI^e siècle, la biomasse adventice dépassait la biomasse cultivée dans environ la moitié des systèmes simulés, indépendamment de la trajectoire climatique utilisée. L'augmentation de la perte de rendement est bien plus forte pendant la deuxième moitié du siècle où la biomasse adventice dépasse la biomasse cultivée dans l'ensemble des systèmes, avec une augmentation significativement plus élevée pour la trajectoire climatique la plus pessimiste, c'est-à-dire le scénario RCP8.5.

L'augmentation de la nuisibilité des adventices due au changement climatique s'accompagne d'une augmentation d'offre trophique à la faune sauvage, surtout pendant la seconde moitié du siècle (flèches proches sur la figure 8.10B), mais pas de la biodiversité végétale (flèches orthogonales). Pendant la première moitié du siècle, l'augmentation de la température maximale pendant cette même période est fortement corrélée à l'augmentation de la richesse spécifique. Les plus fortes températures favorisent l'installation

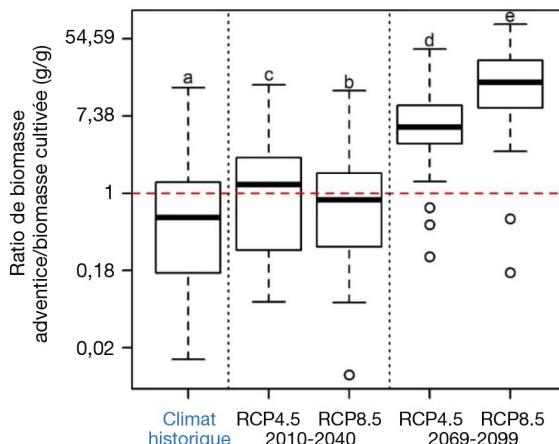


Figure 8.9. Évolution de la nuisibilité de la flore adventice pour la production simulée avec FlorSys en cas de changement climatique, en fonction de la trajectoire de changement (RCP4.5 ou RCP8.5) et de l'horizon temporel (première ou deuxième moitié du xxie siècle). Source : d'après Cavan *et al.* (2020).

Les boîtes à moustaches montrent un proxy de la perte de rendement en grains due aux adventices, en moyenne sur la rotation. Les moyennes des boîtes superposées des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à $p = 0,05$.

d'adventices printanières et estivales aux dépens des espèces hivernales. Ces dernières étaient jusqu'à présent dominantes, grâce à leur période de croissance plus longue, mais leur photosynthèse est maintenant plus fréquemment limitée par la chaleur. Pour la deuxième moitié du siècle, Cavan *et al.* (2020) montrent que l'augmentation de la température, combinée à une plus forte évapotranspiration (ETP69-99) et à une plus faible précipitation (P69-99), conduit à une réduction de la nuisibilité des adventices pour la production des cultures, mais aussi de leur contribution à nourrir la faune sauvage. En effet, ces conditions assèchent le sol, ce qui limite la levée des adventices. C'est particulièrement le cas pour les adventices printanières et estivales qui ont généralement un besoin plus élevé en eau pour germer et lever (Gardarin *et al.*, 2010).

L'effet du changement climatique sur les adventices peut être modulé par les techniques culturales dès la première moitié du siècle (figure 8.10A). Les techniques qui impactent le plus les adventices, c'est-à-dire les herbicides et le travail du sol, sont aussi celles qui interagissent le plus avec le changement climatique. Ainsi, l'utilisation fréquente et élevée d'herbicides non systémiques (peu efficaces sur des couverts denses) est associée à une forte augmentation de la nuisibilité de la flore adventice avec le changement climatique. En revanche, travailler fréquemment le sol, notamment en été, réduit la richesse spécifique de la flore adventice. Pendant la deuxième moitié du siècle, le très efficace glyphosate (à condition qu'il ne soit pas interdit) et le retard du premier travail du sol (ce qui améliore l'efficacité du faux semis) tendent à réduire cette augmentation de la nuisibilité de la flore (figure 8.10B). La fréquence de cultures d'hiver (surtout si elles sont semées et récoltées tardivement) augmente la nuisibilité des adventices, car ces cultures sont moins adaptées au changement climatique. L'augmentation surprenante du manque de résilience en cas de travail du sol indique que le travail du sol est probablement moins efficace (le faux semis n'étant efficace que sur un sol humide) et son effet, plus imprévisible dans un contexte de changement climatique.

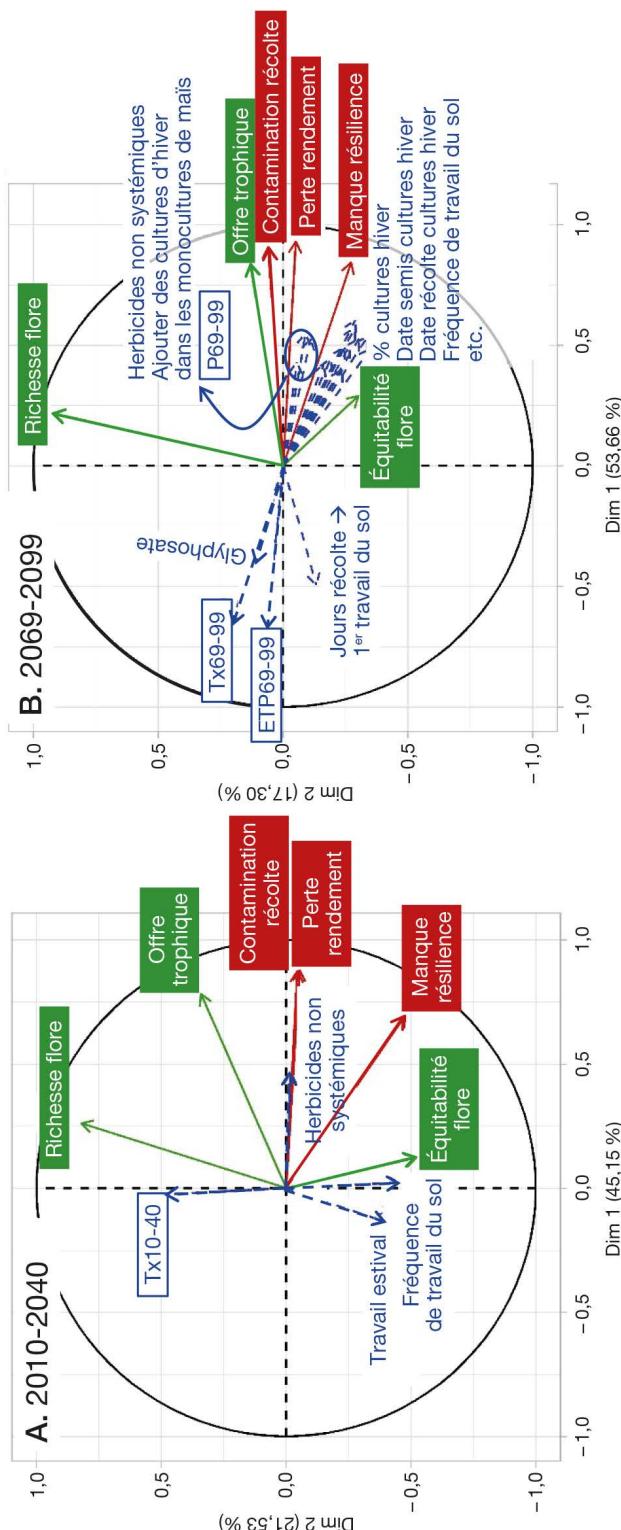


Figure 8.10. Effet du changement climatique (trajectoire RCP8.5) sur l'impact de la flore adventice sur la production (perte de rendement en grains, contamination de récolte par des semences/débris adventices, manque de résilience spécifique de la flore, équabilité de la flore, offre trophique pour oiseaux, carabes et polliniseurs), sur la période 2010-2040 (A) et sur la période 2069-2099 (B). Source : figure basée sur Cavan *et al.* (2020).

Analyse en composantes principales (ACP) sur la différence entre les valeurs des indicateurs des simulations sous la contrainte du changement climatique et avec un climat passé. Les flèches bleues représentent des variables supplémentaires décrivant les pratiques culturelles ; et les évolutions principales des variables climatiques entre climat futur et passé sont encadrées (Tx = température maximale; ETP = évapotranspiration maximale; P = précipitations).

Exemples d'interactions entre plusieurs types de bioagresseurs

Le couple plante hôte-bioagresseur, souvent étudié de manière isolée, interagit cependant avec d'autres compartiments vivants de l'écosystème, d'autres bioagresseurs, des auxiliaires et des ennemis naturels, le microbiome, tous très dépendants des conditions locales en matière de pédoclimat et de pratiques culturales.

Ainsi, la présence de graminées adventices dans les intercultures et cultures peut augmenter le risque de maladies des cultures, comme le piétin échaudage des céréales (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*) (Gutteridge *et al.*, 2006). Une étude de simulation réalisée avec la version monospécifique de FlorSys (Mézière *et al.*, 2013) a montré que la présence de la maladie n'a pas modifié la dynamique des graminées adventices hivernales du type vulpin. En revanche, l'incidence de la maladie a considérablement augmenté dans les céréales, en particulier lorsque les cultures non-hôtes antérieures à la rotation étaient infestées de vulpin, notamment dans les systèmes sans travail du sol. Par conséquent, si le changement climatique déplace l'aire d'extension du vulpin, cette extension pourrait aussi s'accompagner d'une augmentation du piétin échaudage en céréales.

Autre exemple, la bactérie *Xylella fastidiosa*, organisme de quarantaine assez généraliste et biotrophe obligatoire pour sa multiplication, nécessite un insecte vecteur pour sa transmission (voir section « Micro-organismes pathogènes » de ce chapitre, p. 199). Cette interaction tripartite obligatoire est donc très dépendante des interactions deux à deux pour la réussite de l'épidémie, et donc de leurs modifications sous l'effet du changement climatique (Sicard *et al.*, 2018). Ainsi, l'augmentation des températures accroît généralement le taux d'alimentation et la survie des vecteurs, l'apparition des symptômes, le taux de multiplication et la persistance de la bactérie dans la plante, accélérant potentiellement l'épidémie. Cependant, lorsque les stress hydriques sont également accrus, le résultat de l'interaction tripartite devient plus incertain; d'une part, la vitesse de colonisation des vaisseaux de la plante diminue lorsque la concentration en bactérie augmente en raison d'un stress hydrique. D'autre part, les plantes stressées sur le plan hydrique ont des symptômes proches de ceux développés par *X. fastidiosa* et sont contre-sélectionnées par les insectes piqueurs, ce qui limite la transmission de la bactérie. Ces interactions multiples complexifient les prédictions d'évolution géographique de cette maladie.

Exemples d'aspects évolutifs des populations et des individus de bioagresseurs sous la contrainte du changement climatique

Les individus au sein d'une population d'agents pathogènes peuvent répondre de manière différente aux conditions climatiques. Cette diversité leur permet de s'adapter à la variation spatiale et temporelle de leur environnement abiotique. Par exemple, Boixel *et al.* (2022) ont observé que les populations de *Zymoseptoria tritici* (agent de la septoriose du blé) prélevées dans la même parcelle au printemps ont une température optimale moyenne plus élevée que celles prélevées en hiver. Par ailleurs, en étudiant la réponse à la température d'isolats collectés dans différents pays caractérisés par des températures contrastées, ces auteurs ont pu mettre en évidence une relation entre la température optimale moyenne d'une population et la température moyenne du pays d'origine (figure 8.5). Dans une expérimentation

en conditions contrôlées, Boixel (2020) a montré une augmentation de la fréquence des isolats adaptés au froid dans un régime froid et de la fréquence des individus adaptés au chaud dans un régime chaud. Les individus les plus performants dans un environnement donné sont ainsi sélectionnés, donnant lieu à une adaptation à l'échelle de la population. Si les populations de *Z. tritici* sont connues pour leur niveau de diversité élevé, des observations similaires ont également pu être réalisées sur des populations moins diversifiées. Par exemple, El Amil *et al.* (2022) ont montré la diversité d'aptitude thermique chez des populations méditerranéennes de *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (à l'origine de la rouille jaune du blé). Chez le même agent pathogène, les résultats de Vidal *et al.* (2022) ont suggéré que la diversité de réponse à la température au sein du groupe génétique PstS7 (de Vallavieille-Pope *et al.*, 2018) pourrait expliquer son expansion en France et son remplacement de populations qui étaient auparavant adaptées aux conditions chaudes pour certaines et froides pour d'autres (Mboup *et al.*, 2012).

► Conclusion

Malgré les différences et les similitudes entre bioagresseurs, insectes, adventices et micro-organismes, nous proposons un cadre conceptuel commun, le triangle épidémiique, pour rendre compte de l'évolution de la santé des plantes dans un contexte de changement climatique. Si les adventices apparaissent beaucoup plus dépendantes de l'histoire culturelle, l'approche résolument générique adoptée dans ce chapitre a montré l'intérêt d'une synergie entre les communautés de chercheurs étudiant ces trois grands types de bioagresseurs.

L'anticipation de la dynamique des bioagresseurs et de leurs impacts sur les cultures est complexe, due en grande partie à la multitude des facteurs et des traits en jeu. Toutefois, l'angle de vue peut aussi être inversé : ces multiples facteurs et traits représentent tous autant de possibilités, tant biologiques qu'agronomiques, pour influencer le système et pour gérer sa dynamique afin de conserver un bon compromis entre les services d'approvisionnement et de régulation. Face à la complexité de l'agrosystème et à la diversité des bioagresseurs, d'autres approches mobilisant éventuellement expérimentation, enquête, modélisation et sciences participatives sont nécessaires pour appréhender son évolution future en contexte de changement climatique. Des échelles spatiales plus larges sont également nécessaires dans cette approche systémique, de manière à tenir compte des enjeux de production, de préservation de l'environnement, de contrôle sanitaire, dans un cadre de transition agroécologique. En ce sens, des approches dites bio-inspirées devraient apporter des progrès significatifs : la conservation d'une biodiversité importante à une échelle locale ou à l'échelle de la parcelle, en préservant ou en instaurant des systèmes biologiques divers (haies, bocages, bandes enherbées, etc.), doit permettre de répliquer des processus de contrôle naturels par le biais des fonctions écosystémiques telles que la préation et la pollinisation. Cette approche bio-inspirée doit également prendre en compte la nécessaire robustesse des systèmes face aux aléas climatiques plus fréquents et plus intenses. L'exploration des nouvelles combinaisons de facteurs climatiques, agronomiques, mais aussi biologiques, au travers des interactions entre bioagresseurs ou entre bioagresseurs et ennemis naturels s'avère cruciale pour accompagner la transition des agrosystèmes.

► Références

- Adeux G., Munier-Jolain N., Meunier D., Farcy P., Carlesi S., Barberi P. *et al.*, 2019. Diversified grain-based cropping systems provide long-term weed control while limiting herbicide use and yield losses, *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 1-13, <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0587-x>.
- Agrios G.N., 2005. *Plant Pathology*, Elsevier, 952 p.
- Allen P.S., Benech-Arnold R.L., Batlla D., Bradford K.J., 2007. Modeling of seed dormancy, in *Annual Plant Reviews 27: Seed Development, Dormancy and Germination*, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, Royaume-Uni, p. 72-112.
- Aubertot J.-N., Robin M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases, *PLoS ONE*, 8(9), e73202, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>.
- Aubertot J.-N., Thiard J., Zerourou A., 2013. X-PEST, an online generic modelling platform to design models that simulate crop losses as a function of injury profiles and production situations, PURE International Conference, Riva del Garda, Italie, 29 p.
- Aylor D.E., 1999. Biophysical scaling and the passive dispersal of fungus spores: relationship to integrated pest management strategies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(4), 275-292, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00072-6).
- Barrett S.H., 1983. Crop mimicry in weeds, *Economic Botany*, 37(3), 255-282, <https://doi.org/10.1007/BF02858881>.
- Bebber D.P., Ramotowski M.A.T., Gurr S.J., 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world, *Nature Climate Change*, 3(11), 985-988, <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>.
- Bebber D.P., Holmes T., Gurr S.J., 2014. The global spread of crop pests and pathogens, *Global Ecology and Biogeography*, 23(12), 1398-1407, <https://doi.org/10.1111/geb.12214>.
- Bebber D.P., Field E., Gui H., Mortimer P., Holmes T., Gurr S.J., 2019. Many unreported crop pests and pathogens are probably already present, *Global Change Biology*, 25(8), 2703-2713, <https://doi.org/10.1111/gcb.14698>.
- Bernard F., Sache I., Suffert F., Chelle M., 2013. The development of a foliar fungal pathogen does react to leaf temperature!, *The New Phytologist*, 198(1), 232-240, <https://doi.org/10.1111/nph.12134>.
- Bernardo-Cravo A.P., Schmeller D.S., Chatzinotas A., Vredenburg V.T., Loyau A., 2020. Environmental factors and host microbiomes shape host-pathogen dynamics, *Trends in Parasitology*, 36(7), 616-633, <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.04.010>.
- Bloomfield J.P., Williams R.J., Goddy D.C., Cape J.N., Guha P., 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater - A UK perspective, *The Science of the Total Environment*, 369(1-3), 163-177, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.019>.
- Boixel A.-L., 2020. Environmental heterogeneity, a driver of adaptation to temperature in foliar plant pathogen populations?, thèse de doctorat, université Paris-Saclay.
- Boixel A.-L., Chelle M., Suffert F., 2022. Patterns of thermal adaptation in a globally distributed plant pathogen: Local diversity and plasticity reveal two-tier dynamics, *Ecology and Evolution*, 12(1), e8515, <https://doi.org/10.1002/ece3.8515>.
- Bortolami G., Gambetta G.A., Cassan C., Dayer S., Farolfi E., Ferrer N. *et al.*, 2021. Grapevines under drought do not express esca leaf symptoms, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 118(43), e2112825118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2112825118>.
- Bourgeois B., Munoz F., Gaba S., Denelle P., Fried G., Storkey J. *et al.*, 2021. Functional biogeography of weeds reveals how anthropogenic management blurs trait-climate relationships, *Journal of Vegetation Science*, 32(2), e12999, <https://doi.org/10.1111/jvs.12999>.
- Bradshaw C.D., Thurston W., Hodson D., Mona T., Smith J.W., Millington S.C. *et al.*, 2022. Irrigation can create new green bridges that promote rapid intercontinental spread of the wheat stem rust pathogen, *Environmental Research Letters*, 17(11), 114025, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9ac7>.
- Brun L., Parisi L., Pincebourde S., Saudreau M., 2022. L'anticipation des impacts du changement climatique sur les bioagresseurs en arboriculture fruitière, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 319-353.

- Buerstmayr M., Steiner B., Buerstmayr H., 2020. Breeding for Fusarium head blight resistance in wheat – Progress and challenges, *Plant Breeding*, 139(3), 429-454, <https://doi.org/10.1111/pbr.12797>.
- Byrne D.N., Rathman R.J., Orum T.V., Palumbo J.C., 1996. Localized migration and dispersal by the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*, *Oecologia*, 105(3), 320-328, <https://doi.org/10.1007/BF00328734>.
- Caubel J., Launay M., Lannou C., Brisson N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens, *Ecological Modelling*, 242, 92-104, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.012>.
- Caubel J., Launay M., Ripoche D., Gouache D., Buis S., Huard F. *et al.*, 2017. Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop-disease model in a French regional application, *European Journal of Agronomy*, 90, 53-66, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.004>.
- Cavan N., Castel T., Pergaud J., Angevin F., Colbach N., 2020. Et demain ? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique, *Innovations Agronomiques*, 81, 209-225, <https://doi.org/10.15454/fqye-3778>.
- Chaudhary V.B., Aguilar-Trigueros C.A., Mansour I., Rillig M.C., 2022. Fungal dispersal across spatial scales, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 53(1), 69-85, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-012622-021604>.
- Colbach N., Saur L., 1998. Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat, *European Journal of Plant Pathology*, 104(1), 37-48, <https://doi.org/10.1023/A:1008673925979>.
- Colbach N., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2000. Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing, *European Journal of Agronomy*, 13(2), 111-124, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00069-1).
- Colbach N., Busset H., Roger-Estrade J., Caneill J., 2014. Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools, *Soil and Tillage Research*, 138, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.002>.
- Colbach N., Colas F., Cordeau S., Maillet T., Queyrel W., Villerd J. *et al.*, 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management, *Field Crops Research*, 261, 108006, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>.
- Collard B., Tixier P., Carval D., Lavigne C., Delattre T., 2018. Spatial organisation of habitats in agricultural plots affects per-capita predator effect on conservation biological control: An individual based modelling study, *Ecological Modelling*, 388, 124-135, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.09.026>.
- Corredor-Moreno P., Saunders D.G.O., 2020. Expecting the unexpected: factors influencing the emergence of fungal and oomycete plant pathogens, *The New Phytologist*, 225(1), 118-125, <https://doi.org/10.1111/nph.16007>.
- Desaint H., Aoun N., Deslandes L., Vailleau F., Roux F., Berthomé R., 2021. Fight hard or die trying: when plants face pathogens under heat stress, *The New Phytologist*, 229(2), 712-734, <https://doi.org/10.1111/nph.16965>.
- Dionisi M., Aubertot J.-N., Sester M., 2023. Modeling for agroecological protection of rice. A review, *Field Crops Research*, 297, 108933, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108933>.
- Döring T.F., Pautasso M., Finckh M.R., Wolfe M.S., 2012. Concepts of plant health - reviewing and challenging the foundations of plant protection, *Plant Pathology*, 61(1), 1-15, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02501.x>.
- Duru M., 2023. “One Health” revisited to analyse relationships between the environment and the food system, *Environnement, Risques & Santé*, 22(5), 349-357, <https://doi.org/10.1684/ers.2023.1753>.
- El Amil R., Shykoff J.A., Vidal T., Boixel A.-L., Leconte M., Hovmöller M.S. *et al.*, 2022. Diversity of thermal aptitude of Middle Eastern and Mediterranean *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* isolates from different altitude zones, *Plant Pathology*, 71(8), 1674-1687, <https://doi.org/10.1111/ppa.13613>.
- Eskola M., Kos G., Elliott C.T., Hajšlová J., Mayar S., Krska R., 2020. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited ‘FAO estimate’ of 25%, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(16), 2773-2789, <http://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>.

- Fahad S., Hussain S., Chauhan B.S., Saud S., Wu C., Hassan S. *et al.*, 2015. Weed growth and crop yield loss in wheat as influenced by row spacing and weed emergence times, *Crop Protection*, 71, 101-108, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.005>.
- Focker M., van Eupen M., Verweij P., Liu C., van Haren C., van der Fels-Klerx H.J., 2023. Effects of climate change on areas suitable for maize cultivation and aflatoxin contamination in Europe, *Toxins*, 15(10), <https://doi.org/10.3390/toxins15100599>.
- Fones H.N., Gurr S.J., 2017. NO_xious gases and the unpredictability of emerging plant pathogens under climate change, *BMC Biology*, 15(1), 36, <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0376-4>.
- Fones H.N., Bebbert D.P., Chaloner T.M., Kay W.T., Steinberg G., Gurr S.J., 2020. Threats to global food security from emerging fungal and oomycete crop pathogens, *Nature Food*, 1(6), 332-342, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>.
- Forcella F., Benech Arnold R.L., Sanchez R., Ghersa C.M., 2000. Modeling seedling emergence, *Field Crops Research*, 67(2), 123-139, <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0075-0>.
- Forrest J., Miller-Rushing A.J., 2010. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 365(1555), 3101-3112, <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0145>.
- Gardarin A., Colbach N., 2015. How much of seed dormancy in weeds can be related to seed traits?, *Weed Research*, 55(1), 14-25, <https://doi.org/10.1111/wre.12121>.
- Gardarin A., Guillemin J.-P., Munier-Jolain N.M., Colbach N., 2010. Estimation of key parameters for weed population dynamics models: Base temperature and base water potential for germination. *European Journal of Agronomy*, 32(2), 162-168, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.004>.
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., 2012. Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits, *Ecological Modelling*, 240, 123-138, <https://doi.org/10.1111/wre.12121>.
- Garin G., Fournier C., Andrieu B., Houlès V., Robert C., Pradal C., 2014. A modelling framework to simulate foliar fungal epidemics using functional-structural plant models, *Annals of Botany*, 114(4), 795-812, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu101>.
- Godefroid M., Cruaud A., Streito J.-C., Rasplus J.-Y., Rossi J.-P., 2022. Forecasting future range shifts of *Xylella fastidiosa* under climate change, *Plant Pathology*, 71(9), 1839-1848, <https://doi.org/10.1111/ppa.13637>.
- Griffiths G.J.K., Holland J.M., Bailey A., Thomas M.B., 2008. Efficacy and economics of shelter habitats for conservation biological control, *Biological Control*, 45(2), 200-209, <https://doi.org/10.1016/j.bioc.2007.09.002>.
- Guilioni L., Cellier P., Ruget F., Nicoulaud B., Bonhomme R., 2000. A model to estimate the temperature of a maize apex from meteorological data, *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(2), 213-230, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00130-6).
- Gutteridge R.J., Jenkyn J.F., Bateman G.L., 2006. Effects of different cultivated or weed grasses, grown as pure stands or in combination with wheat, on take-all and its suppression in subsequent wheat crops, *Plant Pathology*, 55(5), 696-704, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01405.x>.
- Hanzlik K., Gerowitz B., 2012. Occurrence and distribution of important weed species in German winter oilseed rape fields, *Journal of Plant Diseases and Protection*, 119(3), 107-120, <https://doi.org/10.1007/BF03356429>.
- Hawkins N.J., Bass C., Dixon A., Neve P., 2019. The evolutionary origins of pesticide resistance, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 94(1), 135-155, <https://doi.org/10.1111/brv.12440>.
- Heap I., (2023) The International Herbicide-Resistant Weed Database. Available at www.weeds-science.com.
- Hendrix D.L., Salvucci M.E., 1998. Polyol metabolism in homopterans at high temperatures: accumulation of mannitol in aphids (Aphididae: Homoptera) and sorbitol in whiteflies (Aleyrodidae: Homoptera), *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 120, [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(98\)10058-2](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(98)10058-2).

- Hirschi M., Stoeckli S., Dubrovsky M., Spirig C., Calanca P., Rotach M.W. *et al.*, 2012. Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland, *Earth System Dynamics*, 3(1), 33-47, <https://doi.org/10.5194/esd-3-33-2012>.
- Huang Y.-J., Mitrousis G.K., Sidiq S.N.M., Qi A., Fitt B.D.L., 2018. Combining R gene and quantitative resistance increases effectiveness of cultivar resistance against *Leptosphaeria maculans* in *Brassica napus* in different environments, *PLoS ONE*, 13(5), e0197752, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197752>.
- Hulme P.E., 2017. Climate change and biological invasions: evidence, expectations, and response options, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 92(3), 1297-1313, <https://doi.org/10.1111/brv.12282>.
- Iler A.M., CaraDonna P.J., Forrest J.R.K., Post E., 2021. Demographic consequences of phenological shifts in response to climate change, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52(1), 221-245, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-011921-032939>.
- Illston B.G., Fiebrich C.A., 2017. Horizontal and vertical variability of observed soil temperatures, *Geoscience Data Journal*, 4, <https://doi.org/10.1002/gdj3.47>.
- Johns L.E., Bebber D.P., Gurr S.J., Brown N.A., 2022. Emerging health threat and cost of Fusarium mycotoxins in European wheat, *Nature Food*, 3(12), 1014-1019, <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00655-z>.
- Juroszek P., von Tiedemann A., 2013. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts, *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 163-188, <https://doi.org/10.1017/S0021859612000500>.
- Kramer P.J., Boyer J.S., 1995. *Water Relations of Plants and Soils*, Academic Press, 495 p.
- Labreuche J., Métais P., Vuillemin F., Bonin L., Colbach N., 2020. Le faux semis : identifier les clés du succès, *Innovations Agronomiques*, 81, 51-67, <https://doi.org/10.15454/e8zr-w568>.
- Lagarde M.P., 1988. Une nouvelle approche de la modélisation à partir de l'évolution de la maturation des ascospores, *Adalia*, 7-8, 14-15.
- Launay M., Caubel J., Bourgeois G., Huard F., García de Cortázar-Atauri I., Bancal M.-O. *et al.*, 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197, 147-158, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020>.
- Lehmann P., Ammunét T., Barton M., Battisti A., Eigenbrode S.D., Jepsen J.U. *et al.*, 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming, *Frontiers in Ecology and the Environment*, (3), 141-150, <https://doi.org/10.1002/fee.2160>.
- Lekberg Y., Arnillas C.A., Borer E.T., Bullington L.S., Fierer N., Kennedy P.G. *et al.*, 2021. Nitrogen and phosphorus fertilization consistently favor pathogenic over mutualistic fungi in grassland soils, *Nature Communications*, 12(1), 3484, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23605-y>.
- Li S., Liu N., Cai D., Liu C., Ye J., Li B. *et al.*, 2023. A predictive model on deoxynivalenol in harvested wheat in China: Revealing the impact of the environment and agronomic practicing, *Food Chemistry*, 405, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134727>.
- Liu C., Van der Fels-Klerx H.J., 2021. Quantitative modeling of climate change impacts on mycotoxins in cereals: a review, *Toxins*, 13(4), <https://doi.org/10.3390/toxins13040276>.
- Lutman P.J.W., Moss S.R., Cook S., Welham S.J., 2013. A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides*, *Weed Research*, 53(5), 299-313, <https://doi.org/10.1111/wre.12024>.
- Ma C.-S., Ma G., Pincebourde S., 2021. Survive a warming climate: insect responses to extreme high temperatures, *Annual Review of Entomology*, 66, 163-184, <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041520-074454>.
- Magarey R.D., Sutton T.B., Thayer C.L., 2005. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens, *Phytopathology*, 95(1), 92-100, <https://doi.org/10.1094/phyto-95-0092>.
- Mamy L., Pesce S., Sanchez W., Amichot M., Artigas J. *et al.*, 2022. Impacts des produits pharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques, rapport de l'expertise scientifique collective INRAE-Ifremer, 1408 p.

- Mariette N., Androdias A., Mabon R., Corbiere R., Marquer B., Montarry J., Andrivon D., 2016. Local adaptation to temperature in populations and clonal lineages of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans*, *Ecology and Evolution*, 6(17), 6320-6331, <https://doi.org/10.1002/ece3.2282>.
- Mboup M., Bahri B., Leconte M., De Vallavieille-Pope C., Kaltz O., Enjalbert J., 2012. Genetic structure and local adaptation of European wheat yellow rust populations: the role of temperature-specific adaptation, *Evolutionary Applications*, 5(4), 341-352, <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2011.00228.x>.
- McElrone A.J., Reid C.D., Hoye K.A., Hart E., Jackson R.B., 2005. Elevated CO₂ reduces disease incidence and severity of a red maple fungal pathogen via changes in host physiology and leaf chemistry, *Global Change Biology*, 11(10), 1828-1836, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001015.x>.
- Meyer M., Cox J.A., Hitchings M.D.T., Burgin L., Hort M.C., Hodson D.P. *et al.*, 2017. Quantifying airborne dispersal routes of pathogens over continents to safeguard global wheat supply, *Nature Plants*, 3(10), 780-786, <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0017-5>.
- Mézière D., Lucas P., Granger S., Colbach N., 2013. Does Integrated Weed Management affect the risk of crop diseases? A simulation case study with blackgrass weed and take-all disease, *European Journal of Agronomy*, 47, 33-43, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.01.007>.
- Minarro M., Dapena E., 2014. Resistance of apple cultivars to *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae): role of tree phenology in infestation avoidance, *Environmental Entomology*, 36(5), 1206-1211, [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[1206:ROACTD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[1206:ROACTD]2.0.CO;2).
- Moreau D., Busset H., Matejicek A., Munier-Jolain N., 2014. The ecophysiological determinants of nitrophily in annual weed species, *Weed Research*, 54(4), 335-346, <https://doi.org/10.1111/wre.12090>.
- Moreau D., Busset H., Matejicek A., Prudent M., Colbach N., 2022. Water limitation affects weed competitive ability for light. A demonstration using a model-based approach combined with an automated watering platform, *Weed Research*, 62(6), 381-392, <https://doi.org/10.1111/wre.12554>.
- Mundt C.C., 2014. Durable resistance: a key to sustainable management of pathogens and pests, *Infection, Genetics and Evolution*, 27, <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2014.01.011>.
- Nichols V., Verhulst N., Cox R., Govaerts B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review, *Field Crops Research*, 183, 56-68, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>.
- Nicot P.C., Avril F., Duffaud M., Leyronas C., Troulet C., Villeneuve F. *et al.*, 2019. Differential susceptibility to the mycoparasite *Paraphaeosphaeria minitans* among *Sclerotinia sclerotiorum* isolates, *Tropical Plant Pathology*, 44(1), 82-93, <https://doi.org/10.1007/s40858-018-0256-7>.
- Nyamukondiwa C., Kleynhans E., Terblanche J.S., 2010. Phenotypic plasticity of thermal tolerance contributes to the invasion potential of Mediterranean fruit flies (*Ceratitis capitata*), *Ecological Entomology*, 35(5), 565-575, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.2010.01215.x>.
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests, *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43, <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>.
- O'Sullivan C.A., Belt K., Thatcher L.F., 2021. Tackling control of a cosmopolitan phytopathogen: *Sclerotinia*, *Frontiers in Plant Science*, 12, 707509, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.707509>.
- Papaix J., Touzeau S., Monod H., Lannou C., 2014. Can epidemic control be achieved by altering landscape connectivity in agricultural systems?, *Ecological Modelling*, 284, 35-47, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.04.014>.
- Pélissier R., Viole C., Morel J.-B., 2021. Plant immunity: Good fences make good neighbors?, *Current Opinion in Plant Biology*, 62, 102045, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102045>.
- Pesce S., Mamy L., Sanchez W. *et al.*, 2023. Main conclusions and perspectives from the collective scientific assessment of the effects of plant protection products on biodiversity and ecosystem services along the land-sea continuum in France and French overseas territories, *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26952-z>.
- Peters K., Breitsameter L., Gerowitt B., 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: a review, *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), 707-721, <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0245-2>.
- Petit S., Carbonne B., Etcheverria Z., Colbach N., Bohan D.A., 2023. Field margins enhance weed seed predation in adjacent fields in early spring, *Frontiers in Agronomy*, 5, <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1228395>.

- Pincebourde S., Casas J., 2006. Multitrophic biophysical budgets: Thermal ecology of an intimate herbivore insect-plant interaction, *Ecological Monographs*, 76, [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0175:MBBTEO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0175:MBBTEO]2.0.CO;2)
- Pincebourde S., Casas J., 2015. Warming tolerance across insect ontogeny: influence of joint shifts in microclimates and thermal limits, *Ecology*, 96(4), 986-997, <https://doi.org/10.1890/14-0744.1>.
- Pincebourde S., Casas J., 2019. Narrow safety margin in the phyllosphere during thermal extremes, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116(12), 5588-5596, <https://doi.org/10.1073/pnas.1815828116>.
- Pincebourde S., Sinoquet H., Combes D., Casas J., 2007. Regional climate modulates the canopy mosaic of favourable and risky microclimates for insects, *The Journal of Animal Ecology*, 76(3), 424-438, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01231.x>.
- Pincebourde S., Murdock C.C., Vickers M., Sears M.W., 2016. Fine-scale microclimatic variation can shape the responses of organisms to global change in both natural and urban environments, *Integrative and Comparative Biology*, 56, <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>.
- Pincebourde S., Woods H.A., 2020. There is plenty of room at the bottom: microclimates drive insect vulnerability to climate change, *Current Opinion in Insect Science*, 41, <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.07.001>.
- Pinnschmidt H.O., Batchelor W.D., Teng P.S., 1995. Simulation of multiple species pest damage in rice using CERES-rice, *Agricultural Systems*, 48(2), 193-222, [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00012-G](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00012-G).
- Porras M.F., Navas C.A., Marden J.H., Mescher M.C., De Moraes C.M., Pincebourde S. *et al.*, 2020. Enhanced heat tolerance of viral-infected aphids leads to niche expansion and reduced interspecific competition, *Nature Communications*, 11(1), 1184, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14953-2>.
- Précigout P.-A., Robert C., Claessen D., 2020. Adaptation of biotrophic leaf pathogens to fertilization-mediated changes in plant traits: a comparison of the optimization principle to invasion fitness, *Phytopathology*, 110(5), 1039-1048, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-19-0317-R>.
- Renzi J.P., Traversa G., Vigna M.R., Chantre G.R., 2022. Climate effect on *Avena fatua* field emergence dynamics: A 38-year experiment in the semiarid Pampean region of Argentina, *The Annals of Applied Biology*, 181(2), 182-191, <https://doi.org/10.1111/aab.12757>.
- Rizzo D.M., Lichtveld M., Mazet J.A.K., Togami E., Miller S.A., 2021. Plant health and its effects on food safety and security in a One Health framework: four case studies, *One Health Outlook*, 3, 6, <https://doi.org/10.1186/s42522-021-00038-7>.
- Robert C., Bancal M.-O., Lannou C., 2004. Wheat leaf rust uredospore production on adult plants: influence of leaf nitrogen content and *Septoria tritici* Blotch, *Phytopathology*, 94(7), 712-721, <https://doi.org/10.1094/phyto.2004.94.7.712>.
- Roman E.S., Gordon Thomas A., Murphy S.D., Swanton C.J., 1999. Modeling germination and seedling elongation of common lambsquarters (*Chenopodium album*), *Weed Science*, 47(2), 149-155, <https://doi.org/10.1017/S0043174500091554>.
- Roucou A., Bergez C., Méléard B., Orlando B., 2022. An agro-climatic approach to developing a national prevention tool for deoxynivalenol in French maize-growing areas, *Toxins*, 14(2), <https://doi.org/10.3390/toxins14020074>.
- Santl-Temkiv T., Amato P., Casamayor E.O., Lee P.K.H., Pointing S.B., 2022. Microbial ecology of the atmosphere, *FEMS Microbiology Reviews*, 46(4), <https://doi.org/10.1093/femsre/fuac009>.
- Saudreau M., Pincebourde S., Dassot M., Adam B., Loxdale H.D., Biron D.G., 2013. On the canopy structure manipulation to buffer climate change effects on insect herbivore development, *Trees*, 27(1), 239-248, <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0791-7>.
- Saudreau M., Ezanic A., Adam B., Caillon R., Walser P., Pincebourde S., 2017. Temperature heterogeneity over leaf surfaces: the contribution of the lamina microtopography, *Plant, Cell & Environment*, 40(10), 2174-2188, <https://doi.org/10.1111/pce.13026>.
- Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops, *Nature, Ecology & Evolution*, 3(3), 430-439, <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>.

- Schoeny A., Jumel S., Rouault F., Lemarchand E., Tivoli B., 2010. Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of ascochyta blight, *European Journal of Plant Pathology*, 126(3), 317-331, <https://doi.org/10.1007/s10658-009-9548-6>.
- Schulte P.M., 2015. The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment, *The Journal of Experimental Biology*, 218(12), 1856-1866, <https://doi.org/10.1242/jeb.118851>.
- Semal J., 1995. L'épopée du mildiou de la pomme de terre (1845-1995), *Cahiers Agricultures*, 4(4), 287-298.
- Shaw M.W., Bearchell S.J., Fitt B.D.L., Fraaije B.A., 2008. Long-term relationships between environment and abundance in wheat of *Phaeosphaeria nodorum* and *Mycosphaerella graminicola*, *The New Phytologist*, 177(1), 229-238, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02236.x>.
- Sicard A., Zeilinger A.R., Vanhove M., Schartel T.E., Beal D.J., Daugherty M.P. et al., 2018. *Xylella fastidiosa*: insights into an emerging plant pathogen, *Annual Review of Phytopathology*, 56, 181-202, <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045849>.
- Sinclair B.J., 2015. Linking energetics and overwintering in temperate insects, *Journal of Thermal Biology*, 54, 5-11, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.07.007>.
- Sinclair B.J., Marshall K.E., Sewell M.A., Levesque D.L., Willett C.S., Slotsbo S. et al., 2016. Can we predict ectotherm responses to climate change using thermal performance curves and body temperatures?, *Ecology Letters*, 19(11), 1372-1385, <https://doi.org/10.1111/ele.12686>.
- Singh B.K., Delgado-Baquerizo M., Egidi E., Guirado E., Leach J.E., Liu H. et al., 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward, *Nature reviews, Microbiology*, 21(10), 640-656, <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>.
- Skelsey P., Newton A.C., 2015. Future environmental and geographic risks of Fusarium head blight of wheat in Scotland, *European Journal of Plant Pathology*, 142(1), 133-147, <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0598-7>.
- Solomon P.S., Lowe R.G.T., Tan K.-C., Waters O.D.C., Oliver R.P., 2006. *Stagonospora nodorum*: cause of stagonospora nodorum blotch of wheat, *Molecular Plant Pathology*, 7(3), 147-156, <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2006.00326.x>.
- Stratonovitch P., Storky J., Semenov M.A., 2012. A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed, *Global Change Biology*, 18(6), 2071-2080, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02650.x>.
- Sturrock R.N., Frankel S.J., Brown A.V., Hennon P.E., Kliejunas J.T., Lewis K.J. et al., 2011. Climate change and forest diseases, *Plant Pathology*, 60(1), 133-149, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>.
- Suffert F., Goyeau H., Sache I., Carpentier F., Gélisse S., Morais D. et al., 2018. Epidemiological trade-off between intra- and interannual scales in the evolution of aggressiveness in a local plant pathogen population, *Evolutionary Applications*, 11, <https://doi.org/10.1111/eva.12588>.
- Suggitt A.J., Gillingham P.K., Hill J.K., Huntley B., Kunin W.E., Roy D.B. et al., 2011. Habitat microclimates drive fine-scale variation in extreme temperatures, *Oikos*, 120, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18270.x>.
- Sunday J., Bennett J.M., Calosi P., Clusella-Trullas S., Gravel S., Hargreaves A.L. et al., 2019. Thermal tolerance patterns across latitude and elevation, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 374(1778), 20190036, <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0036>.
- Tarapacki P., Jørgensen L.B., Sørensen J.G., Andersen M.K., Colinet H., Overgaard J., 2021. Acclimation, duration and intensity of cold exposure determine the rate of cold stress accumulation and mortality in *Drosophila suzukii*, *Journal of Insect Physiology*, 135, 104323, <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2021.104323>.
- Thomson F.J., Moles A.T., Auld T.D., Kingsford R.T., 2011. Seed dispersal distance is more strongly correlated with plant height than with seed mass, *The Journal of Ecology*, 99(6), 1299-1307, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01867.x>.
- Tibi A., Martinet V., Vialatte A. (Coords), 2023. *Protéger les cultures par la diversité végétale*, Versailles, éditions Quæ, 132 p.

- Tresson P., Brun L., García de Cortázar-Atauri I., Audergon J.-M., Buléon S., Chenevotot H. *et al.*, 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France, *European Journal of Agronomy*, 112, 125960, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125960>.
- Trivedi P., Batista B.D., Bazany K.E., Singh B.K., 2022. Plant-microbiome interactions under a changing world: responses, consequences and perspectives, *The New Phytologist*, 234(6), 1951-1959, <https://doi.org/10.1111/nph.18016>.
- de Vallavieille-Pope C., Bahri B., Leconte M., Zurfuh O., Belaid Y., Maghrebi E. *et al.*, 2018. Thermal generalist behaviour of invasive *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* strains under current and future climate conditions, *Plant Pathology*, 67, <https://doi.org/10.1111/ppa.12840>.
- Van de Wouw A.P., Marcroft S.J., Sprague S.J., Scanlan J.L., Veske P.A., Idnurm A., 2021. Epidemiology and management of blackleg of canola in response to changing farming practices in Australia, *Australasian Plant Pathology*, 50(2), 137-149, <https://doi.org/10.1007/s13313-020-00767-9>.
- Vannini A., Lucero G., Anselmi N., Vetraino A.M., 2009. Response of endophytic *Biscogniauxia mediterranea* to variation in leaf water potential of *Quercus cerris*, *Forest Pathology*, 39(1), 8-14, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2008.00554.x>.
- Vialatte A., Tibi A., Alignier A., Angeon V., Bedoussac L., Bohan D.A. *et al.*, 2021. Promoting crop pest control by plant diversification in agricultural landscapes: A conceptual framework for analysing feedback loops between agro-ecological and socio-economic effects, *Advances in Ecological Research*, 65, 133-165, <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.10.004>.
- Vidal T., Gigot C., de Vallavieille-Pope C., Huber L., Saint-Jean S., 2018. Contrasting plant height can improve the control of rain-borne diseases in wheat cultivar mixture: modelling splash dispersal in 3-D canopies, *Annals of Botany*, 121(7), 1299-1308, <https://doi.org/10.1093/aob/mcy024>.
- Vidal T., Boixel A.-L., Maghrebi E., Perronne R., du Cheyron P., Enjalbert J. *et al.*, 2022. Success and failure of invasive races of plant pathogens: The case of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in France, *Plant Pathology*, 71(7), 1525-1536, <https://doi.org/10.1111/ppa.13581>.
- Walck J.L., Hidayati S.N., Dixon K.W., Thompson K., Poschlod P., 2011. Climate change and plant regeneration from seed, *Global Change Biology*, 17(6), 2145-2161, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>.
- Wei Z., Yang T., Friman V.-P., Xu Y., Shen Q., Jousset A., 2015. Trophic network architecture of root-associated bacterial communities determines pathogen invasion and plant health, *Nature Communications*, 6, 8413, <https://doi.org/10.1038/ncomms9413>.
- Weisberger D., Nichols V., Liebman M., 2019. Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis, *PLoS ONE*, 14(7), e0219847, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219847>.
- Williams C.M., Henry H.A.L., Sinclair B.J., 2015. Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 90(1), 214-235, <https://doi.org/10.1111/brv.12105>.
- Williams A., de Vries F.T., 2020. Plant root exudation under drought: implications for ecosystem functioning, *The New Phytologist*, 225(5), 1899-1905, <https://doi.org/10.1111/nph.16223>.
- Willocquet L., Savary S., Fernandez L., Elazegui F.A., Castilla N., Zhu D. *et al.*, 2002. Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia, *Ecological Modelling*, 153(3), 247-268, [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00014-5).
- Willocquet L., Aubertot J.N., Lebard S., Robert C., Lannou C., Savary S., 2008. Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations, *Field Crops Research*, 107(1), 12-28, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.12.013>.
- Woods H.A., Dillon M.E., Pincebourde S., 2015. The roles of microclimatic diversity and of behavior in mediating the responses of ectotherms to climate change, *Journal of Thermal Biology*, 54, 86-97, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.10.002>.
- Woods H.A., Saudreau M., Pincebourde S., 2018. Structure is more important than physiology for estimating intracanopy distributions of leaf temperatures, *Ecology and Evolution*, 8(10), 5206-5218, <https://doi.org/10.1002/ece3.4046>.

Agriculture et changement climatique

Woods H.A., Legault G., Kingsolver J.G., Pincebourde S., Shah A.A., Larkin B.G., 2022. Climate-driven thermal opportunities and risks for leaf miners in aspen canopies, *Ecological Monographs*, 92(4), <https://doi.org/10.1002/ecm.1544>.

Xu X.-M., 2011. A simulation study on managing plant diseases by systematically altering spatial positions of cultivar mixture components between seasons, *Plant Pathology*, 60(5), 857-865, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02441.x>.

Chapitre 9

Impacts du changement climatique sur l'élevage

*David Renaudeau, Hélène Gilbert, Anne Collin,
Aurélie Vinet, Stephan Zientara*

En Europe, l'élevage est une activité économique importante et une composante clé de la vitalité des territoires, puisqu'il est présent dans presque toutes les régions avec une très forte disparité dans les systèmes de production. Les produits de l'élevage (lait, viande, œufs) contribuent à apporter des nutriments et des micronutriments indispensables à l'équilibre nutritionnel de l'homme. Dans le futur, le secteur de l'élevage devra faire face à de nombreux défis, dont celui de continuer à contribuer à la sécurité alimentaire pour répondre à la demande mondiale croissante en produits animaux de qualité dans des contextes économiques, politiques, et climatiques de plus en plus incertains. Par ailleurs, l'élevage en Europe est confronté à une crise de légitimité, environnementale et sociétale sans précédent à laquelle il doit répondre en faisant évoluer les systèmes de production actuels vers des systèmes plus attractifs pour les futurs éleveurs, plus vertueux d'un point de vue environnemental et plus respectueux du bien-être des animaux.

Le secteur de l'élevage présente la particularité d'être un contributeur important aux émissions de gaz à effet de serre (GES) et reste composé de filières dont tous les maillons seront fortement affectés par les effets annoncés du changement climatique. En France, l'élevage est responsable d'environ 14 % des émissions de GES nationales en raison de la production des ressources destinées à l'alimentation animale, de leur transport et de leur transformation, des émissions de méthane entérique et des pratiques de gestion des déjections animales. Par ailleurs, le secteur de l'élevage est déjà et sera affecté par le changement climatique de manière directe (stress thermique, surmortalité des animaux) et indirecte *via* des effets sur la disponibilité et sur la qualité des ressources (aliment et eau) et l'émergence d'épizooties qui constituent une menace à la fois sanitaire et économique pour la durabilité du secteur de l'élevage et des populations qui en dépendent.

Après avoir rappelé l'approche générale pour évaluer la vulnérabilité face aux conséquences du changement global, ce chapitre se propose de dresser la synthèse des connaissances scientifiques disponibles au sujet des impacts du changement climatique sur les filières animales.

► Vulnérabilité du secteur de l'élevage face au changement climatique

L'évaluation de la vulnérabilité des systèmes d'élevage actuels aux effets du changement climatique est un enjeu important pour les filières animales (Renaudeau et Dourmad, 2021). Elle permet de quantifier les risques climatiques et de sensibiliser les éleveurs et les acteurs des filières, mais également d'identifier les facteurs qui réduisent ou augmentent les capacités de réponse ou d'adaptation.

Classiquement, la vulnérabilité d'un système de production réfère à sa capacité à faire face et à s'adapter au changement climatique. Elle résulte de la combinaison de trois composantes : l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation du système (Adger, 2006). Les caractéristiques de l'exposition incluent l'amplitude, la fréquence, la durée et l'ampleur spatiale des perturbations directes et indirectes liées aux conséquences du réchauffement global. La sensibilité est le degré de modification du système d'élevage subissant la perturbation. Enfin, la capacité d'adaptation est liée à la capacité du système d'élevage à fonctionner normalement, immédiatement ou après avoir mis en place une réponse adaptée, lorsqu'il est exposé à des perturbations. Les relations entre ces trois composantes sont schématisées sur la figure I.3 (voir p. 14).

Pour le secteur de l'élevage, l'exposition du système au changement climatique va dépendre d'une part des conséquences directes de ses manifestations (augmentation de la température moyenne, augmentation de la fréquence et de la durée des événements extrêmes, et/ou autres aléas climatiques pouvant affecter les élevages) sur les animaux (voir section « Effets directs sur la modification de l'environnement abiotique des animaux d'élevage », page suivante). Elle dépend également de leurs conséquences indirectes sur les autres composantes du système, en lien avec les incertitudes sur la disponibilité et sur la qualité des ressources utilisées pour alimenter les animaux (voir section « Évolution de la disponibilité, du coût et de la qualité des ressources alimentaires » de ce chapitre, p. 227) ou sur la santé et en particulier la possibilité d'émergence ou de réémergence de maladies (voir section « Effets sur la santé et sur le bien-être des animaux » de ce chapitre, p. 231).

La sensibilité est une caractéristique inhérente aux différents systèmes d'élevage et aux animaux qui les composent. Le niveau de production des animaux d'élevage a très fortement augmenté ces cinquante dernières années. Les orientations prises dans les années 1970 ont conduit à une intensification des productions *via* une forte spécialisation des races et des types génétiques utilisés. L'amélioration conjointe du potentiel génétique des animaux et des conduites d'élevage a permis d'obtenir des gains très importants sur le niveau et sur l'efficience des productions. Ainsi, la production laitière par vache a été multipliée par 2,3 en France entre 1970 et 2021 (3 200 kg *vs* 7 500 kg de lait; données FAOStat). Actuellement, environ 200 kg d'aliment sont nécessaires pour qu'un porc de 30 kg atteigne son poids d'abattage à 115 kg, contre 300 kg en 1980. Cette intensification a augmenté la sensibilité des systèmes de production aux perturbations. Tout d'abord, la sélection sur la capacité à produire de la viande, du lait ou des œufs s'est traduite par un accroissement des besoins énergétiques et, par conséquent, de la production de chaleur métabolique des animaux, qu'ils doivent pouvoir évacuer pour maintenir leur homéothermie. Cela a vraisemblablement augmenté la sensibilité à la chaleur des génotypes actuellement utilisés en élevage puisqu'une partie du potentiel de pertes de chaleur des animaux dépend du différentiel entre la température de surface et la température ambiante. Des travaux conduits chez la volaille indiquent

une sensibilité exacerbée à la chaleur des souches à croissance rapide, notamment chez les mâles (Yahav, 2009), liée à un moindre accroissement des masses du système cardiovasculaire sollicité pour la dissipation de la chaleur, relativement aux tissus musculaires (Havenstein *et al.*, 2003). Par ailleurs, la standardisation des conditions de sélection pour optimiser la prédition du potentiel génétique des animaux a limité les pressions de sélection sur l'influence des facteurs environnementaux sur l'expression des performances. En d'autres termes, une variation de l'environnement d'élevage (climatique, sanitaire, alimentaire) à laquelle la population n'a pas été exposée en sélection peut se traduire par une réduction immédiate des performances en élevage.

Une grande partie des animaux d'élevage passent toute ou une partie de leur vie productive dans un bâtiment afin de garantir aussi bien la sécurité sanitaire et l'homogénéité de leurs conditions d'élevage que les performances technico-économiques des exploitations. Actuellement, les usages des bâtiments d'élevage ont changé et leur conception initiale n'est probablement plus adaptée aux enjeux futurs du changement climatique. Ainsi, en production laitière, les bâtiments doivent aujourd'hui non seulement protéger les vaches des intempéries hivernales, mais aussi constituer une zone de confort pendant les pics de chaleur en période estivale. En production porcine, une grande partie des bâtiments actuels français ne fonctionne qu'avec des systèmes de ventilation statiques ou dynamiques qui ne permettent généralement pas de gérer convenablement les pics de chaleur estivaux. Bien que le renouvellement des bâtiments d'élevage soit en cours, la capacité des bâtiments à assurer le confort des animaux en toutes saisons reste à ce jour un facteur de sensibilité important pour certaines filières animales. Ces évolutions doivent être combinées avec des pressions sociétales grandissantes pour des systèmes d'élevage plus ouverts, à moindres intrants, dans lesquels la maîtrise des conditions d'ambiance est réduite.

En pratique, la capacité d'adaptation d'un système regroupe un large éventail de facteurs qui dépendent avant tout du type et du système de production (« extensif » vs « intensif », lien au sol, etc.) et, pour une filière donnée, des possibilités économiques et techniques des éleveurs pour mettre en place des stratégies d'adaptation. Plus généralement, la capacité d'adaptation des élevages est aussi étroitement liée à la conjoncture économique (cours des aliments, des produits animaux, de l'énergie, etc.), de l'évolution des politiques agricoles et du contexte réglementaire, et de l'attractivité du secteur de l'élevage. L'adaptation des élevages au changement climatique sera traitée dans le chapitre 12.

► Impacts du changement climatique sur l'élevage

Les différents impacts du changement climatique sur l'élevage sont résumés dans la figure 9.1 et détaillés dans les parties suivantes.

Effets directs sur la modification de l'environnement abiotique des animaux d'élevage

Réponses de thermorégulation des animaux d'élevage

Les facteurs abiotiques (température de l'air et de l'eau, ensoleillement, humidité, vent, salinité et pH de l'eau, etc.) composant l'environnement d'élevage ont des effets déterminants sur la physiologie, le développement, le bien-être et les performances des espèces de rente.

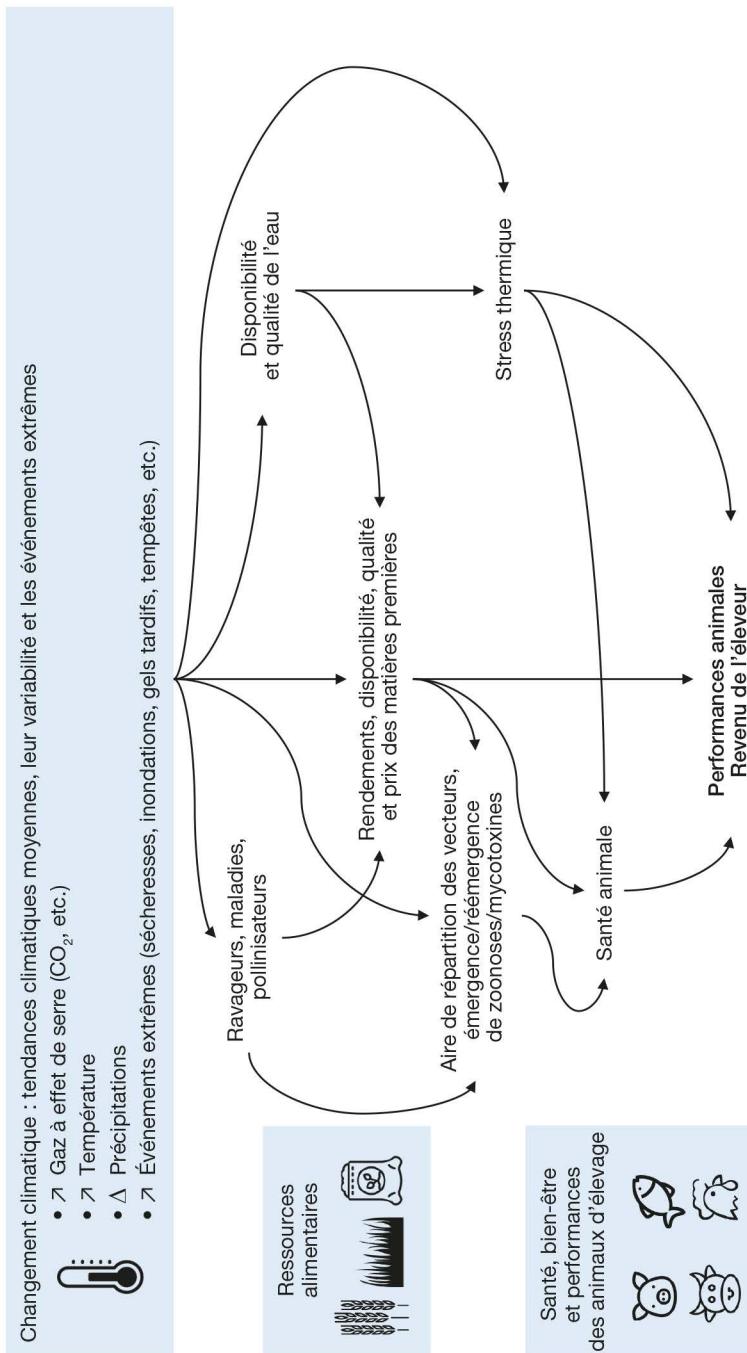


Figure 9.1. Impacts potentiels du changement climatique sur l'élevage. Source : figure adaptée de Goode *et al.* (2021).

La plupart des animaux d'élevage terrestres (ruminants, porcs, volailles) sont homéothermes et endothermes, leur température interne étant maintenue à peu près constante malgré les variations du milieu ambiant par un ensemble de mécanismes physiologiques et comportementaux. L'équilibre thermique résulte du maintien, à des niveaux équivalents, de la production de chaleur ou thermogenèse et des pertes de chaleur ou thermolyse. Dans la zone de confort thermique, la dépense énergétique liée à l'effort de thermorégulation est théoriquement minimale, ce qui maximise la disponibilité de l'énergie d'origine alimentaire pour couvrir les besoins de production. Au-delà d'un seuil critique (limite supérieure de la zone de confort thermique), l'augmentation des pertes de chaleur n'est plus suffisante pour maintenir une température interne compatible avec le bon fonctionnement de l'organisme, et l'animal réduit sa production de chaleur métabolique (en réduisant son niveau d'ingestion) et, dans certains cas, augmente ses dépenses de thermorégulation pour faciliter la dissipation de la chaleur. Dans cette situation, la baisse des performances des animaux s'explique d'abord par une réduction de l'énergie ingérée, mais également par une augmentation de la part de l'énergie utilisée pour couvrir les besoins liés au métabolisme basal et, en conséquence, par une diminution de celle disponible pour couvrir les besoins de production (lait, viande, œufs).

Des facteurs liés à l'animal comme le niveau de production, l'âge, le sexe et le stade physiologique, mais également des particularités anatomiques (le gabarit, la répartition, la structure et la densité des phanères ou des glandes sudoripares, etc.) peuvent faire varier sa sensibilité à la chaleur (Mandonnet *et al.*, 2011). Les conditions d'élevage liées à la conduite (alimentation, abreuvement) et au mode de logement des animaux (structure du bâtiment, zones d'ombrage, densité animale, type de sol, type de litière, etc.), mais également aux autres facteurs climatiques interférant avec la température (durée et sévérité de l'épisode d'exposition thermique, humidité relative, vitesse de l'air, température de l'eau de boisson) peuvent aussi faire varier les limites inférieures et supérieures de la zone de confort thermique des animaux d'élevage (Renaudeau *et al.*, 2012). La prise en compte de tout ou partie de ces paramètres pouvant interagir avec la température ambiante dans un index synthétique permet de mieux refléter la sensibilité des animaux face au défi climatique. En pratique et pour faciliter son utilisation, ce type d'index doit être calculé à partir de paramètres faciles à mesurer en élevage. L'indicateur préférentiellement utilisé est l'index température-humidité (ITH) qui prend en compte la température et l'humidité relative, qui sont deux variables facilement accessibles pour l'éleveur (Renaudeau *et al.*, 2012).

Effets des facteurs abiotiques sur le bien-être et sur les performances des animaux

Au-delà des effets médiés par la réduction de la consommation volontaire d'aliment, la température ambiante a également des effets directs sur la physiologie des animaux qui peuvent aussi expliquer une part de la variation de leurs performances. La mise en place d'adaptations visant à augmenter les pertes de chaleur (redistribution des flux sanguins, hyperventilation pulmonaire, etc.) se traduit par des désordres métaboliques et physiologiques (acidoses ruminales, stress oxydant, etc.) qui affectent momentanément ou de manière durable à la fois la santé, le bien-être et les performances des animaux d'élevage (Lacetera, 2018). À court terme, l'augmentation de la température a des effets

négatifs sur les performances. En France, par exemple, l'ITH pour lequel la production des vaches laitières est optimale se situe entre 47 et 55 (soit une température moyenne journalière entre 6°C et 13°C). À un ITH de 70 (soit une température moyenne journalière de 24°C à 40 % d'humidité), la baisse de la production journalière est de 5 % à 7 % pour la quantité de lait et de 10 % à 14 % pour les matières grasses et protéiques. Ces baisses sont plus marquées chez les fortes productrices (Vinet *et al.*, 2023). Le seuil d'ITH à partir duquel la production laitière commence à diminuer peut varier selon la race et/ou des spécificités de conduites (alimentaires et de systèmes d'élevage).

En modifiant la dynamique de sécrétion des hormones sexuelles, la qualité des semences, le développement des ovocytes mais également le développement des embryons, la chaleur peut également affecter la fertilité et la fécondité des animaux à moyen et long terme, avec des conséquences économiques importantes pour l'éleveur (Nardone *et al.*, 2010). En France, des travaux montrent que la survenue d'un stress thermique avant ou après l'insémination des vaches laitières peut induire une dégradation de plus de dix points du taux de réussite de l'insémination quand l'ITH dépasse 70 (Havret, 2022). La période après l'insémination apparaît plus critique que la période avant, ce qui laisse supposer un fort impact sur la survie embryonnaire. Enfin, sur le long terme, il a été démontré qu'une exposition précoce (par exemple pendant la vie foetale) à la chaleur peut affecter durablement le comportement et la façon dont l'animal va exprimer son potentiel de production pendant sa vie productive. Chez le porc, une exposition à la chaleur pendant la période prénatale induit des modifications du comportement social des porcs (Merlot *et al.*, 2018) et, dans certaines conditions, une modification de la composition des carcasses à l'abattage (Mayorga *et al.*, 2019). De manière similaire, un stress thermique pendant la gestation de la vache laitière a aussi des conséquences sur le développement du foetus, sur le métabolisme et sur les performances ultérieures du veau (Ouellet *et al.*, 2021). Chez les oiseaux d'élevage, le développement embryonnaire dans l'œuf ne dépend pas de la température interne maternelle, mais de celle programmée dans l'incubateur. Une exposition contrôlée de l'embryon à des températures cycliques élevées en milieu d'embryogenèse peut s'avérer bénéfique pour la survie des poulets de chair mâles en cas d'exposition aiguë à la chaleur ultérieure et pour la croissance musculaire (Loyau *et al.*, 2015). La modification des fonctions physiologiques pendant la vie productive des animaux par une exposition précoce à la chaleur fait en partie appel à des mécanismes épigénétiques qui peuvent dans certains cas être transmis d'une génération à une autre (Skibiel *et al.*, 2018) et pourraient contribuer à leur réponse ultérieure à des températures élevées.

Les projections climatiques disponibles pour des horizons temporels proches et lointains permettent d'évaluer la vulnérabilité des différents systèmes d'élevage en l'absence de mise en place de stratégies d'adaptation. À une échelle mondiale, et pour un scénario basé sur une évolution faible des émissions de GES (SSP1-2.6), au niveau mondial, 18 % à 29 % des animaux d'élevage pourraient être concernés par les effets des fortes températures d'ici 2050 (tableau 9.1, adapté de Thornton *et al.*, 2021). En moyenne, le nombre de jours de stress extrême varierait de 16 à 28 jours selon l'espèce animale. Dans cette étude, le stress thermique est considéré comme extrême si l'ITH dépasse le seuil de 89 pour les bovins, les ovins, les porcs et la volaille, et de 86 pour les caprins élevés en régions tempérées, ou les seuils de 94, 93 et 92, respectivement pour les bovins et les ovins, pour les caprins et pour les porcs et la volaille élevés en régions tropicales.

Pour le scénario avec des émissions de GES très élevées (SSP1-8.5), 26 % à 40 % des animaux seraient concernés à moyen terme (2050), et cette proportion deviendrait dramatique en 2090 (supérieure à 60 % pour toutes les espèces d'élevage). À titre d'exemple, la proportion de la population mondiale de volailles susceptible d'être exposée à un stress thermique extrême (ITH supérieur à 92 pour les races tropicales et supérieur à 89 pour les races tempérées) passerait de 12 % en 2000 à 75 % en 2090.

Tableau 9.1. Nombre d'animaux (N, en % du total en millions de têtes pour les effectifs par scénario) concernés par les effets de la chaleur, et nombre de jours en situation de stress thermique extrême¹ pour différents scénarios climatiques et différents horizons temporels. Source : tableau adapté de Thornton *et al.* (2021).

Horizon/ Scénario	Espèce				
	Bovin	Ovin	Caprin	Porc	Volaille
Total	1 432	932	1 095	957	20 117
2000	N	8 %	9 %	11 %	9 %
	Jours	8	6	11	6
2050/SSP1-2.6	N	18 %	20 %	21 %	25 %
	Jours	19	16	23	18
2090/SSP1-2.6	N	17 %	23 %	20 %	26 %
	Jours	18	16	22	19
2050/SSP5-8.5	N	26 %	30 %	31 %	39 %
	Jours	24	21	31	27
2090/SSP5-8.5	N	61 %	69 %	63 %	69 %
	Jours	69	57	77	87

¹ Pour les animaux en zone tempérée, le stress thermique est considéré comme extrême quand l'ITH dépasse 89 pour toutes les espèces, sauf les caprins (seuil à 86). Pour les espèces tropicales, les seuils suivants ont été choisis : 94 pour les bovins et les ovins, 93 pour les caprins, 92 pour les porcs et la volaille.

Même si cette étude présente des limites, notamment car elle prend en compte uniquement les effets de l'élévation des températures moyennes et non les effets des vagues de chaleur, les stratégies d'adaptation actuelles et leurs évolutions futures, etc., elle indique clairement que d'ici la fin du siècle, certaines régions du monde (Afrique saharienne et Afrique de l'Ouest, Amérique du Sud, etc.) pourraient devenir des zones où l'élevage d'animaux sera très compliqué en raison de l'évolution de l'environnement climatique.

Évolution de la disponibilité, du coût et de la qualité des ressources alimentaires

Les effets du changement climatique sur la quantité et la qualité moyenne des ressources utilisées pour l'alimentation animale, et sur leurs variabilités, sont déjà visibles et vont probablement s'accélérer dans le futur. Ils sont et seront la conséquence d'interactions complexes au niveau des cultures, et éventuellement du stockage des matières premières, entre des facteurs abiotiques tels que la teneur en CO₂ atmosphérique,

la température ambiante, le régime des précipitations, des facteurs biotiques tels que la présence d'agents pathogènes, et des facteurs liés à la gestion des cultures (gestion des rotations, du sol, de la fertilisation, etc.) (voir chapitres 6 et 8). Dans le secteur de l'élevage, l'alimentation des animaux représente souvent le principal poste de dépenses de l'exploitation. Si une partie de ce coût alimentaire est une caractéristique de l'animal en lien avec sa capacité à transformer efficacement l'aliment qu'il consomme en produits animaux, l'autre partie est liée au coût des matières premières et à leur qualité nutritionnelle et sanitaire.

Disponibilité et coût des ressources alimentaires

Chez les monogastriques et les poissons, le coût des aliments représente plus de 60 % du coût de production. Une grande partie des ressources alimentaires utilisées sont des céréales ou des coproduits des céréales, des tourteaux d'oléoprotéagineux et des farines de poisson (aquaculture). Même si une proportion importante de ces matières premières (par exemple les céréales) sont produites en France, leurs prix varient selon la qualité globale des récoltes dans les grands bassins de production mondiaux. Ainsi, des anomalies climatiques subies de manière concomitante par plusieurs pays producteurs et leurs conséquences immédiates et différées sur la disponibilité et sur le prix des matières premières représentent un risque important pour la durabilité économique de l'ensemble des filières animales. Par exemple, la faible pluviométrie et les vagues de chaleur observées pendant le printemps et l'été 2018 en Europe du Nord et de l'Est, ajoutées aux conditions climatiques défavorables en Amérique du Nord et dans la région de la mer Caspienne, ont entraîné une flambée durable des cours mondiaux des céréales, avec par exemple un supplément de 50 €/t pour le blé (base : 170 € en mai 2018) (Beillouin *et al.*, 2020). Cette augmentation des cours s'est traduite par une augmentation des coûts alimentaires à l'échelle mondiale, notamment dans les filières dont les rations alimentaires sont très dépendantes des céréales (en moyenne + 6 % pour le porc en Europe ; AHDB, 2020). En lien avec le réchauffement global, les effets du climat sur les rendements des cultures devraient s'accentuer dans le futur (voir chapitre 6). Depuis le début des années 1980, de nombreux travaux de simulation ont été réalisés pour proposer des prédictions des évolutions futures des rendements des principales cultures mondiales (maïs, riz, blé et soja). En utilisant une base de données référençant les résultats de plus de 8 000 simulations obtenues dans 202 études publiées entre 1984 et 2020, Hasegawa *et al.* (2022) montrent que le réchauffement climatique aura globalement un effet négatif sur les rendements des principales cultures ($-7,1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4,0\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2,3\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-3,7\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivement pour le maïs, le soja, le riz et le blé), et que ces baisses de rendement seront très variables d'une année sur l'autre, mais aussi selon le scénario climatique, la région du monde et la possibilité ou pas d'utiliser des stratégies d'adaptation (fertilisation, irrigation, sélection, changement des dates de semis, etc.). Pour un réchauffement global de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la probabilité d'avoir une chute des rendements supérieure à 10 % en moyenne chez les quatre plus grands pays producteurs mondiaux de maïs (États-Unis, Chine, Brésil et Argentine) atteindrait respectivement 69 %, 46 %, 39 % et 50 % (Tigchelaar *et al.*, 2018). D'après cette étude, la probabilité que cette chute de 10 % soit observée de manière concomitante dans ces quatre pays est nulle à l'heure actuelle, mais s'élèverait à 67 % pour un réchauffement de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, et à 87 % pour un réchauffement de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Étant donné que ces quatre pays représentent environ actuellement 70 % de la production mondiale

de maïs (données FAOStat), une baisse simultanée des rendements aurait des impacts dramatiques sur le cours des céréales et, plus généralement, sur les filières animales. À ce jour, les conséquences futures de la variation des rendements sur le cours des matières premières et sur leur disponibilité pour l'alimentation animale restent difficiles à évaluer, en raison des stratégies de stockage des producteurs et des effets de substitutions dans la formulation des aliments. Il est toutefois probable que sur le long terme la hausse des cours des principales matières premières utilisées en alimentation animale soit expliquée à la fois par une baisse tendancielle des rendements, mais également par une augmentation de la compétition entre les usages pour l'alimentation humaine et des animaux d'élevage. La volatilité des cours des matières premières sera aussi probablement associée à la production d'énergie en lien avec l'augmentation de la population mondiale et la nécessaire réduction de notre dépendance énergétique vis-à-vis des carburants d'origine fossile (Nelson *et al.*, 2009).

Chez les ruminants, l'utilisation de fourrages pâturels ou récoltés (environ 60% à 90% de la ration selon le type d'animaux et le système de production) permet généralement de réduire la part alimentaire dans les coûts de production des exploitations (voir chapitre 6). À l'échelle française, les effets du changement climatique sur le système fourrager sont déjà visibles. La sécheresse et les très fortes chaleurs estivales observées en 2022 ont provoqué un déficit de la pousse cumulée des prairies permanentes entre juin et novembre de 24% (par rapport à la production moyenne nationale entre 1989-2018; Agreste, 2022) et une réduction de 20% (par rapport à la moyenne sur la période 2010-2021) de la production de maïs distribué sous forme de fourrage et d'ensilage dans le Grand Ouest (Pays de la Loire, Bretagne, Normandie) (Agreste, 2022). Dans le futur, les variations saisonnières des précipitations et de la température vont affecter la production inter et intra-annuelle des fourrages. Les simulations réalisées en France indiquent une augmentation moyenne de la productivité annuelle des prairies à court terme en lien avec une augmentation modérée de la température et de la stabilité des précipitations. Ainsi, la baisse de la production en période estivale devrait être compensée par une surproduction en hiver et au printemps (Ruget *et al.*, 2013). À long terme, un allongement de la période non productive estivale liée à une nette baisse des précipitations est à craindre avec des impacts sur la productivité annuelle qui restent à confirmer et qui varieront probablement fortement d'une région à une autre. Pour une conduite optimale du système d'élevage, la disponibilité de fourrage à un instant *t* doit être en adéquation avec les besoins nutritionnels du troupeau. Une plus forte saisonnalité dans la croissance de l'herbe risque donc d'affecter fortement les systèmes de production, en particulier ceux qui sont fortement dépendants du pâturage (voir chapitre 6). Ainsi, le positionnement et les durées des périodes où les animaux sont affouragés en complément de l'herbe pâturelle pourraient varier largement dans le futur, avec une redistribution en été des fourrages conservés, habituellement stockés pour l'alimentation hivernale (Pottier *et al.*, 2007). Cela pourrait avoir des conséquences sur les modes de conduite des animaux, pour réajuster les périodes de forts besoins nutritionnels aux moments de plus grande disponibilité des ressources. Les impacts du réchauffement climatique pourraient varier selon l'espèce fourragère avec des effets plus modérés sur les légumineuses comparativement aux graminées. Par conséquent, au-delà des effets sur la productivité des prairies, une modification de leur diversité floristique (réduction des graminées au profit des légumineuses ou des dicotylédones non fixatrices), et donc de leur valeur nutritionnelle, est également attendue dans le futur (Soussana, 2013).

Composition et qualités nutritionnelles des ressources alimentaires

Même si, malgré de nombreuses incertitudes, les effets du changement climatique sur les rendements des ressources utilisées en alimentation animale sont abondamment décrits dans la littérature, relativement peu de travaux décrivent les impacts sur leurs compositions chimiques et sur leurs valeurs nutritionnelles. Il est généralement admis que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ aura des effets négatifs sur la teneur en protéines des céréales et des légumineuses à graines (voir chapitre 6). Dans l'alimentation des monogastriques, environ 60 % à 70 % des protéines sont apportées par les céréales et leurs coproduits, le reste étant apporté par les tourteaux d'oléoprotéagineux et par les acides aminés de synthèse. À long terme, une réduction modérée de la teneur en protéines des céréales pourrait probablement être facilement compensée par une utilisation accrue d'acides aminés de synthèse pour équilibrer les rations. Les résultats de la littérature indiquent également une possible modification de la composition en minéraux et en éléments traces dans les matières premières utilisées en alimentation animale. Ainsi, les teneurs en minéraux (zinc et fer) pourraient être réduites dans les plantes en C3 et le soja et, dans une moindre mesure, dans les plantes en C4 (Myers *et al.*, 2014). Ces auteurs suggèrent que d'un point de vue nutritionnel, la plus faible teneur en zinc pourrait être compensée par une augmentation de sa biodisponibilité en lien avec la réduction des teneurs en phytates. Enfin, la valeur nutritive des ressources fourragères issues de prairies permanentes ou temporaires est aussi affectée par une augmentation concomitante de la teneur en CO₂ et de la température ambiante (Soussana, 2013). Comme pour les céréales, une réduction de la teneur en protéines est attendue dans les fourrages, en lien avec un effet de dilution provoqué par l'augmentation de leur concentration en sucres solubles. Dans des prairies associant graminées et légumineuses, cet effet pourrait être compensé par un effet positif des fortes teneurs en CO₂ sur le développement préférentiel des légumineuses fourragères au détriment des autres espèces fourragères.

Qualité sanitaire des ressources alimentaires

La qualité sanitaire des ressources utilisées en alimentation animale est un enjeu important pour la santé des animaux, mais également pour la qualité et la sécurité des denrées d'origine animale utilisées en alimentation humaine.

Les mycotoxines sont produites par des champignons ou des moisissures toxinogènes au champ et au cours du stockage des céréales, et regroupent une large gamme de molécules avec une toxicité très variable (voir chapitre 8). Les volailles et les porcs sont particulièrement exposés aux mycotoxines du fait de l'importance de la part des céréales dans leur alimentation et de l'absence de rumen contenant des micro-organismes capables de dégrader les toxines avant leur absorption intestinale. Par ailleurs, les mycotoxines sont généralement thermostables et résistent donc aux procédés technologiques utilisés pour la fabrication et pour la transformation des aliments destinés aux animaux d'élevage. Chez le porc, les effets des mycotoxines sont très variables : altérations hépatiques et de l'immunité pour les aflatoxines, baisse d'ingestion et des performances pour les trichothécènes (déoxynivalénol ou DON) et troubles de la fertilité et de la reproduction pour la zéaralénone (Afssa, 2007). Les mycotoxines ou leurs métabolites toxiques peuvent être retrouvés dans les produits animaux et donc constituer un risque pour la santé humaine. Par exemple, l'aflatoxine M1 peut être retrouvée dans du lait de vache ayant ingéré du maïs (grain ou ensilage) contaminé par l'aflatoxine B1. Les facteurs climatiques sont les

principaux déterminants de la structure de la communauté fongique et des niveaux de contamination par les mycotoxines avant et après la récolte (Magan *et al.*, 2011). Il est maintenant admis que le réchauffement climatique entraînera une augmentation de la fréquence des contaminations fongiques avant et après la récolte des céréales, avec de fortes disparités liées à la région géographique et à la famille de champignons (Liu et Van der Fels-Klerx, 2021 ; voir chapitre 8). En Europe, l'augmentation des précipitations et des températures pourrait favoriser les contaminations par le DON par *Fusarium spp.* dans le blé, tandis que des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus sévères pourraient stimuler la production d'aflatoxine B1 par *Aspergillus spp.* dans le maïs (Van der Fels-Klerx *et al.*, 2013 ; Battilani *et al.*, 2016). D'après ces auteurs, la part des surfaces européennes en maïs contaminées par l'aflatoxine B1 ($> 5 \mu\text{g/kg}$) passerait de 38 % actuellement à 73 % et 93 % pour un réchauffement de 2 °C et 5 °C, respectivement, d'ici la fin du siècle.

Disponibilité et qualité de l'eau

Comme indiqué dans le chapitre 2, les impacts du changement climatique sur la disponibilité et sur la qualité de l'eau sont déjà visibles et vont probablement augmenter dans le futur (Godde *et al.*, 2021). L'eau est un élément essentiel pour l'élevage à la fois pour l'irrigation des cultures utilisées dans l'alimentation du bétail, mais également pour l'abreuvement des animaux. À l'échelle mondiale, l'eau utilisée pour l'abreuvement des animaux d'élevage ne représente que 1 % de l'eau prélevée par l'agriculture (Steinfeld *et al.*, 2006). Malgré cette faible contribution, le besoin en eau d'abreuvement peut entrer en concurrence avec d'autres usages de l'eau dans certaines régions, notamment pendant les périodes de fort déficit hydrique. Une vache laitière consomme entre 50 litres et 100 litres d'eau par jour, voire même 150 litres par jour en période de forte chaleur. Cette consommation provient d'apports liés à l'eau d'abreuvement, mais également à l'eau apportée par la ration. Ses apports sont nécessaires à la rétention d'eau dans les tissus corporels ou dans le lait, et sont vitaux pour compenser les pertes d'eau corporelle liées au métabolisme de l'animal (pertes fécales et urinaires) et aux réponses de thermorégulation (pertes de chaleur latentes) (Boudon *et al.*, 2013). Quelle que soit l'espèce animale, une restriction des apports en eau a des conséquences négatives immédiates sur le niveau de production, qui sont généralement expliquées par une réduction nette de l'appétit des animaux. Dans le cas où cette restriction coïncide avec une période de forte chaleur, le déficit hydrique provoqué par l'augmentation des besoins en eau pour la thermorégulation peut accentuer les effets négatifs de la restriction sur les performances et sur la santé des animaux, et peut être fatal si la déshydratation atteint 15-20 %. Plus globalement, la qualité de l'eau pourrait être affectée par les conséquences du changement climatique (risque de salinisation, des charges plus élevées en sédiments ou en polluants dues aux sécheresses ou aux inondations) (Naqvi *et al.*, 2015). Dans le contexte où une part non négligeable des élevages en France utilise des eaux de forage ou des eaux de surface (rivière, étang, mare), la maîtrise de la qualité de l'eau destinée à l'abreuvement des animaux est un enjeu important pour l'avenir.

Effets sur la santé et sur le bien-être des animaux

Une part des conséquences du changement climatique sur les performances des animaux d'élevage sera liée à des effets directs de la variation des facteurs abiotiques sur leur santé ou indirects par une détérioration de l'environnement sanitaire dans lequel ils évolueront dans le futur.

Conséquences de la mise en place des réponses de thermorégulation sur la santé des animaux

Les mécanismes mis en place pour dissiper la chaleur ou pour réduire la production de chaleur peuvent avoir des conséquences sur la santé des animaux pouvant aller jusqu'à leur mort en cas de phénomènes climatiques extrêmes et prolongés dans le temps. La plupart des animaux d'élevage sont faiblement pourvus en glandes sudoripares et, dans ces conditions, une grande partie des pertes de chaleur latente (c'est-à-dire par évaporation d'eau) sont réalisées au niveau du tractus respiratoire *via* une augmentation de la fréquence des ventilations pulmonaires. Chez les ruminants, cette hyperventilation peut entraîner une augmentation du pH du sang, compensée partiellement ou complètement par une sécrétion rénale d'ions bicarbonates au détriment de la salive avec des conséquences indirectes sur le fonctionnement du rumen (acidose) et de la flore ruminale (Lacetera, 2018). Cet auteur indique aussi une augmentation de la fréquence des problèmes de pattes dans les semaines suivant une période de stress thermique. Ces problèmes d'aplombs peuvent être attribués à une augmentation du temps passé debout pour dissiper la chaleur, mais également aux effets à long terme de l'acidose ruminale. La réduction de l'ingestion au chaud couplée ou non avec une détérioration de la qualité de l'alimentation est un des facteurs qui peut expliquer les problèmes de cétose³⁹ chez les vaches laitières hautes productrices, notamment en début de lactation. Cette pathologie qui résulte d'un dysfonctionnement du métabolisme glucidique et lipidique a des conséquences négatives sur le long terme, à la fois sur le bien-être mais également sur la production et la composition du lait, et sur les performances de reproduction des animaux (Mellado *et al.*, 2023). La redistribution des flux sanguins est un mécanisme nécessaire pour exporter la chaleur métabolique des organes internes (viscères) vers les organes périphériques (peau) chez les animaux exposés à la chaleur (Collin *et al.*, 2001). Cette adaptation peut induire une réduction de l'apport en oxygène et en nutriments vers les tissus splanchniques⁴⁰ provoquant des dysfonctionnements métaboliques et un stress oxydatif avec des conséquences sur l'intégrité et sur la fonction barrière des épithéliums. Chez le porc, la chaleur entraîne une altération probablement transitoire des jonctions serrées au niveau de l'épithélium de l'intestin grêle, une translocation bactérienne de l'intestin aux autres organes et la libération de médiateurs pro-inflammatoires, activant ainsi une réponse inflammatoire systémique avec des conséquences sur la santé des animaux (Mayorga *et al.*, 2018). De manière similaire, des travaux menés chez la volaille indiquent une détérioration des villosités intestinales à la suite d'une exposition aiguë à la chaleur (Santos *et al.*, 2015) et une augmentation de la fréquence des infections d'origine intestinale par *Salmonella spp* chez des animaux élevés au chaud (Hirakawa *et al.*, 2020).

Conséquences des effets du changement climatique sur la capacité des animaux à répondre à un défi sanitaire

Il est généralement accepté que le stress thermique a un impact sur le système immunitaire par le biais de réponses à médiation cellulaire et humorale (Bagath *et al.*, 2019).

39. Cette maladie métabolique liée à une accumulation de corps cétoniques dans le sang provient d'un déficit énergétique et se traduit par un amaigrissement et par une baisse de production principalement en début de lactation.

40. Splanchnique : qui se rapporte aux viscères.

Sur la base d'une revue de la littérature, ces auteurs indiquent qu'un stress thermique aigu chez la vache laitière pourrait avoir un effet stimulant sur le système immunitaire. Ce résultat est confirmé par des études menées chez le porc où une préacclimation de 3 jours à 30 °C permet d'améliorer l'efficacité de la réponse inflammatoire face à des injections répétées d'une endoxine bactérienne (Campos *et al.*, 2014). Au contraire, lors d'un stress thermique chronique, la chaleur aurait un effet immunosuppresseur qui pourrait rendre les animaux plus sensibles aux maladies (Bagath *et al.*, 2019). Chez la vache laitière, ces réponses seraient principalement observées sur les races à fort potentiel et moins sur les races locales tropicales. Cette diminution de la capacité à répondre à un défi immunitaire est confirmée par des réponses immunitaires moins importantes qu'espérées à la suite d'épreuves vaccinales en périodes de fortes chaleurs sur des poulets de chair (Hirakawa *et al.*, 2020) ou des vaches laitières (Bagath *et al.*, 2019). Les mécanismes physiologiques et moléculaires impliqués dans la variation de la fonction immunitaire des animaux d'élevage exposés à la chaleur sont très complexes, car ils sont probablement liés à la fois aux effets directs de la température, mais également à ceux causés par la réduction de l'appétit et du métabolisme énergétique des animaux. Par ailleurs, les effets escomptés du changement climatique ne se limiteront probablement pas uniquement aux seuls effets de la chaleur. Au-delà de leur effet direct sur la santé des animaux d'élevage, l'augmentation de la présence de mycotoxines dans les ressources utilisées en alimentation animale pourrait également indirectement affecter la capacité des animaux à répondre à un défi immunitaire. Une étude récente a montré qu'une exposition des porcs au DON pendant une période de quatre semaines diminue, voire annule l'efficacité de la vaccination contre les signes cliniques du syndrome dysgénésique et respiratoire du porc (Rückner *et al.*, 2022).

Conséquences du changement climatique sur la mortalité des animaux d'élevage

Ces vingt dernières années, l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleur s'est traduite par des épisodes de surmortalités dans les élevages. En 2003, six millions de volailles (poulets, poules pondeuses, canards, pintades) sont mortes en France, ce qui a représenté une perte de 44,5 millions d'euros pour la filière, auxquels il faut ajouter les préjudices subis par les entreprises de l'amont et de l'aval (Amand *et al.*, 2004). Une étude rétrospective réalisée sur le troupeau laitier et allaitant français montre que le taux de mortalité a augmenté de 24% et de 12% par rapport à la mortalité normalement observée dans les élevages à la suite de vagues de chaleur de 2003 et de 2006 (Morignat *et al.*, 2014). D'après ces auteurs, toutes les classes d'âge chez les bovins laitiers et allaitants ont été concernées. En 2003, 60% des départements français ont eu un excès significatif de mortalité pendant la première semaine de canicule, et 51% pendant la seconde semaine. Une étude conduite au Canada conclut également à une augmentation du taux de mortalité de 27% dans le troupeau bovin laitier en Ontario pendant les vagues de chaleur de 2010 à 2012 (Bishop-Williams *et al.*, 2015). Des résultats similaires sont rapportés en Italie avec une surmortalité chiffrée à 19% les jours de canicule chez les vaches laitières (Vitali *et al.*, 2015). Ces auteurs indiquent que cette surmortalité semble se prolonger dans les trois jours qui suivent la vague de chaleur et que le risque de mortalité est proportionnel à la durée de la canicule. L'étiologie de cette surmortalité chez les bovins est complexe et généralement multifactorielle. Elle est liée à une dyshoméostasie électrolytique, une instabilité

du pH sanguin, une hyperperméabilité du tractus gastro-intestinal, une inflammation sévère induite par l'activation immunitaire, la défaillance de plusieurs organes, dont le système cardiovasculaire et une septicémie (Burhans *et al.*, 2022). Même si les données publiées sur les autres espèces d'élevage sont plus rares, la survenue d'un épisode caniculaire à certains moments clés du cycle de production des animaux peut également entraîner des épisodes de surmortalité. C'est le cas notamment de la période de mise bas chez la truie dont la durée peut s'allonger en période de fortes chaleurs avec une augmentation du risque d'hypoxie néonatale se traduisant par une mortalité accrue. Le transport des animaux sous une forte température reste une opération critique pour leur santé et leur bien-être et peut se traduire par une surmortalité si elle est mal gérée. Chez le porc, la mortalité pendant le transport à l'abattoir augmente de manière curvilinéaire avec la température, avec un risque qui s'accroît si les animaux n'ont pas été préalablement mis à jeun ou s'ils souffrent de pathologies ou de blessures en partant de l'élevage (Averós *et al.*, 2008).

Impacts sur l'émergence ou la réémergence de maladies animales

Le changement climatique pourrait avoir des effets sur la santé des animaux d'élevage en favorisant l'émergence et la réémergence de maladies animales. Ces effets pourraient être expliqués par une modification de la sensibilité de l'hôte et par un changement d'exposition à des agents pathogènes, notamment ceux transmis par l'environnement ou par des vecteurs dont la distribution géographique ou la densité pourraient être affectées directement ou indirectement par l'augmentation de la température ou un changement dans la répartition des précipitations. L'évaluation des risques liés au changement climatique est rendue difficile par la complexité des systèmes épidémiologiques mis en jeu, avec des effets qui selon les cas peuvent se potentialiser, voire au contraire se contrebalancer.

Le changement climatique peut contribuer plus ou moins directement à l'émergence ou à la réémergence de maladies à transmission vectorielle dans des zones géographiques qui jusque-là n'étaient pas touchées. Par exemple, des travaux américains ont montré que le changement climatique a contribué à la propagation du virus en cause dans le développement de l'influenza aviaire dans des zones géographiques jusqu'alors indemnes (Brown et Rohani, 2012). En créant les conditions pour que de nouveaux vecteurs survivent et se développent, le changement climatique a probablement favorisé l'extension géographique d'autres maladies telles que la fièvre du Nil occidental (West Nile), la fièvre catarrhale ovine (FCO), la maladie à virus Schmallenberg (SBV) ou la maladie hémorragique épizootique (MHE). Alors que l'infection par le virus West Nile touche principalement les chevaux, la FCO, le SBV et la MHE sont des maladies qui atteignent particulièrement les ruminants et qui ont, ou peuvent avoir, des conséquences économiques importantes pour les filières. Par exemple, le coût des pertes directes et indirectes liées à la FCO a été estimé à 1,4 milliard d'euros pour la France et les Pays-Bas dans les années 2007-2008 (Rushton et Lyons, 2015). La FCO, le SBV et la MHE sont toutes trois des maladies à vecteur, associées à une infection par des virus transmis par des moucherons piqueurs du genre *Culicoides*, dont les aires de répartition géographique ont changé notamment sous l'effet de l'évolution des conditions climatiques. La FCO ou la maladie de la langue bleue (en anglais, *blue tongue*, BT) est une maladie vectorielle touchant les ruminants (majoritairement les moutons, mais également les bovins, les chèvres et autres ruminants sauvages). Initialement présente

en Afrique, la FCO a atteint l'Europe en 2006, s'est étendue vers le nord depuis plusieurs décennies et a provoqué la plus grande épizootie de ces trente dernières années. La FCO n'affecte pas l'homme, mais provoque des retards de croissance chez les animaux malades, la mort de certains animaux et des avortements chez les femelles infectées. Le virus de la FCO appartient à la famille des *Sedoreoviridae* et au genre *Orbivirus* pour lequel 36 sérotypes ont été identifiés (nommés BTV-1 à 36, BTV pour «BT virus») (Zientara *et al.*, 2014). Depuis 2020, la France est infectée de façon enzootique par deux sérotypes (historiquement par BTV-8 et plus récemment par BTV-4). Un nouveau sérotype (BTV-3) introduit en fin d'année 2023 dans le nord de l'Union européenne et un premier foyer de FCO issu de BTV-3 ont été confirmés dans le nord de la France en août 2024. Le virus de la FCO (principalement BTCV-3 et BTCV-8) provoque essentiellement une infection fœtale qui conduit à des naissances le plus souvent non viables chez les bovins, les ovins et les caprins, et provoque des avortements, de la prématurité et de la mortinatalité associés à des malformations congénitales diverses (arthrogrypose/hydranencéphalie) mais également à une baisse de la production laitière chez les bovins. La MHE a été détectée pour la première fois en Italie et en Espagne fin 2022 (Lorusso *et al.*, 2023) et touche principalement les gros ruminants (domestiqués et sauvages) avec des signes cliniques assez proches de ceux de la FCO et qui peuvent aboutir à la mort des animaux. Compte tenu de l'émergence récente de la maladie dans le sud-ouest de la France avec le lancement d'une campagne de vaccination massive, la stratégie de lutte la plus efficace reste la limitation des échanges d'animaux vivants destinés à être élevés et engrangés. Les pertes potentielles liées à la propagation de la MHE en France et en Europe pourraient avec des conséquences très importantes dans l'organisation et dans l'économie des filières laitières et allaitantes.

D'autres maladies comme les strongyloses gastro-intestinales pourraient être favorisées directement par le changement climatique ou indirectement par des modifications de la conduite des pâturages (par exemple par l'avancement de la date de la mise à l'herbe) pour s'adapter au changement climatique.

► Conclusion

Depuis 2003, l'observation des impacts du réchauffement fait l'objet d'un consensus très large de la part des différents acteurs des filières animales. En effet, les épisodes répétés de sécheresse et leurs conséquences sur la disponibilité en fourrages pour les ruminants, mais également l'augmentation de la fréquence des épisodes de surmortalité estivale observée dans de nombreuses filières sont des événements marquants qui ont fortement contribué à la prise de conscience des enjeux climatiques par les éleveurs. Ainsi, d'une attention polie avant les années 2000, nous sommes passés à un intérêt soutenu quant aux différentes possibilités offertes pour s'adapter aux conséquences actuelles de l'évolution du climat, puis à des interrogations teintées d'inquiétude sur le futur proche.

Il est encore illusoire de cerner précisément les conséquences d'un réchauffement de 2 °C, 3 °C, voire 4 °C d'ici la fin du siècle pour des systèmes d'élevage. En effet, il existe toujours de grandes incertitudes concernant certains aspects importants de la réaction du climat au forçage radiatif, ainsi que sur la vulnérabilité, sur l'exposition des systèmes d'élevage et sur le contexte socio-économique dans lequel les élevages vont évoluer dans un futur proche et lointain. Ce chapitre montre qu'à l'échelle des bassins

de production et des filières le changement climatique influencera probablement les trajectoires de bon nombre d'exploitations agricoles par le biais des impacts cumulés sur les ressources, sur la santé, et plus généralement sur les performances des animaux. Le changement climatique aura des conséquences importantes sur le revenu des éleveurs, en rendant plus aléatoires la production ou la disponibilité des ressources alimentaires et les performances des animaux. Au-delà du risque sur la durabilité économique des exploitations s'ajoute celui (non traité dans ce chapitre) d'une probable délocalisation de certaines productions d'un territoire vers un autre, avec des impacts sur les économies (activités de services aux exploitations, la migration des structures de collecte ou de transformation, etc.), les emplois locaux, l'équilibre et l'attractivité de certains territoires, et potentiellement sur la sécurité alimentaire des territoires.

La compréhension et l'anticipation des risques liés aux impacts du changement climatique sont des défis cruciaux pour garantir la résilience des filières et des territoires. Dans ce contexte, l'enjeu pour les filières animales est de disposer d'outils de diagnostic performants pour évaluer la vulnérabilité des exploitations et pour sensibiliser les éleveurs aux risques liés au changement climatique. Parmi les initiatives en cours, citons par exemple les outils ClimAléas Test et ClimAléas Diag développés dans le cadre du projet Fermadapt dans les régions Bretagne et Pays de la Loire (encadré 9.1).

Encadré 9.1. ClimAléas Test et ClimAléas Diag : des outils produits dans le cadre du projet Fermadapt pour évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles face au changement climatique

Le projet Fermadapt est un projet multifilière, multidisciplinaire, et multiacteur qui vise à explorer des leviers d'adaptation au changement climatique, à produire des connaissances nouvelles et des outils nécessaires pour sécuriser les trajectoires d'adaptation des exploitations des régions Bretagne et Pays de la Loire. Une partie des activités développées dans le cadre de ce projet consiste à concevoir les outils ClimAléas Test et ClimAléas Diag pour aider les exploitants agricoles à mieux appréhender l'impact des aléas climatiques sur leurs activités et à mettre en place des stratégies d'adaptation efficaces. ClimAléas Test est un outil destiné principalement à la sensibilisation aux risques climatiques. Cet outil très descriptif repose sur un système de questionnaire interactif, conçu pour évaluer en 20 à 40 minutes le niveau de préparation et de connaissance des utilisateurs face aux différents aléas climatiques (sécheresse, canicules, tempêtes, etc.). ClimAléas Test est actuellement disponible pour les éleveurs des filières de ruminants, porcines et avicoles. ClimAléas Diag est un outil d'évaluation plus technique qui permet d'approfondir l'analyse de la vulnérabilité en fournissant des diagnostics chiffrés et personnalisés grâce à la prise en compte des spécificités de chaque exploitation, en intégrant des données socio-économiques, climatiques et territoriales. Le niveau de complexité des modèles à la base de ClimAléas Diag varie d'une filière à une autre et permet, dans certains cas, d'évaluer *in silico* des stratégies d'adaptation.

Pour en savoir plus sur le projet Fermadapt : <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/chercheur-etudiant/nos-projets-de-recherche/climat-et-qualite-de-lair/fermadapt/> et https://www.pole-valorial.fr/success_stories/fermadapt/.



Figure 9.2. Logo du projet Fermadapt.

► Références

- Adger W.N., 2006. Vulnerability, *Global Environmental Change*, 16, 268-281, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>.
- Afssa, 2007. Évaluation des risques liés à la présence de mycotoxines dans les chaînes alimentaires humaine et animale, rapport, 82 p.
- Agreste, 2022. Note de conjoncture n° 2022-146, 3 p, <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/IraPra22146/detail/>.
- AHDB, 2020. 2018 pig cost of production in selected countries (InterPIG), AHDB Pork, 29 p.
- Amand G., Aubert C., Bourdette C., Bouvarel I., Chevalier D., Dusantier A. *et al.*, 2004. La prévention du coup de chaleur en aviculture, *Sciences et Techniques Avicoles*, hors-série, 64 p.
- Averós X., Knowles T., Brown S.N., Warriss P.D., Gosálvez L.F., 2008. Factors affecting the mortality of pigs being transported to slaughter, *Veterinary Record*, 163, 386-390, <https://doi.org/10.1136/vr.163.13.386>.
- Bagath M., Krishnan G., Devaraj C., Rashamol V.P., Pragna P., Lees A.M. *et al.*, 2019. The impact of heat stress on the immune system in dairy cattle: A review, *Research in Veterinary Science*, 126, 94-102, <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2019.08.011>.
- 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, 24328, <https://doi.org/10.1038/srep24328>.
- Beillouin D., Schauberger B., Bastos A., Ciais P., Makowski D., 2020. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375, 20190510, <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>.
- Bishop-Williams K.E., Berke O., Pearl D.L., Hand K., Kelton D.F., 2015. Heat stress related dairy cow mortality during heat waves and control periods in rural Southern Ontario from 2010-2012, *BMC Veterinary Research*, 11, 291, <https://doi.org/10.1186/s12917-015-0607-2>.
- Boudon A., Khelil H., Ménard J.-L., Brunschwig P., Faverdin P., 2013. Les besoins en eau d'abreuvement des bovins laitiers : déterminismes physiologiques et quantification, *Inra Productions Animales*, 26, 249-262, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2013.26.3.3153>.
- Brown V.L., Rohani P., 2012. The consequences of climate change at an avian influenza 'hotspot', *Biology Letters*, 8, 1036-1039, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0635>.
- Burhans W.S., Rossiter Burhans C.A., Baumgard L.H., 2022. Invited review: Lethal heat stress: The putative pathophysiology of a deadly disorder in dairy cattle, *Journal of Dairy Science*, 105, 3716-3735, <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21080>.
- Campos P.H.R.F., Merlot E., Damon M., Noblet J., Le Floc'h N., 2014. High ambient temperature alleviates the inflammatory response and growth depression in pigs challenged with *Escherichia coli* lipopolysaccharide, *The Veterinary Journal*, 200, 404-409, <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2014.04.001>.
- Collin A., Lebreton Y., Fillaut M., Vincent A., Thomas F., Herpin P., 2001. Effects of exposure to high temperature and feeding level on regional blood flow and oxidative capacity of tissues of piglets, *Experimental Physiology*, 86, 83-91, <https://doi.org/10.1113/eph8602102>.
- Godde C.M., Mason-D'Croz D., Mayberry D.E., Thornton P.K., Herrero M., 2021. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence, *Global Food Security*, 28, 100488, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>.
- 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, 58, <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01150-7>.
- Havenstein G.B., Ferket P.R., Qureshi M.A., 2003. Carcass composition and yield of 1957 versus 2001 broilers when fed representative 1957 and 2001 broiler diets, *Poultry Science*, 82, 1509-1518, <https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1509>.
- Havret M., 2022. Relation entre stress thermique de chaleur et performances de reproduction en élevage bovin laitier : étude préliminaire à travers l'exemple d'un élevage en région Île-de-France, thèse d'exercice vétérinaire, faculté de médecine de Créteil, 71 p.

- Hirakawa R., Nurjanah S., Furukawa K., Murai A., Kikusato M., Nochi T. *et al.*, 2020. Heat stress causes immune abnormalities via massive damage to effect proliferation and differentiation of lymphocytes in broiler chickens, *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 46, <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00046>.
- Lacetera N., 2018. Impact of climate change on animal health and welfare, *Animal Frontiers*, 9, 26-31, <https://doi.org/10.1093/af/vfy030>.
- Liu C., Van der Fels-Klerx H.J., 2021. Quantitative modeling of climate change impacts on mycotoxins in cereals: a review, *Toxins*, 13, 276, <https://doi.org/10.3390/toxins13040276>.
- Lorusso A., Cappai S., Loi F., Pinna L., Ruiu A., Puggioni G. *et al.*, 2023. Epizootic hemorrhagic disease virus serotype 8, Italy, 2022, *Emerging Infectious Diseases*, 29, 1063-1065, <https://doi.org/10.3201/eid2905.221773>.
- Loyau T., Bedrani L., Berri C., Métayer-Coustard S., Praud C., Coustham V. *et al.*, 2015. Cyclic variations in incubation conditions induce adaptive responses to later heat exposure in chickens: a review, *Animal*, 9, 76-85, <https://doi.org/10.1017/s1751731114001931>.
- Magan N., Medina A., Aldred D., 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest, *Plant Pathology*, 60, 150-163, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02412.x>.
- Mandonnet N., Tillard E., Faye B., Collin A., Gourdine J.L., Naves M. *et al.*, 2011. Adaptation des animaux d'élevage aux multiples contraintes des régions chaudes, *INRAE Productions Animales*, 24, 41-64, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.1.3236>.
- Mayorga E.J., Kvidera S.K., Horst E.A., Al-Qaisi M., Dickson M.J., Seibert J.T. *et al.*, 2018. Effects of zinc amino acid complex on biomarkers of gut integrity and metabolism during and following heat stress or feed restriction in pigs, *Journal of Animal Science*, 96, 4173-4185, <https://doi.org/10.1093/jas/sky293>.
- Mayorga E.J., Renaudeau D., Ramirez B.C., Ross J.W., Baumgard L.H., 2019. Heat stress adaptations in pigs, *Animal Frontiers*, 9, 54-61, <https://doi.org/10.1093/af/vfy035>.
- Mellado M., Herrera C.D., De Santiago Á., Veliz F.G., Mellado J., Garcia J.E., 2023. Effect of heat stress and body condition score on the occurrence of puerperal disorders in Holstein cows, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 21, e0501, <https://doi.org/10.5424/sjar/2023212-19600>.
- Merlot E., Constancis C., Resmond R., Serviento A.M., Prunier A., Renaudeau D. *et al.*, 2018. Exposition à la chaleur pendant la gestation : adaptation de la femelle gestante et conséquences sur la composition du lait, la santé néonatale et la réactivité de l'axe corticotrope de la descendance. Données préliminaires chez le porc, 4^e Congrès de la SF-Dohad, Société francophone pour la recherche et l'éducation sur les origines développementales, environnementales et épigénétiques de la santé et des maladies, novembre 2018, Grenoble, France.
- Morignat E., Perrin J.-B., Gay E., Vinard J.-L., Calavas D., Hénaux V., 2014. Assessment of the impact of the 2003 and 2006 heat waves on cattle mortality in France, *PLoS ONE*, 9, e93176, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093176>.
- Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J. *et al.*, 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition, *Nature*, 510, 139-142, <https://doi.org/10.1038/nature13179>.
- Naqvi S.M.K., Kumar D., De K., Sejian V., 2015. Climate change and water availability for livestock: Impact on both quality and quantity, in V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad (Eds), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation*, 81-95, Springer India, New Delhi.
- Nardone A., Ronchi B., Lacetera N., Ranieri M.S., Bernabucci U., 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems, *Livestock Science*, 130, 57-69, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>.
- Nelson G.C., Rosegrant M.W., Koo J., Robertson R., Sulser T., Zhu T. *et al.*, 2009. *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*, I.F.P.R. Institute Eds, Washington, D.C., 57 p.
- Ouellet V., Boucher A., Dahl G.E., Laporta J., 2021. Consequences of maternal heat stress at different stages of embryonic and fetal development on dairy cows' progeny, *Animal Frontiers*, 11, 48-56, <https://doi.org/10.1093/af/vfab059>.
- Pottier E., Delaby L., Agabriel J., 2007. Adaptations de la conduite des troupeaux bovins et ovins aux risques de sécheresse, *Fourrages*, 191, 267-284.

- Renaudeau D., Collin A., Yahav S., de Basilio V., Gourdine J.L., Collier R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production, *Animal*, 6, 707-728, <https://doi.org/10.1017/s175173111002448>.
- Renaudeau D., Dourmad J.Y., 2021. Review: Future consequences of climate change for European Union pig production, *Animal*, Suppl 2:100372. doi: 10.1016/j.animal.2021.100372. 100372.
- Rückner A., Plagge L., Heenemann K., Harzer M., Thaa B., Winkler J. *et al.*, 2022. The mycotoxin deoxynivalenol (DON) can deteriorate vaccination efficacy against porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) at subtoxic levels, *Porcine Health Management*, 8, 13, <https://doi.org/10.1186/s40813-022-00254-1>.
- Ruget F., Durand J.L., Ripoche D., Graux A.-I., Bernard F., Lacroix B. *et al.*, 2013. Impacts des changements climatiques sur les productions de fourrages (prairies, luzerne, maïs) : variabilité selon les régions et les saisons, *Fourrages*, 214, 99-109.
- Rushton J., Lyons N., 2015. Economic impact of Bluetongue: a review of the effects on production, *Veterinaria Italiana*, 51, 401-406, <https://doi.org/10.12834/vetit.646.3183.1>.
- Santos R.R., Awati A., Roubos-van den Hil P.J., Tersteeg-Zijderveld M.H.G., Koolmees P.A., Fink-Gremmels J., 2015. Quantitative histo-morphometric analysis of heat-stress-related damage in the small intestines of broiler chickens, *Avian Pathology*, 44, 19-22, <https://doi.org/10.1080/03079457.2014.988122>.
- Skibiel A.L., Peñagaricano F., Amorín R., Ahmed B.M., Dahl G.E., Laporta J., 2018. In utero heat stress alters the offspring epigenome, *Scientific Reports*, 8, 14609, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32975-1>.
- Soussana J.-F., 2013. Prairies et changement climatique, *Fourrages*, 171-180.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., De Haan C., 2006. Livestock's long shadow, Environmental issues and options, FAO, Rome, 390 p.
- Thornton P., Nelson G., Mayberry D., Herrero M., 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century, *Global Change Biology*, 27, 5762-5772, <https://doi.org/10.1111/gcb.15825>.
- Tigchelaar M., Battisti D.S., Naylor R.L., Ray D.K., 2018. Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 115, 6644-6649, <https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115>.
- Van der Fels-Klerx H.J., van Asselt E.D., Madsen M.S., Olesen J.E., 2013. Impact of climate change effects on contamination of cereal grains with deoxynivalenol, *PLoS ONE*, 8, e73602, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073602>.
- Vinet A., Mattalia S., Vallée R., Bertrand C., Cuyabano B.C.D., Boichard D., 2023. Estimation of genotype by temperature-humidity index interactions on milk production and udder health traits in Montbeliarde cows, *Genetics Selection Evolution*, 55, 4, <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00779-1>.
- Vitali A., Felici A., Esposito S., Bernabucci U., Bertocchi L., Maresca C. *et al.*, 2015. The effect of heat waves on dairy cow mortality, *Journal of Dairy Science*, 98, 4572-4579, <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9331>.
- Yahav S., 2009. Alleviating heat stress in domestic fowl: different strategies, *World's Poultry Science Journal*, 65, 719-732, <https://doi.org/10.1017/S004393390900049X>.
- Zientara S., Sailleau C., Viarouge C., Höper D., Beer M., Jenckel M. *et al.*, 2014. Novel bluetongue virus in goats, Corsica, France, 2014, *Emerging Infectious Diseases*, 20, 2123-2125, <https://doi.org/10.3201/eid2012.140924>.

Partie 4

Adaptation de l'agriculture au changement climatique

Chapitre 10

Construire un cadre d'analyse et d'action pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique

Jean-Marc Touzard, Gabrielle Bouleau

L'accélération du changement climatique fait prendre conscience de ses multiples impacts sur les sociétés et met en avant la question de l'adaptation, sans réduire pour autant la nécessité de l'atténuation (IPPC, 2022). Un nouveau champ de recherche, d'expertise et d'action s'est développé pour répondre à cet enjeu d'adaptation, impliquant un nombre croissant de scientifiques de disciplines différentes (Magnan et Ribera, 2016; Owen, 2020). Depuis 2014, le Giec définit ainsi l'adaptation au changement climatique comme «une démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences», en précisant que «pour les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques; pour certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences» (Allwood *et al.*, 2014). Cette définition générale, se référant à la fois aux systèmes humains et naturels, se décline aujourd'hui dans les travaux scientifiques selon différents types d'écosystèmes ou de secteurs économiques, notamment l'agriculture.

L'agriculture est en effet particulièrement concernée par l'adaptation au changement climatique : ses activités et ses produits sont très dépendants des conditions climatiques locales et donc fortement exposés et impactés par le changement climatique, à travers les rendements, la qualité ou la localisation des productions (voir chapitres 6 à 9). Ces impacts directs ont aussi des effets potentiels en cascade sur d'autres enjeux globaux, comme la sécurité alimentaire, la santé et les migrations humaines, la conservation des ressources en eau ou la biodiversité (Campbell *et al.*, 2011; Soussana, 2013). Des institutions nationales ou internationales promeuvent ainsi une approche élargie des recherches sur l'adaptation de ce secteur, à l'image des initiatives de la FAO autour de la *climate-smart agriculture* (Lipper *et al.*, 2014) ou des derniers rapports du Giec pointant un besoin crucial de nouvelles connaissances sur la gestion des agroécosystèmes et des systèmes alimentaires (IPCC, 2019; IPCC, 2022).

En France, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) a structuré depuis 2011 une communauté de recherche sur l'adaptation au changement climatique, à travers le métaprogramme Adaptation au

changement climatique de l'agriculture et de la forêt (Accaf), puis à partir de 2022, le métaprogramme CLIMAE. Ce chapitre s'appuie sur les travaux d'Accaf et sur une revue de littérature pour faire un état des lieux des approches de l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture et pour ouvrir des perspectives pour les études et les recherches en cours ou à venir. Dans un premier temps, nous revenons sur l'évolution des définitions et des usages de la notion d'adaptation et sur sa mobilisation encore récente dans les recherches sur le changement climatique et dans l'agriculture. Nous présentons ensuite un cadre d'analyse adapté à l'agriculture, à partir des résultats des projets Accaf. Nous terminons en pointant comment l'enjeu de l'adaptation au changement climatique modifie aussi les manières de faire de la recherche.

► Adaptation : de l'usage commun à un concept scientifique pour l'agriculture face au changement climatique

Si elles sont relativement récentes, les recherches sur l'adaptation au changement climatique s'enracinent dans une histoire plus longue de définitions et d'usages de la notion d'adaptation, d'abord dans un sens commun, puis en biologie et sciences de l'environnement, puis en sciences humaines et sociales, aboutissant aujourd'hui à des définitions interdisciplinaires ciblées sur l'enjeu climatique, promues par les instances internationales et appliquées à l'agriculture (Simonet, 2009; Orlove, 2022).

Une notion qui se construit entre sciences biologiques et sociales

Dès ses premiers usages au XVI^e siècle, le terme *adaptation* désigne à la fois des actions (ajuster, mettre en conformité) et un état (convenir, être adapté à). Il concerne d'abord l'usage de mots dans un texte, ou la pertinence d'un comportement au regard d'un événement ou d'une situation sociale. Si cet usage commun s'est poursuivi (adaptation d'un texte pour le théâtre, ajustement d'un objet à un nouvel usage technique, etc.), l'adaptation est devenue une notion scientifique à partir du XIX^e siècle avec le développement de la biologie (Rose et Lauder, 1996). Sous l'influence des travaux de Darwin, le terme a pris une place importante pour caractériser les relations entre un organisme vivant, une population ou une espèce et son milieu naturel, puis l'évolution à long terme de ces relations, associées au processus de sélection naturelle. Les biologistes ont étudié ces évolutions en étudiant des systèmes vivants à différentes échelles (cellule, individu, population, espèce, écosystème, etc.), en montrant comment leur état résultait de différents processus, et en pointant des différences de nature et de temporalité dans les interactions entre ces systèmes et leurs environnements : l'adaptation à court terme d'une entité biologique face à un stress (une réaction ou un changement physiologique, comportemental ou morphologique) est complétée par l'adaptation à long terme et à différentes échelles, par la transformation des caractéristiques génétiques, de composition, d'interactions ou même de localisation d'une population ou d'un écosystème (Smit et Wandel, 2006). Dans ces travaux, les biologistes cherchaient à qualifier une adaptation spontanée ou autonome, c'est-à-dire reposant sur des mécanismes indépendants d'une action humaine qui intégrerait des enjeux de changement du système.

À partir du milieu du XX^e siècle, la notion d'adaptation s'est étendue aux sciences humaines et sociales (Orlove, 2005). Des travaux en psychologie l'utilisent pour rendre compte des capacités d'un individu à faire face à de nouvelles circonstances,

en modifiant ses perceptions ou ses comportements; d'autres travaux en sociologie l'étendent aux aptitudes à intégrer un groupe social; d'autres encore en anthropologie développent l'idée que la diversité et l'évolution des cultures relèvent aussi de processus d'adaptation à long terme des sociétés. La notion va aussi s'affirmer en économie, sciences de gestion ou sciences politiques en intégrant une visée stratégique. L'adaptation résulte alors de décisions individuelles ou collectives qui modifient des comportements et/ou mettent en œuvre des actions pour atteindre un objectif face à un contexte changeant, parfois imprévisible (Füssel, 2007). Les stratégies d'adaptation d'un individu, d'une entreprise ou d'une organisation sociale sont donc associées à différents horizons possibles et à la résolution de problèmes ou même de crises, pour se maintenir ou pour améliorer une situation. Elles s'appuient sur la mobilisation de nouvelles ressources, sur la construction de connaissances, d'institutions et de réseaux. Elles peuvent être étudiées *ex ante* (en situation de décision), observée *ex post* ou analysées *in itinere*. Dans cette acception stratégique, on parle d'adaptation planifiée en faisant explicitement référence à l'action humaine intentionnelle, visant à modifier les conditions de réponse du système considéré.

À la fin des années 1990, les définitions biologiques et stratégiques de l'adaptation s'enrichissent de recherches associant les sciences écologiques et sociales, portées notamment par la Resilience Alliance et la revue *Ecology and Society*. La notion de gestion adaptive des ressources naturelles et des systèmes socio-écologiques va ainsi donner lieu à une littérature croissante qui prône un processus rationnel itératif de gestion fondé sur l'apprentissage d'acteurs en incertitude face à l'évolution d'un écosystème qui a ses propres mécanismes d'adaptation (Berkes et Folke, 1998). Chaque cycle adaptatif intègre l'identification de problèmes, la définition d'objectifs, la collecte d'informations, l'exploration de scénarios et d'actions, leur mise en œuvre, leur suivi et évaluation, puis leur révision qui ouvre un nouveau cycle adaptatif (Gunderson et Holling, 2002). Ces travaux insistent sur les enjeux de participation et de renforcement des capacités des acteurs, élargissent les notions d'adaptation et de résilience aux transformations du système, pointent l'importance de prendre en compte différents enjeux, dont le changement climatique (Moser et Ekstrom, 2010). L'articulation de ces différents cycles adaptatifs est théorisée à travers la notion de panarchie (Berkes et Ross, 2016).

L'affirmation récente des recherches sur l'adaptation face à l'enjeu climatique

L'usage interdisciplinaire de la notion d'adaptation va surtout s'affirmer à partir des années 2000 pour traiter des réponses humaines aux impacts du changement climatique (IPCC, 2001), donnant lieu à une série de définitions, spécifications et débats orchestrés par les rapports successifs du Giec ou des COP (Orlove, 2022), et alimentés par des recherches de terrain de plus en plus nombreuses. Au-delà de la définition générale retenue par le Giec (voir l'introduction de ce chapitre), la plupart des définitions insistent sur sa composante stratégique et sociale, c'est-à-dire sur l'ensemble des processus et des actions mis en œuvre par une organisation sociale pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et pour bénéficier des opportunités qu'il peut offrir (Hallegate *et al.*, 2011). De multiples domaines et qualifications de l'adaptation sont alors proposés, maintenant un certain flou sur la notion, mais constituant aussi un cadre analytique minimal, accepté par une communauté épistémique en

construction sur l'adaptation au changement climatique. Les premiers travaux retiennent ainsi cinq dimensions principales :

- les processus et les actions de l'adaptation concernent différents domaines tels que les systèmes écologiques (incluant des solutions fondées sur la nature), les organisations économiques, les changements technologiques, les infrastructures, les politiques publiques, l'évolution des comportements, des institutions et des valeurs humaines ;
- les actions peuvent se construire et se combiner à différentes échelles de temps (court, moyen et long terme) et d'espace (du local à l'international), leur croisement constituant un premier cadre analytique facile à appliquer par des approches sectorielles, notamment agricoles (Barbeau *et al.*, 2014) ;
- l'adaptation peut être simplement réactive lorsqu'elle est rapide et *ex post* face à des impacts observés, ou anticipative, lorsque les acteurs prennent en compte des impacts possibles à moyen ou long terme ;
- les actions peuvent avoir différentes intensités de changement sur le système, depuis une adaptation incrémentale, qui modifie à la marge ses caractéristiques, jusqu'à des adaptations transformatives, qui peuvent changer ses composantes, ses relations et ses fonctions (Kates *et al.*, 2012) ;
- l'adaptation peut enfin s'articuler de différentes manières aux actions d'atténuation, avec des cobénéfices possibles (par exemple rénovation thermique, lutte contre l'érosion, reboisements intégrant l'évolution climatique, etc.), mais aussi des temporalités différentes et des effets qui peuvent être contradictoires, ouvrant de nombreuses discussions scientifiques ou politiques (voir chapitre 7).

Les deux derniers rapports du Working Group II du Giec (« *Impact, adaptation and vulnerability* ») (IPCC, 2014 et 2022) accordent encore plus de place à l'adaptation, mettant en avant d'autres dimensions (Orlove, 2022) :

- les liens entre adaptation et résilience sont développés, précisés, associant plus clairement l'adaptation à une évaluation de l'impact, de l'exposition et de la vulnérabilité du système, amenant à prendre en compte les impacts résiduels, qui subsistent après une adaptation réactive ;
- la comparaison scientifique des options d'adaptation est encouragée, par la mesure de leurs effets et de leur évaluation économique (Fankhauser, 2017) ;
- les actions d'adaptation s'inscrivent dans des processus d'exploration de solutions, constituant des espaces de solutions qu'il faut construire, y compris en imaginant des solutions en rupture avec l'existant ;
- les rapports pointent clairement la question des maladaptations, c'est-à-dire le repérage de processus qui se traduisent *in fine* (de manière non intentionnelle) par un accroissement de la vulnérabilité du système, une altération de ses capacités et des opportunités futures d'adaptation ;
- la prise en compte de ces maladaptations conduit à préciser les évaluations d'impacts de différentes options, en privilégiant des solutions sans regrets, qui peuvent procurer des avantages, quelles que soient les évolutions climatiques ;
- la notion de *climate action gap* est proposée pour décrire le décalage possible entre les actions réalisées et les objectifs sociétaux recherchés ;
- enfin, l'analyse des risques multiples liés au changement climatique prend de l'ampleur, conduisant à mettre au centre de l'adaptation un processus de gestion itérative des risques (IPCC, 2019), avec des enjeux majeurs de justice sociale vers les territoires ou les catégories sociales les plus vulnérables.

Dans son analyse des usages croissants de la notion d'adaptation dans les documents internationaux du Giec ou de l'UNFCCC, Orlove (2022) retient trois questions majeures qui restent en discussion : (1) la prise en compte des relations entre adaptation et atténuation reste un chantier ouvert, en particulier dans les scénarios, dans les arbitrages de financement ou dans l'action publique ; (2) les difficultés à mesurer techniquement des actions, des stratégies ou des politiques d'adaptation sont toujours prégnantes au regard notamment des multiples critères du développement durable ; (3) la formalisation de l'enchaînement des processus et des actions d'adaptation selon différents cycles et pas de temps pousse à s'interroger sur l'analyse *ex ante* de chemins d'adaptation et en particulier sur la prise en compte du moyen terme. Ces questions sont présentes depuis une vingtaine d'années, mais elles montent en puissance notamment dans des programmes de recherche internationaux comme Adaptation Sciences Research Program (AdSci)⁴¹ ou le World Adaptation Science Programme des Nations unies⁴², tournés vers la production de connaissances pour les décideurs politiques, en particulier pour ceux des pays les plus vulnérables.

L'agriculture, domaine de recherche sur l'adaptation au changement climatique

Alimentant les synthèses ou les programmes internationaux, la question de l'adaptation au changement climatique s'est développée et précisée à travers des recherches ciblées sur des territoires ou des secteurs, et en particulier sur l'agriculture (FAO, 2007 ; Soussana, 2013), puis sur les systèmes alimentaires (HLPE, 2019). Les travaux sur l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture ont fait l'objet de plusieurs synthèses et revues de littérature (Howden *et al.*, 2007 ; Anwar *et al.*, 2013 ; Torquebiau, 2015 ; Thottadi, 2024). Celles-ci montrent la forte croissance des publications sur ce thème, mais surtout l'existence de différentes communautés scientifiques qui y contribuent, avec une diversité d'orientations disciplinaires, de domaines ou d'échelles d'analyse.

En phase avec les travaux des instances internationales (Giec, FAO, OCDE, etc.), des synthèses sont publiées sur l'adaptation de l'agriculture à des échelles continentales ou nationales, en considérant différentes options de changements techniques, d'intensification agricole, de politiques publiques ou de relocalisation, et en les évaluant au regard d'enjeux de production, de sécurité alimentaire ou du développement durable. À cette échelle macroscopique, l'adaptation de l'agriculture est abordée par des évaluations fondées sur des modélisations ou des méta-analyses (Tubiello *et al.*, 2007 ; Lobell et Burk, 2010 ; Challinor *et al.*, 2014 ; Cobourn, 2023).

D'autres publications se focalisent sur les liens entre l'adaptation de l'agriculture et l'évolution ou la gestion des ressources qu'elle utilise, en particulier l'eau (Iglesias et Garote, 2015), mais aussi les sols, les écosystèmes, prolongeant parfois les travaux sur la gestion adaptive des systèmes socio-écologiques (Moser et Ekstrom, 2010). Ces recherches peuvent rejoindre des approches territoriales, où l'adaptation de l'agriculture est considérée dans ses interactions avec d'autres activités, et la construction de stratégies ou politiques climatiques locales (Galan *et al.*, 2023).

41. <https://cpo.noaa.gov/divisions-programs/climate-and-societal-interactions/the-adaptation-sciences-program/>

42. <https://www.unep.org/topics/climate-action/adaptation/world-adaptation-science-programme>

Des travaux à l'échelle de filières agricoles ou des systèmes alimentaires prennent en compte les interactions possibles entre les acteurs et les opérations techniques, économiques et politiques pour s'adapter. Ils soulignent généralement l'importance d'une gouvernance pour l'adaptation à cette échelle (Vermeulen *et al.*, 2012), impliquant une révision des formes d'accompagnement des entreprises agricoles, y compris en matière de conseil, de formation et de recherche (Boyer et Touzard, 2021).

Parallèlement, des travaux centrés sur les exploitations agricoles (en agronomie, sciences sociales, *farming system approach*) étudient l'adaptation au changement climatique en analysant les changements de pratiques ou de systèmes, les décisions ou stratégies associées, les facteurs qui les orientent ou jouent sur les performances, la résilience ou la différenciation des agriculteurs (Reidsma *et al.*, 2010; Altieri *et al.*, 2015; Debaeke *et al.*, 2017). Des analyses économiques se développent aussi à cette échelle en proposant des évaluations coûts-bénéfices d'options d'adaptation ou en intégrant la gestion des risques (Magesa *et al.*, 2023).

Enfin, beaucoup de publications se réfèrent de manière plus contextuelle à l'adaptation de l'agriculture au changement climatique en restant associées à une discipline biotechnique (génétique, écophysiologie, transformation agroalimentaire, etc.) et en étudiant une composante, un processus ou une technologie à l'échelle de plantes, d'animaux ou de produits. Au-delà d'une contextualisation et d'une justification de recherches en cours, le changement climatique pose aussi de nouvelles questions, et peut amener à modifier les méthodes d'analyse, à intégrer plusieurs dimensions du changement climatique (stress thermique, hydrique, etc.) ou de nouvelles formes d'incertitudes (Soussana, 2013).

Ce repérage des grandes catégories de publications sur l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture peut être confronté à une analyse bibliométrique récente (Laur *et al.*, 2024) réalisée sur le Web of Science en croisant les termes *agriculture*, *adaptation au changement climatique* et *mitigation* (encadré 10.1). Cette analyse rejoint les catégories de communautés repérées sur l'adaptation, mais montre aussi qu'elles ont intégré différemment l'enjeu d'atténuation.

Encadré 10.1. Les communautés épistémiques au croisement de l'atténuation et de l'adaptation pour l'agriculture

Une analyse scientométrique a été conduite à INRAE par Laur *et al.* (2024) à partir du Web of Science (WoS) pour identifier les communautés de recherche qui traitent à la fois de l'atténuation des émissions et de l'adaptation au changement climatique dans les champs de l'agriculture et de l'environnement, entre 2010 et 2021. L'analyse des réseaux de cocitation de ces références a été faite en deux temps. Un premier regroupement par revues citées a fait ressortir des grands ensembles de travaux qui partagent les mêmes enjeux thématiques. Un second regroupement par auteurs cités au sein de ces enjeux a permis d'identifier une trentaine de communautés qui abordent des objets de recherche plus précis avec des approches particulières. Des entretiens approfondis avec des chercheurs spécialistes de ces thématiques ont permis d'interpréter ces groupes en tant que communautés scientifiques partageant les mêmes approches et/ou les mêmes objets. Elles sont présentées dans le tableau 10.1.

Tableau 10.1. Enjeux, objets et approches des communautés de recherche (cocitations du WoS).

Grands enjeux croissant adaptation et atténuation	Objets de recherche pour répondre à ces enjeux	Approches des scientifiques travaillant sur ces objets
Dilemmes et arbitrages politiques au niveau mondial	Énergie et carbone	Grand cycle du carbone
	<i>Climate-smart agriculture</i> , scénarios d'usage des sols, alimentation	Modélisation économique, modèles d'évaluation intégrée
	Résilience, vulnérabilité	Socio-écosystèmes
	Analyse du risque	Analyse des comportements
	Politiques environnementales	Socio-écosystèmes, interdépendance, pouvoir et représentations, villes
Forêts et feux	Économie de l'adaptation de l'agriculture	Économétrie, évaluation intégrée des risques et impacts à très long terme
	Études de la perturbation feu	Écologie des feux
	Adaptation des forêts au feu	–
	Tourbières et prairies sèches	–
	Écologie fonctionnelle et des communautés	Méthode fonctionnelle
	Génétique forestière, biodiversité et conservation, risque de disparition	Génétique et modélisation du climat, corrélation structure forestière/climat
Sols	Résilience, large échelle	Modèle, gestion structure, forêt boréale
	Émission de méthane et N ₂ O et matière organique, riz et élevage, fertilisation	Très petite échelle, processus plantes, sols atmosphère, microbiologie, atténuation
	Carbone dans le sol, persistance, biochar	Méthodes d'analyse
	Matière organique dans les sols	Effet des pratiques, effet élevage, atténuation
	Usages des sols, <i>climate-smart agriculture</i>	Agronomie, élevage, agroforesterie
	Cycle de l'azote, réduction N ₂ O	Écologie microbienne du sol, effet sécheresse
Eau	Impact du changement climatique sur les grands cycles de l'eau	Modélisation, hydrologie, débits en rivière
	Bilan carbone et écologie terrestre à l'échelle planétaire, zones humides et tourbières	Biogéochimie, isotopes, physiologie des plantes et stress hydrique
	Impact des feux de forêt sur l'hydrologie	Télédétection, approche spatiale
	Hydrologie et climat aux échelles régionales	Descente d'échelle, hydrologie globale, modèles régionaux

Tableau 10.1. (suite)

Grands enjeux croissant adaptation et atténuation	Objets de recherche pour répondre à ces enjeux	Approches des scientifiques travaillant sur ces objets
Bioénergie	Analyse du cycle de vie, fondements et applications	Développement méthodologique
	Déchets et bioénergie	Apports méthodologiques
Écophysiologie	Réponse des plantes à la sécheresse, à la température et au CO ₂	Synthèses et modélisations
	Régulation hydrique des plantes	Synthèses

Cette analyse montre que certains sujets sont peu abordés dans ce corpus. Il s'agit notamment de l'agronomie des systèmes, à une échelle intermédiaire entre la parcelle et la région, avec des questionnements sur la préservation des revenus et des ressources, la gouvernance à l'échelle des territoires et des filières (vigne, élevage), la gestion des bioagresseurs, l'agroécologie et l'alimentation. Cela ne signifie pas que ces travaux n'existent pas, mais qu'ils sont sous-représentés dans les articles référencés par le WoS et les pratiques de citation, qui tendent par ailleurs à sur-représenter les travaux anglophones et occidentaux.

La plupart des publications se réfèrent à la définition générale de l'adaptation du Giec en la spécifiant selon les objets ou les systèmes agricoles étudiés, avec différentes échelles temporelles ou spatiales, catégories de solutions ou d'actions. Ces publications mettent aussi en évidence des conditions de l'adaptation spécifiques à l'agriculture (Touzard, 2018) :

- l'importance des processus biologiques et écologiques rend l'activité agricole dépendante du climat, implique une vulnérabilité forte face au changement climatique, demande une analyse fine des impacts et des réponses adaptatives, et appelle aussi à la recherche de solutions fondées sur la nature;
- l'ancrage territorial de l'agriculture la place au centre d'enjeux territoriaux, sur l'utilisation des terres et sur la gestion de ressources locales, naturelles et sociales, ouvrant la voie au développement de *place-based solutions*;
- de nombreux leviers potentiels d'adaptation sont spécifiques au secteur, allant des changements de variétés et de pratiques agricoles, jusqu'aux modifications de comportements alimentaires, en passant par des stratégies de relocalisation, de gestion de ressources et d'équipements ou des changements organisationnels et politiques;
- les caractéristiques des acteurs du secteur agricole et alimentaire, avec de nombreux producteurs et consommateurs et des intermédiaires souvent concentrés, mais aussi des institutions et politiques agricoles, constituent des cadres particuliers pour la construction et la coordination de l'adaptation;
- la diversité des exploitations et des systèmes agricoles est souvent importante, avec une coexistence de paradigmes ou régimes sociotechniques qui orientent ou parfois verrouillent les options d'adaptation, notamment sur l'usage de technologies ou sur l'écologisation des pratiques;
- les connaissances à prendre en compte sont non seulement celles produites par les domaines scientifiques concernés (sciences de la vie et sciences sociales), mais surtout les savoirs locaux portés par les agriculteurs et les connaissances des consommateurs.

Ces spécificités conduisent à envisager un cadre d'analyse et une démarche qui seraient propres aux recherches sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Cette perspective a été poursuivie par des travaux initiés dans le métaprogramme Accaf de l'Institut national pour la recherche agronomique (Inra, devenu INRAE en 2020).

► **Enseignements des projets conduits dans le cadre du métaprogramme Accaf**

Émergence et institutionnalisation de recherches sur l'adaptation au changement climatique à l'Inra

La question de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique est apparue progressivement à partir de la fin des années 1990 dans les travaux de l'Inra, avant de s'inscrire clairement à partir de 2010 dans sa programmation de recherche. Cette question avait d'abord été portée à titre individuel par des chercheurs impliqués dans des projets internationaux sur l'atténuation et sur le changement climatique, ou dans des études sur l'impact de ces changements sur la gestion de l'eau, de certains écosystèmes (prairies, forêts, etc.) ou de filières (vigne et vin, céréales, etc.). Elle s'est ensuite affirmée en 2010 avec l'inscription de l'enjeu climatique comme l'une des quatre priorités du projet scientifique de l'Inra (Inra, 2010) et surtout avec l'animation d'un atelier de réflexion prospective de l'ANR (Adage, 2011), montrant en particulier le faible nombre de travaux sur ce thème dans l'institut et un besoin crucial de nouvelles connaissances (Soussana, 2013). Pour y répondre, la direction générale de l'Inra a lancé dès 2011 le métaprogramme Accaf, qui va durer dix ans et se prolonger à partir de 2021 par le métaprogramme CLIMAE.

L'ambition d'Accaf était de produire de nouvelles connaissances sur l'adaptation au changement climatique, mais aussi de construire une communauté interdisciplinaire et d'affirmer la reconnaissance de l'Inra sur ce thème à l'international. Pour cela, sept objectifs clés avaient été fixés, dans un continuum partant d'une meilleure connaissance régionalisée des scénarios climatiques, des impacts et risques climatiques (nécessaire pour pouvoir s'adapter), passant par le renforcement des capacités d'adaptation des agrosystèmes et de leurs filières (notamment par le biais de l'amélioration génétique), pour aller jusqu'au développement d'innovations, d'actions collectives ou de mesures, et de leur évaluation (Caquet *et al.*, 2015). L'identification et le suivi des thèmes couverts par les actions d'Accaf se sont appuyés sur un tableau croisant d'une part les différents pas de temps possibles des réponses adaptatives des systèmes étudiés, depuis la gestion à court terme des risques et des opportunités, jusqu'aux options d'adaptation à long terme, et d'autre part, les démarches de recherche qui pouvaient être adoptées : observation, expérimentation et modélisation, analyses multicritères, coconstruction d'innovations et de stratégies d'adaptation.

Avec un comité de pilotage composé de dix scientifiques, un directeur et un ingénieur de gestion, mais aussi un conseil scientifique international et un conseil de partenaires socio-économiques, Accaf s'est doté d'une gouvernance pour construire une véritable animation scientifique, permettant le financement et le suivi de plusieurs types d'actions : – le lancement d'appels à manifestation d'intérêt internes (2011, 2012 et 2017) débouchant sur la sélection et le financement de 25 projets qui pouvaient être soit exploratoires (2 ans, 50 k€ au maximum) soit structurants (jusqu'à 4 ans, 400 k€ au maximum) ;

- le cofinancement d'une vingtaine d'actions internationales, notamment des Eranet (European Research Area Networks) comme l'ERA4CS (Espace européen de la recherche pour les services climatiques), mais aussi d'initiatives internationales de modélisation agricole (AgMIP, Macsur) ou d'échanges de scientifiques, par exemple avec le CSIRO, l'institut de recherche australien très impliqué dans la recherche sur le changement climatique;
- le cofinancement de quatorze doctorants, associés ou non aux projets sélectionnés;
- le soutien à une dizaine de projets de valorisation des résultats des travaux académiques vers les utilisateurs finaux, par exemple l'édition d'ouvrages ou de numéros spéciaux de revues, ou l'appui à des plateformes de services climatiques (changement climatique-Safe);
- l'organisation ou le financement de séminaires, formations et écoles d'été, par exemple sur différents thèmes comme la prospective et la modélisation spatiale ou l'approche socio-écologique de la résilience et de la vulnérabilité pour l'adaptation des agroécosystèmes.

En définitive, Accaf a soutenu une cinquantaine d'actions avec des productions scientifiques, académiques ou appliquées, pouvant aborder de différentes manières l'adaptation. L'animation scientifique du programme a aussi produit des cadres d'analyse et des synthèses participant à la progression des connaissances interdisciplinaires sur l'adaptation au changement climatique.

Les enseignements des projets Accaf pour analyser l'adaptation

Une analyse des projets soutenus par le métaprogramme Accaf a été menée en 2020 par un groupe de scientifiques⁴³ de sa cellule d'animation. L'objectif était d'évaluer si les projets avaient bien répondu aux objectifs du programme, mais aussi de voir si l'enjeu de l'adaptation au changement climatique avait modifié la manière de faire de la recherche, et notamment d'enrichir les méthodes et les cadres d'analyse interdisciplinaires de l'adaptation. Cette analyse a été réalisée à partir des rapports finaux des projets et de leurs évaluations scientifiques. Chaque projet a ainsi été positionné par le groupe dans une matrice croisant les échelles temporelles des adaptations étudiées et les méthodes utilisées (voir section précédente), puis caractérisé selon trois autres critères : l'intensité des adaptations (incrémentales, systémiques, radicales); l'échelle du processus étudié, du gène jusqu'à la planète; le niveau d'interdisciplinarité des recherches. Par ailleurs, les perceptions des porteurs de chaque projet sur l'impact des travaux ont été prises en compte à partir d'une enquête réalisée en complément de la remise des rapports finaux.

L'analyse du positionnement des projets dans la matrice Accaf a d'abord montré un décalage important entre, d'une part, la couverture des thématiques et des méthodes souhaitée par le programme et, d'autre part, les réalisations effectives des projets. Ceux-ci se sont en effet majoritairement orientés vers des options à moyen terme en mobilisant avant tout des expérimentations ou des outils de modélisation. Plusieurs projets se sont certes appuyés sur l'observation de processus en cours ou sur la coconstruction d'innovations ou de stratégies, mais très peu ont finalement considéré des options d'adaptation à long terme. Plus de la moitié des projets sont également restés ciblés sur des adaptations

43. Nathalie Breda, Stéphane de Cara, Philippe Debaeke, Karine Chalvet-Monfray, Chantal Gascuel, Barbara Lacor, Bénédicte Quilot, Jean-Marc Touzard.

incrémentales, en réponse par exemple à un stress thermique ou hydrique. Ceux qui ont pu développer des approches systémiques ne sont généralement pas allés jusqu'à envisager des options transformatives, plus radicales. En revanche, la diversité des échelles d'analyse a été bien couverte, parfois au sein d'un même projet, à l'image du projet Laccave sur la vigne et sur le vin, associant des analyses allant de la sélection variétale jusqu'à la construction d'une politique climatique (Ollat et Touzard, 2024). Enfin, l'interdisciplinarité des recherches a souvent été limitée à des collaborations entre disciplines proches, même si plusieurs projets, les plus importants en matière de financements et de participants, ont réussi à associer disciplines biotechniques et sciences sociales, autour de cadres d'analyse et d'actions communes.

En matière d'impact, la satisfaction des porteurs de projet est générale sur le plan scientifique et reconnue par les évaluateurs : plus de 275 articles sur le Web of Science mentionnent par exemple les projets ou le programme Accaf entre 2011 et 2019, et de nouvelles questions et collaborations scientifiques sont indiquées dans tous les projets. Cependant, les porteurs considèrent que l'impact socio-économique de leurs projets est encore modeste, avec une grande diversité de situations, témoignant de recherches encore en émergence, face à des enjeux vus pourtant comme très forts par tous : pour l'action publique, les impacts sont concentrés sur quelques projets qui concernent la prévention de risques, notamment sanitaires (pollens, tiques, etc.), la coconstruction de scénarios à des échelles nationales, territoriales ou sectorielles, ou des expertises ; pour les acteurs économiques, les impacts sont limités à la diffusion d'informations ou d'indicateurs, à un premier développement de solutions techniques (nouvelle variété ou système de culture), à une contribution à la réalisation d'outils d'aide à la décision ou de cahiers des charges. Toutefois, les retombées sont jugées plus nombreuses pour ce qui est de la formation (Mooc, licences, masters, doctorats, séminaires internationaux, écoles de recherche), et surtout en matière d'impacts vers la société civile, à travers la participation croissante et souvent nouvelle des scientifiques dans les médias ou à des événements professionnels et grand public.

Les analyses des projets font donc ressortir un bilan mitigé, avec des résultats très positifs au regard de la production académique, l'ouverture de nouvelles questions de recherche, la construction de réseaux ou la communication pour l'Inra, mais des résultats un peu décevants au regard de la couverture des objectifs fixés, du caractère limité de l'interdisciplinarité ou des approches partenariales et collaboratives. Plusieurs éléments peuvent expliquer ces difficultés : la durée et le financement relativement faibles des projets, des contraintes administratives limitant la participation de partenaires ne dépendant pas de l'Inra, la prégnance d'incitations disciplinaires et académiques pour l'évaluation des chercheurs, ou encore des stratégies opportunistes de chercheurs considérant l'adaptation au changement climatique comme un nouvel argument pour prolonger des travaux déjà engagés. Mais la difficulté majeure a été surtout de pouvoir construire (rapidement) de nouvelles compétences et de sortir des cadres conceptuels et des pratiques antérieures. Plusieurs projets d'envergure ont toutefois réussi à développer une interdisciplinarité forte, associée à des démarches partenariales ou participatives, à l'image de Laccave dont le succès peut être lié à sa durée (dix ans) et à une filière très organisée où les acteurs économiques étaient dès 2012 conscients des impacts du changement climatique et questionnaient les chercheurs sur les options d'adaptation (Ollat *et al.*, 2016). Mais malgré cette évaluation mitigée, la diversité des projets d'Accaf a nourri de nombreuses

réflexions collectives au sein des instances de gouvernance du programme, en particulier lors de son séminaire final à la fin 2019, permettant de proposer un cadre et une démarche d'analyse génériques pour étudier l'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

Vers un cadre d'analyse de l'adaptation pour les systèmes agricoles et alimentaires

Les évaluations et les synthèses des projets Accaf, complétées par une revue de littérature, permettent en effet de préciser un cadre et une démarche pour analyser comment la question de l'adaptation au changement climatique dans les systèmes agricoles peut se construire à l'échelle de projets de recherche. Cinq dimensions ou étapes peuvent être suggérées depuis la caractérisation du système étudié et de son exposition au changement climatique, jusqu'à l'évaluation de chemins d'adaptation et l'implication des chercheurs dans le renforcement des capacités des acteurs.

Le premier point est la caractérisation du système agricole ou alimentaire concerné par l'adaptation, de son exposition et de sa vulnérabilité face au changement climatique. Il s'agit de définir le périmètre, l'échelle et les entités du système (ou de l'objet) étudié et de son contexte, depuis la plante ou l'animal jusqu'aux systèmes sociaux, en passant par la parcelle ou le troupeau, l'exploitation agricole, le territoire et les filières, etc. La nature des impacts du changement climatique sur ce système peut être précisée avec une analyse (plus ou moins développée) de son exposition et de sa vulnérabilité aux changements climatiques (tendances et variabilité), à la fois sur une base historique, et au regard d'un ou de plusieurs scénarios climatiques pour le futur. Pour cela, il convient d'identifier d'une part, les processus naturels, biologiques et écologiques (cycle de l'eau, sols, plantes, ravageurs, écosystèmes) concernés par ces impacts et susceptibles d'être activés par les actions d'adaptation et, d'autre part, les acteurs et les ressources dont ils disposent pour développer leur activité et qu'ils ont déjà pu mobiliser face à des perturbations ou à des événements climatiques (résilience observée possible du système).

Une deuxième dimension ou étape est l'exploration de l'espace des actions possibles, de leurs horizons, leurs échelles et leurs intensités au regard de scénarios climatiques. Ces actions doivent pouvoir être reliées aux composantes, aux processus et aux impacts du changement climatique identifiés précédemment, et aux ressources (matérielles, humaines) possibles pour l'adaptation, éventuellement à différentes échelles. Elles peuvent couvrir un large éventail : innovations variétales, changements de pratiques et de systèmes agricoles ou alimentaires, relocalisation et stratégies spatiales, développement d'infrastructures, changements organisationnels et institutionnels, développement du capital humain et social, recherche et développement, etc. Chaque action peut être caractérisée selon son horizon temporel de mise en œuvre et d'effet attendu (court, moyen ou long terme), avec des combinaisons possibles de temporalités. Elle peut être aussi qualifiée selon l'intensité possible du changement attendu, depuis l'ajustement jusqu'à la transformation du système. Un premier cadrage analytique simple, sous forme de tableau ou schéma, peut être proposé en associant la nature de ces actions et leurs échelles et horizons temporels.

La définition de critères, de métriques et de méthodes d'évaluation des actions (mesurables, reportables, vérifiables) est une dimension ou une étape importante, aujourd'hui mise en avant pour toutes les échelles de l'action climatique (UNFCCC, 2023).

Les indicateurs peuvent porter sur les résultats de l'activité agricole (production en volume, valeur, qualité, etc.), sur les ressources ou sur les facteurs de production mobilisés et leurs productivités (eau, foncier et sol, travail, etc.). Ils peuvent aussi s'étendre à d'autres domaines proposés par les évaluations de la durabilité de l'activité agricole, sans oublier l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre. La définition de situations et d'évolutions de référence (historique récent, évolution avec adaptation seulement réactive) est nécessaire à l'évaluation. Les méthodes multicritères, le recours à la modélisation ou à des analyses plus poussées sur des aspects économiques (analyse coût-bénéfice, analyse de risques) peuvent être développés, tout comme la mise en œuvre plus complète d'une évaluation de chemins d'impacts.

Une étape clé est alors la construction et l'évaluation de stratégies et de chemins d'adaptation qui peuvent combiner différentes actions dans le temps, avec plusieurs cycles d'adaptation où se succèdent : (1) le repérage d'actions possibles au regard d'objectifs d'adaptation, (2) leur évaluation *ex ante*, (3) leur choix et leur planification, (4) leur mise en œuvre, (5) leur suivi et leur évaluation *ex post* (Werners *et al.*, 2021). Ces chemins d'adaptation peuvent être questionnés au regard des incertitudes et de la diversité d'actions possibles, en repérant ceux qui peuvent être réversibles ou flexibles, qualifiés de sans regrets, ou au contraire ceux qui peuvent conduire à des maladaptations. Ces stratégies et ces chemins peuvent privilégier différentes attitudes au regard du futur (réactives, anticipatives ou proactives) ou différents niveaux de changements envisagés (incrémentaux, systémiques ou transformatifs).

Enfin, le renforcement des capacités d'adaptation des acteurs est une composante à part entière d'un projet sur l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture, plus ou moins affirmée selon sa dimension partenariale ou participative initiale. Il s'agit de communiquer ou de contribuer aux débats sociaux, mais surtout de favoriser la construction de réseaux reliant les scientifiques et les acteurs du secteur agricole, pour un échange plus efficace des connaissances dans un contexte d'urgence climatique. Ce renforcement des capacités, pouvant inclure la production de récits et d'arguments, et des enjeux d'inclusion ou de justice sociale, apparaît comme une condition majeure pour l'adaptation en agriculture (IPCC, 2022).

Ces cinq dimensions de l'adaptation dans les systèmes agricoles ou alimentaires constituent un cadre qui permet de décrire, d'analyser, de comparer des projets de recherche (comment ceux-ci prennent en compte ces dimensions), mais aussi de guider la coconstruction de chemins d'adaptation avec les acteurs d'un territoire ou d'une filière agricole (voir chapitre 13). Toutes les recherches sur l'adaptation dans l'agriculture ne répondent pas directement à ces dimensions, mais elles sont appelées à se référer à une approche systémique et multiveau (Howden *et al.*, 2007), qui peut soit étudier un système dans son ensemble soit traiter un objet ou une question plus spécifique, mais résituée dans ce système et son contexte.

► Conclusion

Dans les recherches croissantes sur l'adaptation au changement climatique, les travaux sur l'agriculture sont amenés à prendre en compte des systèmes biologiques ou agro-écosystèmes qui ont leurs propres mécanismes adaptatifs spontanés, et des systèmes sociaux qui peuvent développer une adaptation planifiée à différents niveaux d'actions, dans un contexte de jeux d'acteurs, d'institutions et de construction de connaissances

spécifiques à l'activité agricole (importance notamment des connaissances situées). À l'image des travaux du métaprogramme Accaf de l'Inra, ces recherches sont d'une grande diversité, certaines se centrant sur l'activité agricole (système agricole ou filière et son contexte), d'autres sur la gestion de ressources naturelles (eau, écosystèmes, paysages, etc.), d'autres encore sur des composantes des processus biologiques ou sociaux qui peuvent contribuer à l'adaptation. Toutes ces recherches peuvent se référer à un cadre commun d'analyse, combinant cinq dimensions allant de la caractérisation du système étudié et de sa vulnérabilité au changement climatique, jusqu'à la construction et l'évaluation de stratégies et de chemins d'adaptation, et le renforcement des capacités des acteurs.

Mais plus qu'un positionnement dans un nouveau cadre d'analyse ou d'action, étudier l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture est aussi porteur de nouvelles façons de faire de la recherche. Il s'agit certes de développer des travaux systémiques et en interdisciplinarité pour mieux saisir la complexité de systèmes agricoles en adaptation, inscrits dans des territoires (*place-based solutions* ou solutions territorialisées), mobilisant de nouvelles temporalités (interactions entre court et long terme), faisant face à des incertitudes (climatiques et sociopolitiques) et à différentes perspectives de changements difficiles à évaluer (incrémental *vs* radical, changements de frontières et d'échelles, etc.). Mais l'urgence climatique appelle aussi à revoir plus fondamentalement les méthodes et les pratiques d'une recherche en société, poursuivant son évolution vers une science postnormale (Funtowicz et Ravetz, 1993) qui doit s'organiser pour faire face à des faits incertains, associés à des controverses et des valeurs contestées, à des urgences et des nécessités d'agir. Les chercheurs qui ont travaillé sur l'adaptation dans le programme Accaf ont montré une diversité de postures et de contributions : producteurs de connaissances sur les processus d'adaptation ou leurs conditions, formateurs, experts pour l'action publique, mais aussi coconstructeurs de solutions ou de stratégies, acteurs de sciences participatives, communicants, lanceurs d'alerte, débatteurs, etc. L'enjeu climatique amène ainsi les chercheurs à s'engager dans un nouveau régime de construction des connaissances, associant interdisciplinarité, participation et médiatisation, avec des enjeux spécifiques pour les systèmes agricoles et alimentaires, continuant de nourrir les réflexions et les débats de nouveaux programmes comme CLIMAE.

► Références

- Adage, 2011. *Adapting agriculture and managed ecosystems to climate change*, ANR, Inra, <https://www1.clermont.inra.fr/adage>.
- Anwar M., Liu D., Macadam I., Kelly G., 2013. Adapting agriculture to climate change: A review, *Theoretical and Applied Climatology*, 113(1-2), 225-245, <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0780-1>.
- Allwood J.M., Bosetti V., Dubash N.K., Gómez-Echeverri L., von Stechow C., 2014. Glossaire, in *Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique, contribution du groupe de travail III au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Edenhofer O. et al. (Coords), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York (NY), États-Unis, p. 123-153.
- Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems, *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869-890, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>.
- Barbeau G., Goulet E., Neethling E., Ollat N., Touzard J.-M., 2014. Les méthodes d'adaptation au changement climatique, in *Changement climatique et terroirs viticoles*, éditions Tec & Doc Lavoisier, 347-376.

- Berkes F., Folke C. (Eds), 1998. *Linking Social and Ecological Systems. Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*, Cambridge, Cambridge University Press, 459 p.
- Berkes F., Ross H., 2016. Panarchy and community resilience: Sustainability science and policy implications, *Environmental Science & Policy*, 61, 185-193, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.004>.
- Boyer J., Touzard J.-M., 2021. To what extent do an innovation system and cleaner technological regime affect the decision-making process of climate change adaptation? Evidence from wine producers in three wine clusters in France, *Journal of Cleaner Production*, 315, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128218>.
- Campbell B., Mann W., Meléndez-Ortiz R., 2011. *Agriculture and climate change: a scoping report*, CGIAR, FAO, ICTSD, 98 p., <https://climatefocus.com/wp-content/uploads/2022/06/Agriculture-and-Climate-Change-Scoping-Report.pdf>.
- Caquet T., Guehl J.-M., Breda N., 2015. Le métaprogramme Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt (Accaf) de l'Inra, *Pour la Science*, numéro spécial, mars 2015, 46-50.
- Challinor A.J., Watson J., Lobell D.B., Howden S.M., Smith D.R., Chhetri N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation, *Nature Climate Change*, 4, 287-291, <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>.
- Cobourn K., 2023. Climate change adaptation policies to foster resilience in agriculture: Analysis and stocktake based on UNFCCC reporting documents, *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, 202, OECD, Paris, <https://doi.org/10.1787/5fa2c770-en>.
- Debaeke P., Pellerin S., Scopel E., 2017. Climate-smart cropping systems for temperate and tropical agriculture: mitigation, adaptation and trade-offs, *Cahiers Agricultures*, 26(3), 1-12, <https://doi.org/10.1051/cagri/2017028>.
- Fankhauser S., 2017. Adaptation to climate change, *Annual Review of Resource Economics*, 9(1), 209-230, <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-033554>.
- FAO, 2007. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: Perspective, framework and priorities, Rome, 24 p.
- Funtowicz S.O., Ravetz J.R., 1993. Science for the post-normal age, *Futures*, 25(7), 739-755, [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L).
- Füssel H.-M., 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches and key lessons, *Sustainability Science*, 2, 265-275, <https://doi.org/10.1007/s11625-007-0032-y>.
- Galan J., Galiana F., Kotze D.J., Lynch K., Torreggiani D., Pedroli B., 2023. Landscape adaptation to climate change: Local networks, social learning and co-creation processes for adaptive planning, *Global Environmental Change*, 78, 102627, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102627>.
- Gunderson L.H., Holling C.S. (Eds.), 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, Washington D.C., 507 p.
- Hallegatte S., Lecocq F., de Perthus C., 2011. Designing climate change adaptation policies: an economic framework, *Policy Research Working Paper*, 5568, Washington D.C., World Bank, 41 p.
- 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, 162 p.
- Howden M., Soussana J.-F., Tubiello F., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H., 2007. Adapting agriculture to climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(50), 19691-19696, <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>.
- Iglesias A., Garrote L., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe, *Agricultural Water Management*, 155, 113-124, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>.
- Inra, 2010. *Une science pour l'impact, 2010-2020*, Paris, éditions Inra.
- IPCC, 2001. Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity, Chapter 18, in *TAR Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, B. Smit, O. Pilifosova (Eds.).

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (Eds), Genève, Suisse.

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*, Genève, Suisse.

IPCC, 2022. Climate change 2022, *In Impacts, Adaptation and Vulnerability. 1, Sixth Assessment report, Working Group II contribution*, Genève, Suisse.

Kates R., Travis W., Wilbanks T., 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 109(19), 7156-7161, <https://doi.org/10.1073/pnas.1115521109>.

Laur L., Bouleau G., Leiser H., Tatry M.V., Lacor B., 2024. Analyse scientométrique du champ de CLIMAE, INRAE, hal-04762738.

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, 1068, <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>.

Lobell D., Burke M. (Eds), 2010. *Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World*, Springer, 199 p.

Magesa B.A., Mohan G., Matsuda H., Melts I., Kefi M., Fukushi K., 2023. Understanding the farmers' choices and adoption of adaptation strategies, and plans to climate change impact in Africa: A systematic review, *Climate Services*, 30, 100362, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100362>.

Magnan A., Ribera T., 2016. Global adaptation after Paris, *Science*, 352, 1280-1282, <https://doi.org/10.1126/science.aaf5002>.

Moser S.C., Ekstrom J.A., 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 107(51), 22026-22031, <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>.

Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 284 p.

Ollat N., Touzard J.-M., Van Leeuwen C., 2016. Climate change impacts and adaptations: new challenges for the wine industry, *Journal of Wine Economics*, 11(1), 139-149, <https://doi.org/10.1017/jwe.2016.3>.

Orlove B., 2005. Human adaptation to climate change: a review of three historical cases and some general perspectives, *Environmental Science & Policy*, 8(6), 589-600, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.06.009>.

Orlove B., 2022. The Concept of Adaptation, *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 535-581, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-095719>.

Owen G., 2020. What makes climate change adaptation effective? A systematic review of the literature, *Global Environmental Change*, 62, 102071, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102071>.

Reidsma P., Ewert F., Lansink A.O., Leemans R., 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses, *European Journal of Agronomy*, 32(1), 91-102, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.003>.

Rose M.R., Lauder G.V. (Eds), 1996. *Adaptation*, Academic Press, San Diego (CA), États-Unis, 511 p.

Simonet G., 2009. Le concept d'adaptation : polysémie interdisciplinaire et implication pour les changements climatiques, *Nature Sciences Sociétés*, 17(4), 392-401, <https://www.cairn.info/revue-nature-sciences-societes-2009-4-page-392.htm>.

Smit B., Wandel J., 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability, *Global Environmental Change*, 16, 282-292, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>.

Soussana J.-F. (Coord.), 2013. *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Versailles, éditions Quæ, 296 p.

Thottadi B.P., Singh S.P., 2024. Climate-smart agriculture (CSA) adaptation, adaptation determinants and extension services synergies: a systematic review, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29, 22, <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10113-9>.

- Torquebiau E., 2015. *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, éditions Quæ, 327 p.
- Touzard J.-M., 2018. L'innovation agricole et agroalimentaire au xxie siècle : maintien, effacement ou renouvellement de ses spécificités ?, in Faure G., Chiffolleau Y., Goulet F., Temple L., Touzard J.-M., (Coords), *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*, Versailles, éditions Quæ, p. 39-55, <https://hal.inrae.fr/hal-02790986>.
- Tubiello F.N., Soussana J.F., Howden S.M., 2007. Crop and pasture response to climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(50), 19686-19690, <https://doi.org/10.1073/pnas.0701728104>.
- UNFCCC, 2023. Monitoring and evaluation of adaptation at the national and subnational levels, technical paper by the Adaptation Committee, Bonn, Germany.
- Vermeulen S.J., Campbell B.M., Ingram J.S., 2012. Climate change and food systems, *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 195-222, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>.
- Werners S.E., Wise R.M., Butler J.R., Totin E., Vincent K., 2021. Adaptation pathways: A review of approaches and a learning framework, *Environmental Science & Policy*, 116, 266-275, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.11.003>.

Chapitre 11

Les leviers d'adaptation au changement climatique en production végétale

Philippe Debaeke, Jean-Louis Durand, Nathalie Ollat

Face au changement climatique (variabilité accrue, évolutions graduelles), l'agriculteur s'adapte selon la perception qu'il a de cette évolution. Il modifie son système de culture soit pour anticiper une perturbation probable (planification stratégique) soit en réponse à celle-ci pour lui résister (ajustement tactique), mais aussi pour faire face aux conséquences de cette perturbation (atténuation, correction) ou pour tirer parti des opportunités qu'elle peut offrir.

Par l'adaptation, il cherche ainsi à réduire l'exposition de son système de culture (ou de son système de production) aux aléas climatiques et à en diminuer la sensibilité afin de le rendre globalement moins vulnérable (Smit et Skinner, 2002 ; Willaume *et al.*, 2014 ; Labeyrie *et al.*, 2021 ; Ricart *et al.*, 2023).

Étant donné l'évolution graduelle du climat dans le passé, les agriculteurs ont longtemps ajusté leurs pratiques de manière spontanée et autonome pour faire face à une variabilité climatique d'ampleur relativement prévisible. Les changements en cours qui associent à une tendance de fond mieux perçue, une plus forte variabilité interannuelle, des épisodes violents et des séquences inédites (déficit pluviométrique prolongé, canicule, fortes pluies, gel tardif, etc.)⁴⁴ nécessitent de s'adapter plus durablement en identifiant des stratégies robustes (figure 11.1).

Cela pose de nombreuses questions relatives à la transition d'un système orienté pour la productivité vers un système cherchant en priorité de la résilience face au changement climatique.

Ainsi, en fonction de l'horizon temporel, des services climatiques accessibles et de l'ampleur des évolutions possibles du climat, plusieurs stratégies d'adaptation, remettant plus ou moins en cause les pratiques actuelles, sont envisageables pour les acteurs de la production végétale (figure 11.2) :

- faire face aux aléas par des modifications incrémentales des systèmes de culture (par exemple l'avancement de la date de semis, du choix variétal, l'optimisation du pilotage de l'irrigation, etc.) ;

44. Canicule en 2003 et en 2019; excès d'eau et déficits de rayonnement au printemps en 2016 et en 2024; hiver doux et gel printanier en 2021; sécheresse intense et prolongée en 2022.

- introduire des solutions systémiques visant une plus grande résilience des systèmes de culture, voire du système de production (par exemple de nouvelles espèces plus tolérantes, une diversification intraparcelle et intraexploitation, l'agroforesterie, l'optimisation des stratégies d'irrigation à l'échelle de l'exploitation, etc.);
- transformer en profondeur les systèmes de production (relocalisation, systèmes agroécologiques fortement diversifiés, introduction d'un système d'irrigation dans une exploitation, etc.) (Bindi et Olesen, 2011; Kates *et al.*, 2012; Anwar *et al.*, 2013).

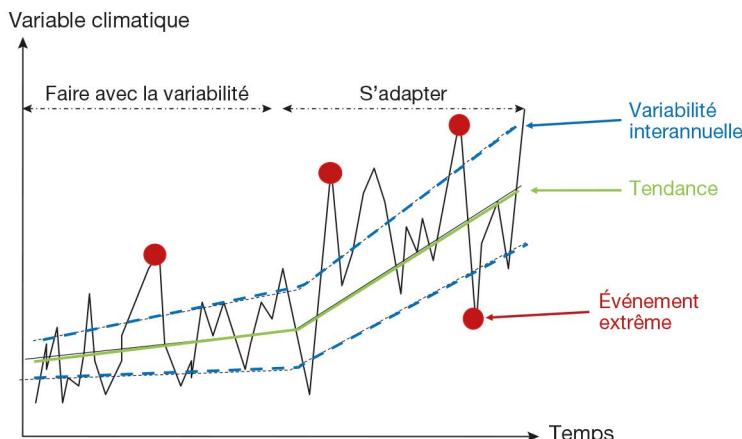


Figure 11.1. Dimension temporelle de la réponse des acteurs au changement climatique défini par ses trois composantes. Source : d'après Jones et Mearns (2005) et revue par US Agroclim (INRAE Avignon).

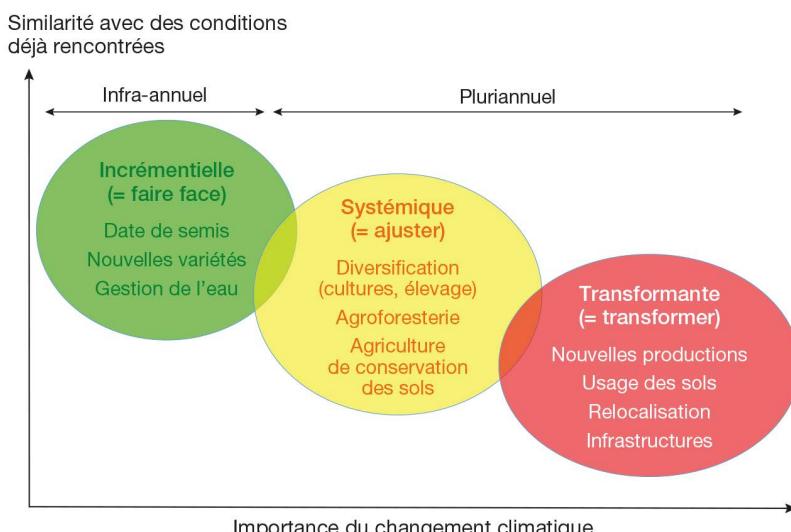


Figure 11.2. Natures et formes de l'adaptation au changement climatique en agriculture. Source : T. Caquet (INRAE), d'après les travaux de Moser et Ekstrom (2010), Rickards et Howden (2012) et Thornton (2014). Ce schéma a été structurant pour le métaprogramme Accaf de l'Inra (2010-2019).

Cela s'apparente au cadre d'analyse développé par Hill et McRae (1995) pour décrire les différentes étapes de la transition vers des pratiques d'agriculture durable (cadre dit ESR, pour «efficience, substitution, reconception»).

Ce chapitre présente les leviers d'adaptation au changement climatique accessibles en production végétale tout d'abord pour les grandes cultures, puis pour les prairies et enfin pour la vigne et les productions fruitières.

► Grandes cultures

Les ajustements techniques (leviers) faisant appel à de nouvelles technologies de production, à une adaptation de la conduite des cultures et à un changement de la composition des assolements s'opérant de façon spontanée à l'échelle de la ferme ont été très largement décrits dans la littérature (par exemple Smit et Skinner, 2002; Howden *et al.*, 2007; Olesen *et al.*, 2007 et 2011; Anwar *et al.*, 2013; Debaeke *et al.*, 2017a et 2017b; Grigorieva *et al.*, 2023).

Au niveau local, régional ou même à l'échelle de l'Europe, de nombreuses études parfois combinées (expérimentations au champ, approches participatives, exercices de modélisation, enquêtes, etc.) ont été menées pour définir les meilleures options pour la conduite des cultures aussi bien dans le climat actuel que futur (voir par exemple Lehmann *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2022; Lorite *et al.*, 2023).

Cependant, comme l'ont observé Wakatsuki *et al.* (2023), plus de 90% des études évaluant des leviers d'adaptation se sont restreintes à quatre ensembles de pratiques : la date de semis, le choix du cultivar (et souvent la durée de cycle), l'irrigation et la fertilisation (principalement azotée), tout simplement parce que ces études, étant basées sur l'utilisation de modèles de simulation des cultures, étaient ainsi limitées par les options pouvant être modélisées (voir chapitre 4). Il en va de même pour la prise en compte des successions de cultures et des assolements dont la simulation se limite souvent aux espèces majeures en culture pure ne permettant pas ainsi de tester de nombreuses options de diversification (Kersebaum, 2022; Vallès *et al.*, 2023).

Des leviers pour réduire les impacts négatifs du dérèglement climatique

Les leviers agronomiques et génétiques proposés visent à esquiver, à tolérer ou à atténuer les effets des contraintes climatiques.

Esquiver la contrainte climatique par un choix de date de semis et de précocité variétale adapté

Le décalage de la date de semis pour positionner le cycle de culture (et en particulier les phases phénologiques les plus sensibles aux contraintes abiotiques) dans des périodes plus favorables sur le plan thermique et pluviométrique constitue un moyen simple et peu coûteux d'adaptation incrémentale au changement climatique (Minoli *et al.*, 2022). C'est pourquoi cette stratégie a été très fréquemment évaluée par expérimentation factorielle classique, mais surtout par simulation numérique pour multiplier les expérimentations virtuelles. On peut citer les travaux de Brisson et Levraud (2010) à l'échelle de la France, de Moriondo *et al.* (2010), Donatelli *et al.* (2015) et Parent *et al.* (2018) à l'échelle de l'Europe, et d'Abraffoff *et al.* (2023) à un niveau plus global.

Ainsi, en Europe, pour les cultures d'été (betterave, maïs, tournesol ou soja) ou les cultures semées au début du printemps (céréales ou légumineuses de printemps), il s'agit de semer plus tôt en profitant du réchauffement anticipé des sols (tout en évitant les risques de gels tardifs) afin d'esquiver les stress thermiques et hydriques qui peuvent affecter fortement la période de floraison et de remplissage pour les espèces à graines (Parker *et al.*, 2017; Appiah *et al.*, 2023). Cela concerne en particulier les cultures d'été non irriguées (comme le tournesol ou le maïs « dry »). Pour les cultures irriguées (maïs, soja), cette anticipation peut permettre d'économiser un à deux tours d'eau d'irrigation (Maury *et al.*, 2015).

Pour les cultures d'hiver, un semis trop précoce augmente le risque d'exposer les organes reproducteurs en formation à des gels tardifs au printemps (Brisson et Levraud, 2010). De plus, le retour des pluies à l'automne pouvant être retardé parfois, un semis trop précoce en conditions sèches peut présenter un risque pour une levée régulière. Les températures plus douces de l'hiver autorisent des semis tardifs tout au moins dans le sud de la France. Cependant, dans les situations les plus méridionales, la diminution des risques de gelées pourrait justifier des semis plus précoces, lorsque l'humidité du sol permet une bonne implantation des cultures afin de limiter les risques de stress hydrique et thermique à partir de l'épiaison des céréales autour de fin avril début mai (Bassu *et al.*, 2009). La date de semis des céréales devra également être ajustée pour tenir compte des besoins en vernalisation variables selon les variétés.

En revanche, dans certains cas (comme les régions à hiver doux), le choix d'un semis d'automne ou d'hiver permet un meilleur ajustement aux contraintes abiotiques (cas du pois d'hiver *vs* pois de printemps) évitant ainsi le recours à l'irrigation lors de printemps secs (Bénézit *et al.*, 2017).

À plus long terme, la disparition des gels hivernaux dans certaines régions pourrait permettre d'envisager une anticipation plus forte encore, passant par des semis d'automne ou d'hiver pour certaines espèces semées au printemps comme le tournesol, pratique expérimentée avec succès dans les régions du sud de l'Europe pour esquiver le stress hydrique à la floraison et au cours du remplissage, avec de bons résultats sur l'efficience de l'eau et sur le rendement (Soriano *et al.*, 2004). Cette anticipation pourrait changer également le contexte de la protection des cultures (changement de la flore adventice et du cortège parasitaire).

L'utilisation de variétés précoces en cultures d'hiver ou d'été — parfois associée à un semis précoce pour les cultures semées au printemps (cas du maïs « dry » dans le Sud-Ouest) — est également une option supplémentaire pour esquiver le déficit hydrique et les hautes températures, notamment pour les situations les plus chaudes et sèches ou celles pénalisées par des restrictions d'eau (Cutforth *et al.*, 2007; Donatelli *et al.*, 2015; Senthilkumar *et al.*, 2015; Gabaldon-Leal *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019). Cependant, il n'est pas toujours optimal de combiner le semis anticipé et les variétés précoces au risque de ne pas pleinement valoriser le supplément de durée de cycle permis par la température. Cela peut dépendre également de la ressource en eau disponible, qu'elle provienne du sol, de la pluviométrie saisonnière ou de l'irrigation.

Atténuer le déficit hydrique par l'irrigation

L'irrigation de complément permet d'atténuer la contrainte hydrique et de sécuriser certaines phases particulièrement critiques (émergence, montaison, floraison) (Stewart

et Nielsen, 1990; Wittling et Ruelle, 2022). Dans le même temps, les ressources en eau disponibles pourraient être plus contraintes dans certains bassins déjà en tension. Cela dépendra également de la politique de stockage de l'eau, de la pluviométrie hivernale et du niveau de recharge des aquifères (voir chapitre 2). Déconcentrer l'usage de l'eau (41 % des surfaces irriguées sont cultivées en maïs) par une répartition sur un plus grand nombre de cultures (en période sensible ou critique) en ne cherchant pas une couverture totale du besoin climatique pourrait être une bonne stratégie dans le cadre de la diversification et de l'emploi de variétés ou d'espèces plus tolérantes au stress hydrique ou moins consommatrices en eau. L'irrigation pourrait également être consacrée en partie pour sécuriser l'implantation des cultures, y compris pour certaines plantes de service, et plus globalement pour diversifier les assolements (Vallès *et al.*, 2023).

La situation la plus critique est sans doute celle du maïs irrigué dans le Sud-Ouest qui, même avec une augmentation de l'irrigation mais sans adaptation variétale, verrait son rendement diminuer à cause du raccourcissement de son cycle. Le recours à des variétés plus tardives permettrait de compenser ce préjudice, mais en augmentant encore les besoins en irrigation (Holzkämper, 2020). En effet, comme l'a montré l'étude Climator (Brisson et Levraud, 2010), les besoins en irrigation du maïs, sans changement variétal et pour un sol profond (220 mm de réserve utile), augmenteraient en moyenne de 30 mm à 60 mm sur la période 2020-2050 selon les régions. Holzkämper (2020) en Suisse estime que l'augmentation des besoins en irrigation pourrait atteindre 40 % à la fin du siècle. L'eau étant un facteur limitant majeur et récurrent dans le Sud, une baisse des surfaces de maïs grain irrigué est cependant observée depuis les années 2000 : ainsi – 23 % dans le bassin Adour-Garonne entre 2000 et 2020, du fait d'une surévaluation initiale des ressources en eau disponibles pour l'irrigation dans cette région. Au cours de la décennie 2010-2020, le maïs irrigué a connu un recul du taux d'irrigation de 59 % à 52 % (Agreste, 2023).

C'est en Europe du Sud que le besoin de sécurité hydrique sera le plus important, en raison de la vulnérabilité accrue de la production, de la réduction de l'approvisionnement en eau et de l'augmentation de la demande d'irrigation (Doll, 2002; Falloon et Betts, 2010; Zhao *et al.*, 2015). Mais la question pourra se poser également dans certaines zones septentrionales où, du fait de sols sableux ou d'une demande évaporative accrue, l'irrigation pourrait être justifiée pour améliorer et pour stabiliser les rendements ou la qualité de céréales à paille ou de cultures à enracinement plus superficiel (maïs, pois, pomme de terre, etc.) (Daccache *et al.*, 2012; Nendel *et al.*, 2014).

Mieux tolérer les conditions climatiques contraignantes par la sélection variétale

Choisir des variétés tolérantes à la sécheresse ou aux fortes températures n'est pas aisé pour l'agriculteur, car l'évaluation actuelle ne porte pas sur ces critères et la connaissance de variétés plus résistantes à ces contraintes est empirique et non certifiée par une évaluation officielle, bien que certaines sociétés semencières diffusent des variétés présentées comme adaptées à la sécheresse (par exemple en ce qui concerne le maïs) (Cooper *et al.*, 2014).

La sélection de nouvelles variétés mieux adaptées aux chocs thermiques (chaleur et froid), à la sécheresse, à l'engorgement des sols et à l'augmentation du taux de CO₂

atmosphérique ($[CO_2]$) est souvent suggérée comme la principale adaptation au changement climatique à long terme, étant donné que les cultivars actuels ont été sélectionnés depuis longtemps avec des objectifs différents (Ceccarelli *et al.*, 2010; Boote *et al.*, 2011; Ziska *et al.*, 2012). L'incertitude quant à l'ampleur du changement futur est très élevée pour les précipitations, modérément élevée pour la température et relativement faible pour le $[CO_2]$, ce qui est à prendre en compte pour la définition d'idéotypes.

La sélection publique et privée s'emploie à développer des variétés plus tolérantes aux stress hydriques et thermiques. La recherche oriente ses efforts sur la compréhension des déterminismes génétiques polygéniques et le phénotypage à haut débit des ressources génétiques (Henry, 2020; Snowdon *et al.*, 2021). Les Programmes d'investissements d'avenir (PIA) conduits entre 2010 et 2020 ont permis d'orienter la recherche de ressources génétiques nouvelles vers ces cibles : BreedWheat (blé), Amaizing (maïs), Sunrise (tournesol), PeaMust (pois). La difficulté tient à la diversité des scénarios de sécheresse possibles, qui orientent vers des idéotypes différents (Tardieu, 2012). Parmi les caractères les plus prometteurs, on peut lister la réponse de la conductance stomatique à la sécheresse de l'atmosphère, l'osmorégulation, et toujours la phénologie qui permet de déplacer les stades sensibles par rapport aux épisodes secs probables. Il faut aussi signaler les progrès espérés d'une sélection de traits d'architecture racinaires favorables. Une autre difficulté réside dans le régime de propriété des innovations et des ressources génétiques qui restreignent très fortement les droits d'accès aux plantes et aux gènes améliorés, contrairement à ce qu'autorise le droit sur les variétés protégées par un certificat d'obtention végétale (Porter *et al.*, 2016).

Pour une anticipation des semis, la sélection de variétés tolérantes aux basses températures en début de cycle est également une cible nouvelle (Allinne *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2017). Pour compenser le raccourcissement des cycles, des variétés plus tardives seront recherchées là où la contrainte hydrique peut être maîtrisée (pour le soja, voir Simon-Miquel *et al.*, 2024).

Dans certaines situations, on recherchera une substitution par des espèces plus tolérantes à la sécheresse ou moins consommatrices en eau d'irrigation, ce qui amènera la sélection à investir davantage sur des espèces aujourd'hui secondaires (comme le sorgho ou le pois chiche, etc.). Le remplacement du maïs irrigué par des cultures modérément irriguées ou pluviales (par exemple le tournesol ou le sorgho) ou par des cultures d'hiver pourrait être recommandé pour faire face aux problèmes d'eau croissants en Europe occidentale et méridionale (Debaeke *et al.*, 2008). Notons que dans certains cas (par exemple dans le cas du remplacement massif du maïs par le sorgho), le changement d'espèce pourrait nécessiter et donc engendrer des changements systémiques plus profonds pour mettre en place de nouvelles filières en aval.

Conserver la ressource en eau par le travail du sol et la gestion des résidus

Capturer et stocker davantage d'eau dans le sol puis éviter les pertes par évaporation est un moyen de renforcer la robustesse des systèmes de culture vis-à-vis du manque d'eau. Cela est pratiqué en aridoculture (*dry farming*) depuis assez longtemps dans le monde (mais plus récemment en Europe) et passe par le travail minimum du sol et par la couverture des sols par des mulchs vivants ou morts (Unger *et al.*, 1991; Holland, 2004; Nielsen *et al.*, 2005). Beaucoup d'attentes se portent aujourd'hui sur les techniques d'agriculture

de conservation des sols qui associent le non-travail du sol et la couverture du sol par des mulchs vivants et/ou des paillis au sein de rotations diversifiées (Scopel *et al.*, 2013; Cordeau *et al.*, 2024). Dans certaines conditions, la gestion de cette matière organique permet d'accroître l'infiltration et le stockage de l'eau, et favorise la mise en place du système racinaire. Des travaux sont en cours pour préciser les gains effectifs en stockage de l'eau liés à des différences de porosité selon les pratiques de travail du sol. Ainsi, Alletto *et al.* (2022) ont montré dans le sud-ouest de la France que des systèmes en agriculture de conservation permettent à terme d'augmenter et de stabiliser la vitesse d'infiltration de l'eau et d'augmenter le volume de sol exploré par les racines, mais augmentent peu la réserve utile en eau (< 10 %) pour un horizon de sol donné. Pour boucler le bilan *a priori* positif de ces couverts dans l'amélioration de la résilience des systèmes de culture face au changement climatique, il faut cependant tenir compte de la consommation en eau permanente des couverts végétaux, avec pour conséquence une sensible réduction du drainage et de l'alimentation des aquifères. Ainsi, la méta-analyse de Meyer *et al.* (2019) sous un climat tempéré conclut à une réduction du drainage hivernal d'environ 30 mm par l'action de couverts intermédiaires. Cependant la gestion des couverts est encore très dépendante de l'utilisation d'herbicides (comme le glyphosate) pour contrôler le développement des couverts et pour les détruire.

Éviter l'apparition d'un stress hydrique précoce par la gestion du couvert

Le maintien d'un couvert végétal dense (par des écartements réduits, une forte densité ou une fertilisation précoce et renforcée) permet de réduire l'évaporation du sol, mais peut conduire à une transpiration excessive, un épuisement anticipé de la réserve et un dessèchement précoce des plantes (Debaeke et Aboudrare, 2004). Ce compromis peut également se rencontrer lors de l'implantation d'une culture de printemps après un couvert d'interculture (Meyer *et al.*, 2020).

De même, la gestion de la fertilisation azotée doit être adaptée à l'augmentation ou à la diminution des rendements selon les conditions hydriques, thermiques ou de teneur en CO₂. Ainsi, dans les sols où l'humidité et la matière organique sont élevées, la minéralisation accrue à la suite de l'augmentation de la température doit être prise en compte dans les bilans prévisionnels (Nendel *et al.*, 2014).

Accroître la résilience du système de culture par la diversification cultivée

Diversifier les productions dans l'espace, au sein d'une parcelle (mélanges variétaux, associations plurispecifiques) ou au sein d'une exploitation (choix des espèces et des variétés selon les potentialités des sols et pour étaler les périodes sensibles) est potentiellement une stratégie de réponse à la variabilité et à l'imprévisibilité croissantes des conditions climatiques. Incorporer plus systématiquement des espèces plus résistantes ou résilientes à défaut d'être fortement productives est une autre stratégie. Ainsi, on peut espérer une plus grande résilience face aux accidents climatiques de variétés ou d'espèces en mélange ayant des phénologies contrastées. Diversifier l'assoulement par le choix d'espèces ou de variétés adaptées est donc un moyen de mieux gérer les risques et les aléas (climatiques, parasites et économiques), constituant ainsi une mesure d'autoassurance au niveau de l'exploitation ou du bassin de collecte (Bradshaw *et al.*,

2004; Debaeke *et al.*, 2008; Vallès *et al.*, 2023). La diversification du paysage par la réorganisation de la composition et de la configuration des assolements, ainsi que par la mise en place d'infrastructures de capture de l'eau dans le paysage, peut également contribuer à atteindre cet objectif (Molénat *et al.*, 2023).

Au niveau parcellaire, l'agroforesterie est très souvent mise en avant comme une voie d'adaptation au changement climatique : diversité des productions, complémentarité pour l'utilisation de l'eau du sol, protection thermique des couverts ombrés, etc. (Abildtrup *et al.*, 2006; Schoeneberger *et al.*, 2012; Nguyen *et al.*, 2013; Hernandez-Morcillo *et al.*, 2018; Cardinael *et al.*, 2021; Quandt *et al.*, 2023; Rolo *et al.*, 2023). Beaucoup de travaux ont été menés en milieu tropical (Afrique, Amérique du Sud, Asie), mais moins en Europe avec cet objectif d'adaptation au changement climatique (Teraseki Hart *et al.*, 2023).

Cependant, les études montrant l'intérêt des cultures associées ou des mélanges variétaux comme solutions d'adaptation au changement climatique sont rares, notamment dans les conditions européennes. En particulier, il est nécessaire d'évaluer, à l'échelle des bassins-versants, les bilans hydriques de ces systèmes (et plus largement de la diversification dans le temps et dans l'espace) qui, précisément du fait des complémentarités entre espèces, pourraient utiliser davantage des ressources hydriques qui en tout état de cause retourneraient au milieu.

Développer le numérique dans le pilotage et dans la planification des interventions

Le changement climatique impliquera aussi, pour toutes les grandes cultures, un pilotage plus fin en fonction des prévisions météorologiques à court terme afin de gérer de la manière la plus efficiente possible les apports d'azote, le travail du sol, la protection phytosanitaire à l'échelle parcellaire. Cela nécessitera également des adaptations au niveau des agroéquipements pour augmenter en précision et en justesse, mais aussi pour la mise en place et la récolte de peuplements plus diversifiés. Le progrès dans les prévisions climatiques saisonnières pourra orienter les choix d'assolements et la gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation. Les apports du numérique dans le pilotage (capteurs au sol, drones, satellites) conjugués au développement des services climatiques pourraient fournir à l'agriculteur des outils supplémentaires pour réduire l'incertitude sur les prévisions climatiques et mieux choisir les leviers agronomiques appropriés (voir chapitre 3) (Bellon-Maurel *et al.*, 2022).

De nouvelles opportunités à exploiter à l'échelle de la parcelle et du territoire

Anticipation des dates de semis

Comme rapporté plus haut, les avancées des dates de semis et les choix variétaux associés traduisent les autoassurances mises en place par les agriculteurs et par les filières pour faire face aux évolutions climatiques ressenties et pour contribuer à la stabilité des performances. Cette anticipation des semis permet également de valoriser de nouvelles opportunités.

Ainsi, les cultures semées au printemps dans la partie nord de la France (maïs, betterave, tournesol) ont tiré parti de l'augmentation de la température, facteur limitant

dans ces régions. Les semis peuvent être réalisés plus tôt (avancée de trois semaines par rapport aux années 1970), la durée du cycle augmente, et la photosynthèse est valorisable sur une plus longue période. De ce fait, le rendement augmente, tout comme la teneur en matière sèche du grain à la récolte. Ainsi les semis précoces de maïs permettent de réduire les coûts de séchage, de libérer plus tôt les parcelles, de cultiver des variétés plus tardives et, comme on l'a vu, de positionner la période de formation du nombre de grains en conditions hydriques et thermiques plus favorables, pourvu qu'ils soient réalisés en bonnes conditions d'humidité et à des températures de sol suffisantes. De fait, les agriculteurs sèment le maïs de plus en plus tôt, avec une à deux semaines d'avance par rapport aux années 2000, comme cela a été observé en Nouvelle-Aquitaine (Crana, 2020) (figure 11.3). Benoit *et al.* (2015) confirment ces tendances dans la région Lorraine.

De manière générale, l'avancée des dates de semis au printemps et une « précocification » encore plus forte pourraient s'accompagner de l'introduction de variétés plus tardives (là où l'alimentation hydrique le permet), modifiant ainsi le paysage variétal et la sélection en amont. Cela peut permettre également d'allonger la période disponible pour les semis et d'élargir les options de choix variétal.

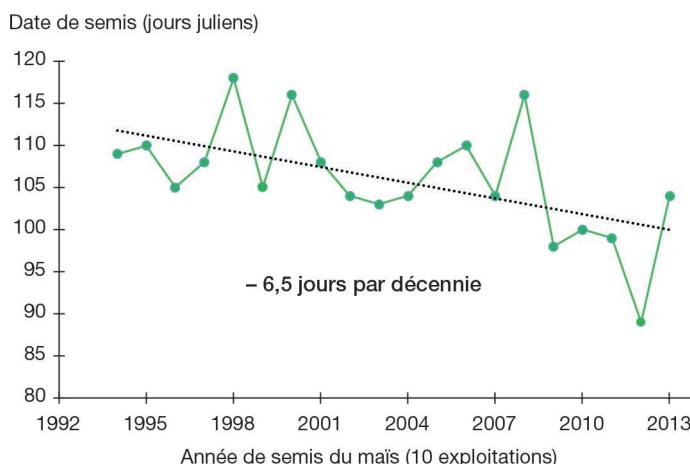


Figure 11.3. Avancée régulière des dates de semis du maïs en Nouvelle-Aquitaine. Source : Oracle, Crana.

Allongement de la période de culture par la double culture

Le réchauffement allonge de fait la durée de végétation exploitable par l'agriculteur. Ainsi, il devient possible plus fréquemment d'envisager une double culture, le plus souvent un soja, un tournesol, un sorgho ou un sarrasin après la récolte d'une culture d'hiver libérant tôt la parcelle (orge, colza, pois ou même blé), dans une perspective d'intensification écologique (Meza *et al.*, 2008; Seifert et Lobell, 2015; Pitchers *et al.*, 2023; Simon-Miquel *et al.*, 2023). On parle de « culture dérobée » lorsque les deux cultures se suivent, et de « culture en relais » lorsque la deuxième culture est implantée au sein de la culture principale (exemple du semis de soja dans l'interrang de cultures de blé). Cela nécessite, au moins pour la culture d'été en dérobé plus

fréquemment pratiquée, des variétés très précoces, un travail du sol simplifié et le plus souvent de l'irrigation au cours de l'été. Ainsi, la possibilité de récolter un soja dérobé avant le 20 octobre devrait s'étendre à l'ensemble du sud-ouest de la France en 2050 (figure 11.4). Si les conditions thermiques permettent d'envisager la récolte des doubles cultures en condition plus favorable, les restrictions sur l'eau d'irrigation pourraient rendre cette pratique très limitée. La culture en relais nécessite une bonne technicité, une anticipation de la structure de peuplement dès le semis de la céréale, un semis direct et un bon contrôle des adventices (Lamichhane *et al.*, 2023).

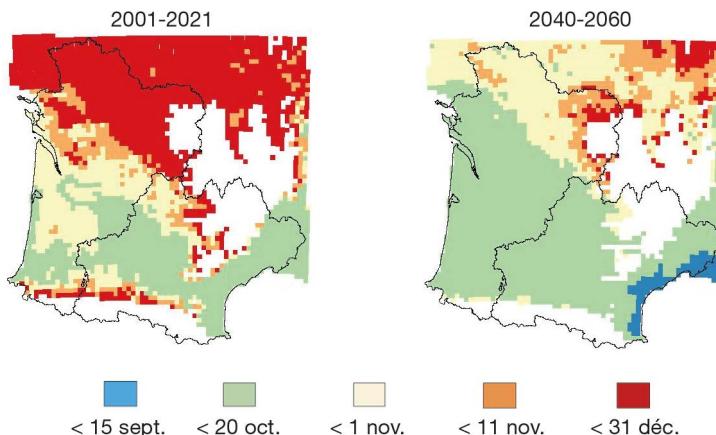


Figure 11.4. Date de récolte durant huit années sur dix avant la date considérée d'un soja « 000 » semé le 21 juin sous un climat actuel et futur (RCP8.5) : application aux régions Occitanie et Nouvelle-Aquitaine. Source : Duchalais *et al.* (2022).

Extension de l'aire de culture de certaines productions

L'augmentation de la température modifie la répartition potentielle et effective des cultures en France et en Europe (Tuck *et al.*, 2006 ; Olesen *et al.*, 2011). Ainsi, les limites climatiques de la culture du maïs se sont déplacées de plus de 200 km vers le nord en vingt ans. Les dates de semis et de récolte ont été avancées de vingt jours. En effet un réchauffement de 1 °C équivaut à environ 180 km vers le nord. En zones de moyenne montagne, où 1 °C correspond à 150 m en altitude, de nouvelles potentialités pourraient apparaître. Les cultures de soja, sorgho et tournesol progressent régulièrement vers le nord, l'est ou l'ouest de la France, aidées en cela par un regain de sélection pour des variétés précoces à très précoces, utilisées plus au sud pour le dérobé (exemple du sorgho, figure 11.5).

Ces évolutions potentielles s'appliquent également à l'échelle européenne (Daccache *et al.*, 2012 ; Nendel *et al.*, 2023). Ces opportunités sont à exploiter dans le cadre de la diversification des systèmes de culture, très marqués par la succession colza-blé-orge dans le centre de la France, en vue notamment de réduire l'utilisation de pesticides. Cette relocalisation des cultures d'été vers le nord peut s'envisager sans irrigation en sols profonds. Elle est amenée à s'amplifier d'autant plus que la disponibilité en eau pour les cultures d'été devient plus critique dans les zones irriguées du Sud, et que l'inscription de variétés précoces à très précoces est en augmentation.

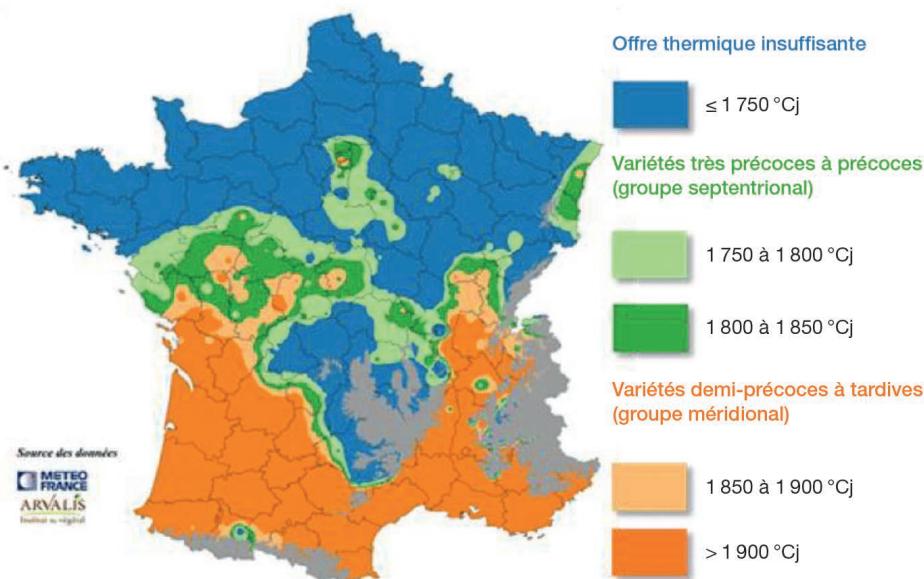


Figure 11.5. Aire de culture et groupes de maturité pour le sorgho selon les sommes de températures (base 6-35 °C, 10 mai-15 octobre/décile 2/2001-2021) atteintes durant huit années sur dix. Source : Arvalis, 2024.

► Prairies

Quelle part pour les prairies dans les systèmes agricoles adaptés au changement climatique ?

En prenant en compte la diversité géographique et temporelle, la prairie prend toute sa place dans l'adaptation au changement climatique à court et à plus long terme (*via* l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et le stockage de carbone dans les sols) (Michaud *et al.*, 2021). La plupart des études soulignent le fort potentiel de résistance et d'atténuation du changement climatique des systèmes en polyculture-élevage, notamment du fait de la présence importante de la prairie dans la surface agricole utile (Pelllierin *et al.*, 2013; Mosimann *et al.*, 2015). Nombre de scénarios de transition agroécologique prenant en compte les contraintes climatiques (par exemple, Poux et Aubert, 2022) comportent un accroissement sensible de la surface en herbe. La contrainte pesant sur l'emploi des intrants (azote et eau notamment) pourrait faire de la prairie diversifiée, riche en espèces dont les légumineuses, un élément essentiel des systèmes de production à l'avenir (Martin *et al.*, 2020). En effet, la diminution drastique de l'utilisation d'engrais azotés de synthèse est un des principaux leviers de réduction des émissions liées à l'agriculture.

Sur le plan géographique, le changement climatique impose des modifications très variables sur la prairie selon les régions (Ruguet *et al.*, 2013). Au nord et dans l'ouest, il va inciter à une certaine intensification de l'usage de l'herbe avec davantage de pâturage et d'exploitation à l'automne et en début de printemps, quand les productions augmenteront significativement du fait de l'élévation des températures et de la

concentration atmosphérique en CO₂ (Durand *et al.*, 2010). Dans le sud au contraire, l'aggravation des déficits hydriques estivaux tendra à extensifier la production en utilisant des surfaces plus vastes.

Sur le plan temporel, les élevages qui cherchent à tirer le meilleur parti de l'herbe sont déjà adaptés à une grande variabilité interannuelle et mettent en œuvre une stratégie basée sur des stocks (foin, ensilage) sur douze mois ou plus. Cela devra être renforcé, avec une difficulté à venir qui est que les années sèches adviennent souvent par cycles, risquant de mettre en danger l'alimentation du troupeau plusieurs années de suite, tandis qu'il sera difficile de stocker du fourrage plusieurs années de suite dans les périodes pluvieuses.

C'est l'ensemble des leviers zootechniques qui seront mobilisés contre le changement climatique, et ceux-ci sont développés dans le chapitre 12. Nous ne détaillerons ici que ceux qui concernent la gestion des prairies semées et naturelles.

La gestion des prairies temporaires et permanentes

Qu'il s'agisse de prairies semées temporaires ou permanentes, la composition botanique de la prairie est de premier ordre dans sa productivité en quantité et en qualité d'herbe utilisable au cours de l'année et dans sa capacité à récupérer un niveau de production utile après des épisodes de stress. Favoriser les espèces adaptées par la fertilisation et la gestion des récoltes et des pâturages d'une part et par le semis d'espèces appropriées d'autre part sont les principaux leviers de contrôle de la flore prairiale. Dans les deux contextes de prairies temporaires ou permanentes, c'est l'adaptation des modes d'exploitation aux rythmes de production qui permettra de faire face aux aléas climatiques. Remarquons que les éleveurs ont toujours développé des systèmes sécurisés par rapport aux très fortes variations interannuelles de la pousse de l'herbe observées sous le climat de référence, et qu'ils sont ouverts à ces réflexions.

Espèces et variétés

C'est d'abord dans la gestion de la flore prairiale que s'inscrivent les premiers éléments d'adaptation. Les espèces et les variétés prairiales présentent une certaine variabilité génétique face au changement climatique. Ainsi, les graminées comme le dactyle et la fétuque sont mieux adaptées que le ray-grass anglais ou d'Italie. En culture pure ou en mélange, la luzerne (ou le trèfle violet), les lotiers ou le trèfle blanc ont perdu du terrain jusqu'au début des années 2010, mais on constate un regain d'intérêt pour ces légumineuses en vue de rendre les élevages plus autonomes en protéines et moins dépendants de l'usage des engrains azotés. Dans les sols profonds, la luzerne possède des capacités étendues d'utilisation de l'eau du sol et de résistance à la sécheresse, avec de bonnes capacités de reprise végétative (Lemaire, 2008).

Pour la zone tempérée, la sélection génétique chez le ray-grass anglais, espèce la plus semée, a déjà permis depuis 1970 une amélioration de 30% de la production estivale et automnale (Sampoux *et al.*, 2011), par une meilleure utilisation des pluies estivales, notamment grâce à une optimisation de la phénologie (Sampoux *et al.*, 2011). Pour la zone méditerranéenne, la variabilité génétique existe aussi et commence tout juste à être valorisée pour des variétés adaptées à ce climat (Kallida *et al.*, 2016).

La diversification génétique intra et interspécifique est une stratégie efficace pour stabiliser la production face aux aléas climatiques. Les mélanges ont un grand potentiel dès lors que l'équilibre entre les espèces préserve les légumineuses. Il faut donc sélectionner les variétés à semer en mélange non seulement selon leur potentiel propre, mais encore en fonction de leur retenue à épuiser les ressources, lumineuses en particulier, des espèces compagnes. Ce ne sont donc pas les variétés les plus productives en pur qui s'avèrent les plus appropriées en mélange. Selon certains résultats récents, l'utilisation judicieuse dans les mélanges de plusieurs variétés pour chaque espèce composante est une voie prometteuse (Litrico *et al.*, 2016; Volaire *et al.*, 2016; Meilhac *et al.*, 2019). Cet avantage semble dû aux différences de saisonnalité de production entre les variétés présentes sur la même parcelle. Ainsi, quelle que soit la saison, aucune espèce n'a tendance à dominer le couvert au point de remettre en question l'équilibre global graminées/légumineuses qui est une propriété essentielle des prairies pour l'alimentation du troupeau.

Pâture et fauche

L'intensité et la fréquence de défoliation pourraient être gérées de façon beaucoup plus adaptée à laousse de l'herbe afin d'obtenir le maximum de production à qualité optimale. Exploiter l'herbe beaucoup plus tôt au printemps en faisant tourner les animaux entre les parcelles pour éviter le surpâtureage est une adaptation sur laquelle nombre d'exploitations se sont déjà engagées (Cliquet *et al.*, 2019). Avec le retour des pluies à l'automne, ce sont les structures végétatives des plantes ayant survécu, c'est-à-dire la base et les méristèmes des feuilles en croissance protégées par les gaines des feuilles adultes desséchées, qui assurent le redémarrage de laousse de l'herbe (Volaire, 1995). Leur état après l'été détermine directement la vitesse de croissance d'automne. L'intensité de défoliation devra être très limitée en été, si le climat réduit fortement la repousse d'été, saison durant laquelle les plantes sont de toute façon plus fragiles. Il conviendrait de limiter le pâtureage en début d'été, dès que la croissance de l'herbe est significativement ralentie. Le surpâtureage remettrait sinon en question la reprise à l'automne. Derrière des étés plus secs et plus stressants, pour être efficace, la reprise de la croissance demanderait de préserver les herbages et donc de mobiliser plus souvent en été des stocks ou des cultures fourragères d'été adaptées (maïs, sorgho, etc.).

Les haies seront essentielles pour améliorer la situation du troupeau sur les pâtures dans des conditions de températures estivales très élevées, en dépit de l'impact négatif de leur ombrage et de leur consommation d'eau sur la production d'herbe (Moreau *et al.*, 2020). Notons que si les feuillages d'arbres peuvent parfois offrir un aliment de qualité, nous ne connaissons pour les productions bovines que de très rares évaluations de la quantité produite (Liagre *et al.*, 2020). Dans les élevages bovins et avec les espèces d'arbres tempérés constituant les haies, les quantités seront marginales au regard des besoins des troupeaux et loin de compenser les manques liés à la sécheresse estivale. En effet, du fait de leur phénologie, la production de feuilles en été est très réduite chez les arbres de nos régions et le plus souvent restreinte au printemps. Si une fraction significative de ce feuillage est utilisée en été, non seulement cela ne pourra se renouveler avant l'année suivante, mais la récupération et la production de feuilles elles-mêmes en seront fortement affectées à moyen terme (Breda *et al.*, 2006).

Irriguer les prairies ?

Dans certaines régions où existent des perspectives de disponibilité en eau d'irrigation sur le moyen et le long terme (Chauveau *et al.*, 2013; Durand, 2020), la disponibilité en eau pour l'irrigation peut être suffisante pour permettre d'irriguer aussi les prairies, spécialement celles riches en légumineuses, ce qui permet de valoriser les forts rayonnements estivaux pour la production et pour la fixation symbiotique de l'azote. Des essais ont en effet montré que même si les températures excèdent plus souvent les optimums thermiques des plantes (qui se situent entre 20 °C et 25 °C pour les espèces tempérées), l'irrigation peut accroître la production et ainsi sécuriser le système fourrager (Durand, 2020). En revanche, ces cultures irriguées engendrent de fortes compétitions entre les plantes et une surmortalité des individus, pouvant à terme altérer la pérennité ou bien l'équilibre des espèces dans le peuplement (Durand *et al.*, 1989).

S'approprier les outils numériques pour anticiper et pour maîtriser les périodes critiques

Une adaptation majeure consistera pour les éleveurs à se donner les moyens d'anticiper les périodes de production en s'appuyant sur des données météorologiques, les plus locales possibles pour ce qui concerne les précipitations, et sur des simulations numériques de l'état de la réserve en eau du sol et du développement de la végétation (Bellon-Maurel *et al.*, 2022). Une bonne évaluation de la biomasse récoltable et de sa qualité devrait permettre aussi de meilleures utilisations et gestions de l'herbe. Cela suppose aussi d'acquérir des connaissances plus précises de la réserve utile des sols, variable critique pour la simulation de la production au printemps et au cours de l'été (Doussan *et al.*, 2017).

Utiliser les outils de suivi de laousse de l'herbe et de la phénologie printanière permet d'optimiser les dates de sortie des animaux et la rotation sur les parcelles. Il y a une forte variabilité intraspécifique sur la précocité des plantes fourragères⁴⁵ (Mosimann *et al.*, 2017; Rouet *et al.*, 2021) et entre espèces, et cela est à prendre en compte pour le choix des variétés à installer, en pur ou en mélange. Enfin, trop peu connue des éleveurs, la qualité du fourrage des prairies est aujourd'hui mieux évaluée avec les outils de calcul de plus en plus précis à partir d'analyses sur des échantillons prélevés ponctuellement sur les parcelles de l'exploitation.

► Vigne et productions fruitières

Les cultures pérennes telles que la vigne et les productions fruitières présentent un certain nombre de spécificités biologiques qui conditionnent l'impact des conditions climatiques aujourd'hui et dans le futur (tel que cela a été présenté dans le chapitre 7), et donc les options d'adaptation à mettre en œuvre vis-à-vis du changement climatique. Ces cultures sont caractérisées par un cycle de production annuel qui permet d'envisager des actions à court terme. Mais leur pérennité conditionne d'anticiper les actions qui permettront l'adaptation à plus long terme. Il ne s'agit donc pas de s'adapter aux conditions climatiques actuelles, mais aussi de faire des choix aujourd'hui pour le climat potentiel dans dix, vingt, trente ou quarante ans. Les principaux leviers d'adaptation techniques des cultures pérennes ont été présentés en détail dans des ouvrages

45. <https://herbe-book.org/>

récents (Legave, 2022; Ollat et Touzard, 2024). Seule une description synthétique de ces catégories de leviers sera présentée ici. Il faut cependant être conscient qu'un seul levier, voire une combinaison de leviers techniques, ne sera pas suffisant pour adapter totalement les cultures fruitières au changement climatique. Il convient donc de les intégrer dans des stratégies d'adaptation associées à des aspects géographiques, organisationnels et réglementaires, et dans des mises en œuvre à différentes échelles de temps et d'espace, ainsi que cela a été décrit en détail pour la vigne (Barbeau *et al.*, 2015; Ollat et Touzard, 2024).

Les leviers cultureaux applicables à court et moyen terme

Ces leviers seront mis en œuvre sur les vergers et sur les vignobles en place pour essayer de corriger dans une certaine mesure les conditions climatiques défavorables telles que des hivers trop doux, une température moyenne globalement plus élevée engendrant une avancée marquée de la précocité, et des déficits hydriques plus marqués. Il s'agira avant tout d'augmenter la résilience des systèmes de culture déjà existants. En arboriculture fruitière, l'insuffisance de froid automno-hivernal est partiellement neutralisée par l'arcure des branches, par la pratique d'incision annulaire, voire par un effeuillage massif de l'arbre. Mais ces méthodes nécessitent beaucoup de main-d'œuvre et des solutions chimiques sont souvent préférées telles que l'application d'huiles minérales ou de cyanamide d'hydrogène, qu'il faut cependant utiliser avec beaucoup de précautions (Lauri *et al.*, 2022). En viticulture, le débourrement peut être retardé pour éviter les risques de gel de printemps en taillant le plus tard possible, même après le débourrement des premiers bourgeons, mais des effets à long terme sur la mise en réserve peuvent être constatés (Poni, 2023). Globalement la lutte contre le gel repose sur un grand nombre de pratiques qui vont de l'application foliaire de produits «antigel» jusqu'à la mise en place d'infrastructures variées (aspersion, tour à vent, chauffage). L'efficacité de ces différentes méthodes a récemment été soumise à une méta-analyse de littérature qui montre que les résultats sont très variables. Les systèmes très énergivores ne sont pas forcément les plus efficaces (Drepper *et al.*, 2022). En saison, les excès de rayonnement et des extrêmes thermiques peuvent conduire à de graves brûlures sur les organes végétatifs et sur les fruits. En vigne, l'arrêt de l'effeuillage basal des rameaux peut permettre de protéger les grappes d'un rayonnement excessif; généralement, un port plus libre du feuillage tel que celui utilisé pour le système de conduite «en gobelet» permet de limiter les brûlures et l'échaudage. Un tronc établi un peu plus haut (10 à 20 cm) peut également écrêter les températures les plus extrêmes (de Résseguier *et al.*, 2023). Mais d'ordinaire, en viticulture comme pour les productions fruitières pérennes, l'utilisation de filets d'ombrage (pouvant aussi servir de filets antigrêles) est souvent la technique la plus répandue pour limiter les effets d'un excès de rayonnement. En France, ils sont pour l'instant interdits dans les aires viticoles sous appellation d'origine, mais leur expérimentation est à l'étude. L'agrivoltaïsme est également présenté comme une option combinant les effets d'ombrage et la production d'électricité (Simonneau *et al.*, 2024), mais les avantages et les inconvénients d'une telle anthropisation des surfaces de culture est à évaluer réellement.

La gestion du sol dans les vergers et dans les vignobles représente un levier majeur d'adaptation au changement climatique, pour améliorer les conditions à la fois thermiques et hydriques des cultures. La présence d'herbe, quand elle est correctement

gérée, permet d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol, de favoriser la mise en réserve et de limiter l'échauffement des couches superficielles du sol. Certains amendements améliorent la structure des sols et favorisent la capacité de rétention (Naulleau *et al.*, 2021a). Les mulches peuvent également réduire l'évaporation sans effet potentiellement compétitif d'un couvert végétal pour la consommation en eau (Métay *et al.*, 2024). L'enherbement est considéré comme contribuant significativement à l'atténuation et à la neutralité carbone, en favorisant le stockage du carbone dans le sol. Mais cet effet est à évaluer sur le long terme en tenant compte des évolutions thermiques et hydriques du sol sur les capacités de stockage (Schultz, 2022).

Compte tenu de l'augmentation envisagée des besoins en eau des cultures et de la raréfaction des ressources, la gestion de l'alimentation en eau des vergers et des vignobles est centrale pour l'avenir. Si l'irrigation est généralisée en arboriculture fruitière et en viticulture à l'étranger, elle reste limitée dans les vignobles français du fait d'une part des faibles besoins de cette culture, mais surtout des restrictions réglementaires associées aux cahiers des charges des appellations d'origine. Pour ces cultures pérennes, il faut donc considérer deux grandes stratégies dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. Il s'agira d'une part de réduire les besoins en eau d'irrigation en pilotant mieux cette pratique et d'autre part il faudra mobiliser tous les autres leviers qui permettent de favoriser le prélèvement de l'eau disponible par la culture. Dans le premier cas, l'amélioration des connaissances sur les besoins en eau des cultures pérennes, et notamment des stades sensibles, mais aussi le développement des technologies de l'information et de la communication, et de la modélisation sont particulièrement nécessaires (Gautier *et al.*, 2022; Lauri *et al.*, 2022). L'utilisation d'autres ressources en eau comme la réutilisation des eaux usées traitées est également à considérer (Simonneau *et al.*, 2024). Dans le second cas, en dehors du volet variétal qui sera traité ci-après, les pratiques à mettre en avant doivent favoriser un enracinement profond à la plantation et permettre de limiter l'évapotranspiration en limitant la surface foliaire (effeuillage ou réduction de la hauteur foliaire, réduction de la densité de plantation) ou par l'application d'antitranspirants (Van Leeuwen *et al.*, 2019; Naulleau *et al.*, 2021a).

La diversité génétique pour le moyen et le long terme

Compte tenu des impacts observés et attendus et des coûts associés à la mise en œuvre de pratiques culturales pour l'adaptation, la diversité variétale paraît être un levier particulièrement puissant pour faire face sur le long terme aux enjeux que représente le changement climatique (Costes *et al.*, 2022; Ollat *et al.*, 2021; Duchêne *et al.*, 2024). Le fait que la plupart des productions fruitières pérennes, y compris la vigne, soient cultivées greffées augmente le potentiel adaptatif *via* le matériel végétal. Si l'on peut définir globalement l'adaptation d'une production agricole fruitière pérenne comme la capacité de maintenir ou d'optimiser la production et la composition des fruits, tout en assurant la longévité des plantes (Ollat *et al.*, 2019), les cibles spécifiques à rechercher pour les variétés du futur sont principalement relatives (1) à la réduction des besoins en froid pour de nombreuses espèces fruitières, (2) à la tardivitè du débourrement et de la maturation et (3) à une moindre vulnérabilité aux stress thermiques et hydriques, que ce soit vis-à-vis de l'élaboration du rendement ou des processus liés à la maturation des fruits. La combinaison de ces caractères avec une moindre sensibilité (ou une résistance) aux bioagresseurs paraît également fondamentale. De nombreux

exemples sont cités par Legave (2022) pour les productions fruitières et par Ollat et Touzard (2024) pour la vigne, mais ne seront pas repris ici. Si le changement variétal en viticulture présente encore en France des contraintes réglementaires, des évolutions en lien avec les enjeux actuels permettent aujourd’hui d’expérimenter de nouvelles variétés en appellation d’origine.

La diversité peut exister au sein des conservatoires et des collections en France ou à l’étranger. Il est crucial de tout faire pour préserver cette diversité et encore plus déterminant de bien caractériser ces ressources génétiques. Il est possible d’identifier en leur sein des variétés par exemple plus tardives ou avec des besoins en froid plus faibles, qui pourraient être considérées comme des solutions à court ou moyen terme, compte tenu de la durée d’un programme de sélection variétale. Pour la vigne, la diversité rapidement disponible est également intravariétale (Neethling *et al.*, 2023), même si elle est forcément plus limitée. Ces ressources génétiques représentent également la base pour l’amélioration génétique et la création de nouvelles variétés à plus long terme, car elles représentent aussi un réservoir important de gènes contribuant à l’adaptation. Ces ressources permettent également de mieux identifier et comprendre les mécanismes physiologiques qui concourent à l’adaptation et à l’acclimatation.

Comme évoqué ci-dessus, la création de nouvelles variétés est un processus long et le matériel créé devra répondre à des enjeux climatiques qui vont continuellement évoluer. De nombreux caractères seront à combiner. De plus, la plupart des caractères d’adaptation à des stress abiotiques sont contrôlés par de nombreux gènes à effet faible. Par conséquent, il s’avère primordial pour les améliorateurs de mobiliser de nouvelles approches qui tiennent compte de ces caractéristiques (Duchêne *et al.*, 2024). L’utilisation de la modélisation (à l’échelle de la plante ou de la culture) permet d’anticiper les performances des nouveaux génotypes dans des conditions climatiques futures. Des méthodes basées sur la sélection génomique et sur la phénomique intègrent l’information génétique à l’échelle du génome et sont *a priori* particulièrement appropriées pour les caractères à contrôle polygénique. Enfin, pour certains caractères, le potentiel des nouvelles technologies d’amélioration (NBT) devra être évalué. Certains résultats préliminaires ont été obtenus pour la vigne pour le contrôle de la formation des stomates (Clemens *et al.*, 2022).

Le changement d’aire de culture

De tout temps, les agriculteurs ont choisi d’adapter leurs cultures aux conditions environnementales dans un lieu donné ou d’explorer de nouveaux espaces permettant de cultiver de manière optimale une espèce végétale donnée. Le changement climatique oblige à explorer de nouveau ce levier d’adaptation malgré les contraintes qu’il peut présenter à l’échelle d’une exploitation ou pour des productions encadrées par les principes des indications géographiques. Le potentiel adaptatif de ce levier dépend avant tout de l’échelle spatiale considérée.

Localement, le climat peut varier de manière importante comme le montrent des études conduites sur certains vignobles. Sur un espace viticole de 20 000 ha dans la zone de Saint-Émilion qui connaît une diversité des sols, d’exposition et de critères topographiques, il a été mis en évidence une variabilité thermique non négligeable de 0,8 °C pour les températures maximales et de 2,5 °C pour les températures minimales, induisant un écart

de 284°J (indice de Huglin⁴⁶) et une différence de 25 jours pour la date de maturité pour un même cépage (de Rességuier *et al.*, 2020). Cette diversité peut être valorisée à court et moyen terme pour identifier les zones les plus fraîches, notamment pour les cépages à maturité précoce, car elle est du même ordre de grandeur que l'augmentation moyenne de cet indice d'ici la fin du siècle pour le scénario climatique RCP4.5. En revanche, dans le cadre du scénario RCP8.5, cette augmentation serait de 685 degrés-jours et gommerait l'intérêt de la diversité locale (Bois *et al.*, 2024). Le même raisonnement peut s'appliquer pour la sélection de sols à plus grande réserve utile (Naulleau *et al.*, 2021b). À une échelle mésolocale, la montée en altitude permet une réduction de la température d'environ 0,6 °C pour 100 m et une augmentation de l'amplitude diurne (1° pour 100 m). La plantation en altitude (> 600 m) est déjà utilisée dans des pays chauds pour la culture du pommier et du poirier, permettant ainsi une bonne satisfaction des besoins en froid (Lauri *et al.*, 2021). Pour la vigne en Italie (région du Trento), un retard de la récolte de sept jours pour 100 m d'élévation est rapporté (Alikadic *et al.*, 2019).

Sur une échelle spatiale plus étendue, l'évolution potentielle en fonction du changement climatique des aptitudes de différentes zones géographiques pour les cultures fruitières et la vigne ont fait l'objet de nombreuses études par simulation. Ainsi, Wenden *et al.* (2022) rapportent les évolutions de la satisfaction des besoins en froid pour le cerisier (variété burlat, voir chapitre 7, figure 7.1, p. 163) et montrent que les zones les plus propices s'étendraient d'ici la fin du XXI^e siècle vers le nord-est de l'Europe, alors que le sud de l'Europe perdrait son potentiel. Van Leeuwen *et al.* (2024) ont quant à eux produit une revue exhaustive des recherches réalisées à l'échelle mondiale sur l'évolution du potentiel de culture de la vigne, révélant les régions perdantes et les régions gagnantes. En France, des vignobles se développent déjà en Bretagne et dans les Hauts-de-France, et le potentiel de ces régions devrait augmenter (Zavilyanova *et al.*, 2023). Du côté des espèces fruitières, l'amandier et le clémentinier voient leur aire de culture progressivement s'étendre dans l'Hexagone (Lauri *et al.*, 2022). Comme en viticulture où des cépages originaires de pays plus chauds sont susceptibles d'être introduits dans des zones où ils ne sont pas en mesure de mûrir correctement jusqu'à présent, de nouvelles espèces fruitières telles que le mangueier, l'avocatier et certains agrumes présentent un intérêt certain pour l'avenir. Nous n'aborderons pas ici les conséquences socio-économiques de ces changements majeurs.

Combiner des leviers et élaborer des systèmes de culture plus résilients

Ainsi que le constatent Naulleau *et al.* (2021a), il existe très peu d'études qui analysent l'intérêt d'une combinaison de leviers pour s'adapter au changement climatique. L'expérimentation de tels systèmes ne permet pas de se projeter facilement dans le futur et les modèles ne rendent pas encore suffisamment compte de la complexité des processus et des interactions entre tous les paramètres du système. Pourtant, des systèmes de culture combinant plusieurs leviers, comme ceux basés sur les principes de l'agroécologie, valorisant la biodiversité et la réduction des intrants par la diversification, sont présentés comme ayant une plus grande résilience vis-à-vis du

46. Indice de Huglin = $\Sigma[(Tm - 10) + (Tx - 10) / 2] \times k$, où Tm = température moyenne, Tx = température maximale, et k est le coefficient de longueur du jour variant de 1,02 à 1,06 entre 40 et 50 degrés de latitude, calculé entre le 1^{er} avril et le 30 septembre.

changement climatique (Mérot *et al.*, 2023). Par exemple, dans ces systèmes, la gestion des sols, en combinant différentes pratiques, peut contribuer à plusieurs services écosystémiques qui sont *a priori* positifs dans le cadre du changement climatique : meilleure infiltrabilité de l'eau dans le sol, microclimat thermique du sol et de la culture plus favorable, amélioration de la fertilité du sol, gestion des adventices et des bioagresseurs, stockage du carbone, etc. Les cultures associées en combinant des espèces fruitières (une seule ou plusieurs) et des cultures potagères par exemple pourraient également présenter un certain nombre d'avantages. En maximisant l'interception du rayonnement et du CO₂, les systèmes agroforestiers contribuent significativement à l'atténuation du changement climatique. En général, par effet d'ombrage, ils modifient le microclimat thermique et l'humidité relative, ce qui peut avoir des conséquences positives ou négatives en fonction des cultures, notamment sur les interactions biotiques. Enfin, le bilan hydrique d'un tel système optimise l'utilisation de l'eau grâce aux racines plongeantes des arbres qui permettent de valoriser l'eau et les minéraux stockés en profondeur (Lauri *et al.*, 2022). Des expérimentations en vergers et en vignobles permettent actuellement d'évaluer les avantages et les inconvénients de ces systèmes (Grimaldi, 2018; Pitchers *et al.*, 2021). Un travail de modélisation conduit pour l'olivier a montré qu'un système agroforestier serait effectivement plus performant dans le contexte d'un scénario climatique médian RCP4.5 (Barbault *et al.*, 2023).

► Conclusion

Pour l'ensemble des productions végétales, il existe un panel de leviers d'adaptation agronomiques ou génétiques qui permet de faire face en partie au changement climatique, avec des particularités propres aux espèces annuelles ou pérennes, aux productions à graines ou aux prairies, et plus largement aux systèmes de culture et aux aires de production concernées (encadré 11.1). Certains leviers sont d'ores et déjà disponibles et d'autres nécessiteront une inflexion des programmes de sélection (Xiong *et al.*, 2022), mais aussi le développement d'agroéquipements adaptés et d'outils numériques s'appuyant sur l'intelligence artificielle et sur la télédétection (Jung *et al.*, 2021; Parra-Lopez *et al.*, 2024). Si la mise en œuvre coordonnée d'un certain nombre de ces leviers permettra d'atténuer les effets négatifs du changement climatique à court terme, des transformations plus importantes seront nécessaires si les contraintes s'intensifient à moyen et long terme (figure 11.2).

Ces adaptations incrémentales ou systémiques sont à coordonner aux différents maillons de la chaîne de valeur : exploitation (parcelle, système de culture), bassin de collecte, aire de culture, filière. Ainsi, leur choix aura également des conséquences importantes sur le paysage futur de la protection des cultures en modifiant les cycles de végétation, la nature et le développement des cultures hôtes et les aires de production (voir chapitre 8). L'introduction souhaitée d'espèces aujourd'hui mineures (comme les légumineuses) pour diversifier les successions de culture, contribuer au service de régulation du climat et répondre aux nouveaux enjeux alimentaires nécessite ainsi la structuration de nouvelles filières avec l'appui de politiques publiques pour déverrouiller un système alimentaire faisant la part belle aux céréales (Magrini *et al.*, 2016). Certaines filières comme la filière vigne et vin française ont ainsi élaboré une stratégie nationale et un plan d'action pour l'adaptation (et l'atténuation) au changement climatique. Cette stratégie repose à la fois sur la mobilisation de leviers techniques

variés et de leviers réglementaires (Brugiére *et al.*, 2024). Elle comprend également un volet recherche et développement important dont l'objectif principal est d'étudier en conditions réelles des combinaisons de leviers⁴⁷ (encadré 11.1).

Des compromis seront à trouver entre ces adaptations et leur contribution à l'atténuation des émissions de GES, en combinant les réponses à court terme et celles à plus long terme (voir chapitre 15). Il faudra également évaluer si les solutions envisagées pour la transition agroécologique permettent de répondre à la nécessaire adaptation au changement climatique tout en conservant l'aspect rémunérateur pour les agriculteurs (Aguilera *et al.*, 2020).

Encadré 11.1. Un espace thématique pour découvrir les leviers d'adaptation au changement climatique

Dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique (2021-22), la cellule RIT⁽¹⁾ (cellule de coordination nationale Acta — chambre d'agriculture de France — INRAE) et le RMT ClimA (le réseau mixte technologique ClimA) ont travaillé à un inventaire des leviers d'adaptation.

Ce travail a donné lieu à une solution numérique : le module « leviers d'adaptation au changement climatique » dans la plateforme Geco Ecophytopic⁽²⁾ sous la forme d'un espace thématique de connaissances.

Comme illustré sur la figure 11.6, l'outil permet de découvrir douze leviers d'adaptation que les exploitations agricoles peuvent activer pour améliorer leur résilience vis-à-vis des stress hydrique et thermique.

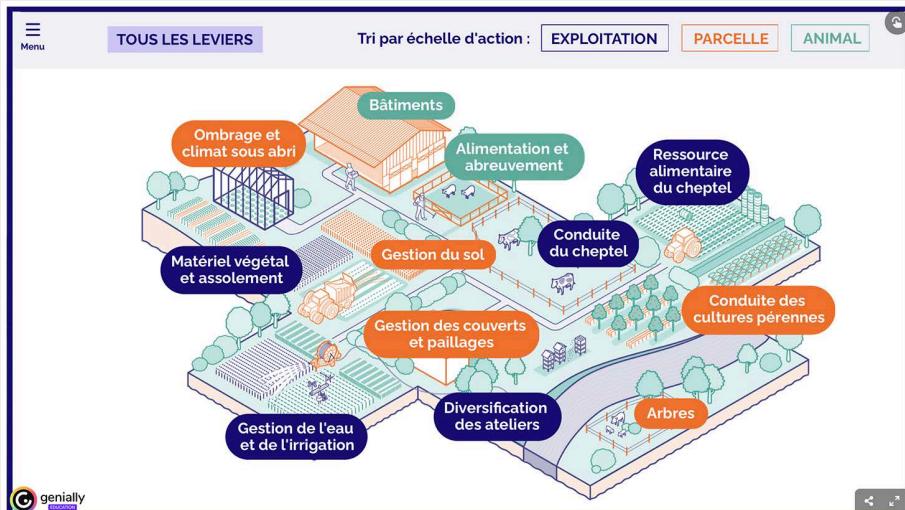


Figure 11.6. Leviers d'adaptation aux stress hydrique et thermique à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation. Source : GECO, un outil du portail Ecophytopic (<https://geco.ecophytopic.fr/adaptation-changement-climatique>).

47. <https://www.vignevin.com/article/sia-les-avanceses-des-actions-face-au-changement-climatique/>

Pour chacun de ces leviers, un ensemble de pratiques et de techniques agricoles ont été recensées pour un grand nombre de filières végétales (annuelles ou pérennes) et animales. L'outil permet d'accéder à une vue globale de toutes les techniques déployables au sein d'un même levier, et propose d'accéder à des fiches Geco spécifiques à chaque technique (90 fiches actuellement). Chaque fiche technique contient : une description de la technique, de son mécanisme d'action, de ses conditions d'efficacité et de ses limites; une sélection de ressources techniques (guides, résultats d'essais, retours d'expérience, etc.); une évaluation de la technique selon quatre critères (délai de mise en place, coût, délai d'effet et effet sur l'atténuation).

⁽¹⁾ <https://cellule-rit.acta.asso.fr>

⁽²⁾ <https://geco.ecophytopic.fr/adaptation-changement-climatique>

La conception et l'évaluation de ces stratégies d'adaptation s'appuieront sur une gamme de méthodes comme la modélisation (voir chapitre 4), l'expérimentation à la ferme ou les jeux sérieux (voir chapitre 13).

► Références

- Abildtrup J., Audsley E., Fekete-Farkas M., Giupponi C., Gylling M., Rosato P. *et al.*, 2006. Socio-economic scenario development for the assessment of climate change impacts on agricultural land use: a pairwise comparison approach, *Environmental Science & Policy*, 9, 101-115, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.11.002>.
- Abramoff R.Z., Ciais P., Zhu P., Hasegawa T., Wakatsuki H., Makowski D., 2023. Adaptation strategies strongly reduce the future impacts of climate change on simulated crop yields, *Earth's Future*, 11, e2022EF003190, <https://doi.org/10.1029/2022EF003190>.
- Agreste, 2023. Irrigation – Bassin Adour-Garonne. L'irrigation, un atout pour les productions agricoles du bassin, *Études* n° 5, 16 p.
- Aguilera E., Diaz-Gaona C., Garcia-Laureano R., Reyes-Palomo C., Guzman G.I., Ortolani L. *et al.*, 2020. Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review, *Agricultural Systems*, 181, 102809, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102809>.
- Alikadic A., Pertot I., Eccel E., Dolci C., Zarbo C., Caffarra A. *et al.*, 2019. The impact of climate change on grapevine phenology and the influence of altitude: a regional study, *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 73-82, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.030>.
- Alletto L., Cueff S., Bréchemier J., Lachaussée M., Derrouch D., Page A. *et al.*, 2022. Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France, *Geoderma*, 428, 116228, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116228>.
- Allinne C., Maury P., Sarrafi A., Grieu P., 2009. Genetic control of physiological traits associated to low temperature growth in sunflower under early sowing conditions, *Plant Science*, 177, 349-359, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.07.002>.
- 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, <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0780-1>.
- Appiah M., Bracho-Mujica G., Ferreira N.C.R., Schulman A.H., Rötter R.P., 2023. Projected impacts of sowing date and cultivar choice on the timing of heat and drought stress in spring barley grown along a European transect, *Field Crops Research*, 291, 108768, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108768>.
- Arvalis, 2024. Choisir et décider Sorgho, variétés et interventions, Synthèse nationale 2022-2023, 51 p.
- Barbault N., 2023. Modélisation de systèmes agroforestiers oléicoles pour évaluer *ex ante* la multifonctionnalité de systèmes co-conçus par des acteurs, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier et université de Montpellier, 288 p., *tel-04540703*.
- Barbeau G., Neethling E., Ollat N., Quénol H., Touzard J.-M., 2015. Adaptation au changement climatique en agronomie viticole, *Agronomie Environnement & Sociétés*, 5(1), 67-75.

- Bassu S., Asseng S., Motzo R., Giunta F., 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment, *Field Crops Research*, 111, 109-118, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.11.002>.
- Bellon-Maurel V., Brossard L., Garcia F., Mitton N., Termier A., 2022. Agriculture et numérique, Inria-INRAE, 195 p., <https://doi.org/10.17180/wmkb-ty56>.
- Bénézit M., Biarnès V., Jeuffroy M.H., 2017. Impact of climate and diseases on pea yields: what perspectives with climate change?, *OCL, Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 24(1), D103, <https://doi.org/10.1051/ocl/2016055>.
- Benoît M., Fournier T., de La Torre C., 2015. Impacts du changement climatique sur les calendriers agricoles : exemples de cultures céréalières du plateau lorrain, *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 5(1), 55-65.
- Bindi M., Olesen J.E., 2011. The responses of agriculture in Europe to climate change, *Regional Environmental Change*, 11(Suppl 1), S151-S158, <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>.
- Bois B., Quénol H., Neethling E., 2024. La variabilité climatique à l'échelle du territoire comme levier d'adaptation, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 132-144.
- 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, <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.07.0369>.
- Bradshaw B., Dolan H., Smit B., 2004. Farm-level adaptation to climatic variability and change: crop diversification in the Canadian Prairies, *Climatic Change*, 67, 119-141, <https://doi.org/10.1007/s10584-004-0710-z>.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences, *Annals of Forest Science*, 63(6), 625-644, <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>.
- Brisson N., Levraud F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impact sur les principales espèces, in Brisson N., Levraud F. (Coords), *Livre vert du projet Climator*, Ademe, 338 p., ISBN 978-2-35838-278-6.
- Brugière F., Aigrain P., Bois B., Duchêne E., Garcia de Cotazar-Atauri I., Gautier J. et al., 2024. Prospective participative et stratégique nationale, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 231-246, ISBN : 978-2-7592-3796-8.
- Cardinael R., Cadisch G., Gosme M., Oelbermann M., Van Noordwijk M., 2021. Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 319, 107555, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555>.
- Ceccarelli S., Grando S., Maatougui M., Michael M., Slash M., Haghparast R. et al., 2010. Plant breeding and climate changes, *The Journal of Agricultural Science*, 148, 627-637, <https://doi.org/10.1017/S0021859610000651>.
- Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.Y., Sauquet É., Vidal J.P. et al., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070?, *La Houille Blanche*, 99(4), 5-15, <https://doi.org/10.1051/lhb/2013027>.
- Clemens M., Faralli M., Lagreze J., Bontempo L., Piazza S., Varotto C. et al., 2022. VvEPFL9-1 Knock-Out via CRISPR/Cas9 reduces stomatal density in grapevine, *Frontiers in Plant Science*, 13, 878001, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.878001>.
- Cliquet J., Poilane A., Surault F., Gastal F., 2019. Pâturage tournant dynamique : quelle correspondance entre les repères d'entrée « hauteur d'herbe » et « stade 3 feuilles » ?, *Fourrages*, 238, 139-141.
- Cooper M., Gho C., Leafgren R., Tang T., Messina C., 2014. Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product, *Journal of Experimental Botany*, 65, 6191-6204, <https://doi.org/10.1093/jxb/eru064>.
- Cordeau S., Maron P.-A., Sarthou J.-P., Chauvel B. (Coords), 2024. *L'Agriculture de conservation des sols*, Versailles, éditions Quæ, 420 p.

- Costes E., Audergon J.-M., Quilot-Turion B., Quero-Garcia J., Denoyes B., Laurens F. *et al.*, 2022. L'amélioration génétique, un levier pour adapter les espèces fruitières aux changements environnementaux, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 357-407.
- Crana, 2020. Oracle Nouvelle-Aquitaine. État des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Nouvelle-Aquitaine, Chambre régionale d'agriculture Nouvelle-Aquitaine, 197 p.
- 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, 1684-169, <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0310s>.
- Daccache A., Keay C., Jones R.J.A., Weatherhead E.K., Stalham M.A., Knox J.W., 2012. Climate change and land suitability for potato production in England and Wales: impacts and adaptation, *Journal of Agricultural Science*, 150, 161-177, <https://doi.org/10.1017/S0021859611000839>.
- Debaeke P., Aboudrare A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments, *European Journal of Agronomy*, 21, 433-446, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.006>.
- Debaeke P., Bergez J.E., Leenhardt D., 2008. Perspectives agronomiques et génétiques pour limiter ou réguler la demande en eau d'irrigation, *La Houille Blanche*, 6, 17-25, <https://doi.org/10.1051/lhb:2008067>.
- Debaeke P., Pellerin S., Scopel E., 2017a. Climate-smart cropping systems in temperate and tropical agriculture: mitigation, adaptation and trade-offs, *Cahiers Agriculture*, 26, 34002, <https://doi.org/10.1051/cagri/2017028>.
- Debaeke P., Casadebaig P., Flénet F., Langlade N., 2017b. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe, *OCL, Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 24, D102, <https://doi.org/10.1051/ocl/2016052>.
- Doll P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective, *Climatic Change*, 54, 269-293, <https://doi.org/10.1023/A:1016124032231>.
- Donatelli M., Srivastava A.K., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D., 2015. Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe, *Environmental Research Letters*, 10, 075005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/075005>.
- Doussan C., Collectif Ruedessols, Cousin I., 2017. La Réserve Utile : concepts, outils, controverses, Atelier du RMT Sols et Territoires, Orléans, 40 p., <https://hal.science/hal-01595478>.
- Drepper B., Bamps B., Gobin A., van Orshoven J., 2022. Strategies for managing spring frost risks in orchards: effectiveness and conditionality – a systematic review, *Environmental Evidence*, 11, 29, <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00281-z>.
- Duchalais A., Schoving C., Constantin J., Champolivier L., Maury P., Debaeke P., 2022. Combining simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the present and future suitability of soybean crop in France, *Phenology 2022 – Phenology at the crossroads*, 20-24 juin, Avignon, France.
- Duchêne E., Marguerit E., Coupel-Ledru A., 2024. Idéotypes de vigne pour l'adaptation au changement climatique, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 76-85.
- Durand J.L., 2020. Irriger les prairies : entre un vrai potentiel agronomique et une ressource en baisse, *Fourrages*, 244, 39-46.
- Durand J.L., Lemaire G., Gosse G., Chartier M., 1989. Analyse de la conversion de l'énergie solaire en matière sèche par un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.) soumis à un déficit hydrique, *Agronomie*, 9, 599-607, <https://doi.org/10.1051/agro:19890608>.
- Durand J.L., Bernard F., Lardy R., Graux A.I., 2010. Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts, in Brisson N., Levraud F. (Coords), *Livre vert du projet Climator*, Ademe, 181-190.
- Falloon P., Betts R., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation – The importance of an integrated approach, *Science of the Total Environment*, 408, 5667-5687, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.002>.

- Gabaldón-Leal C., Lorite I.J., Mínguez M.I., Lizaso J.I., Dosio A., Sanchez E. *et al.*, 2015. Strategies for adapting maize to climate change and extreme temperatures in Andalusia, Spain, *Climate Research*, 65, 159-173, <https://doi.org/10.3354/cr01311>.
- Gautier H., Baldazzi V., Bertin N., Vercambre G., Génard M., Quilot-Turion B. *et al.*, 2022. Anticiper les impacts du changement climatique sur la qualité des fruits et le rendement : l'apport de la modélisation, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 289-318.
- Grigorieva E., Livenets A., Stelmakh E., 2023. Adaptation of agriculture to climate change: A scoping review, *Climate*, 11, 202, <https://doi.org/10.3390/cli11100202>.
- Grimaldi J., 2018. Impacts of agroforestry on microclimate for grape and wine production: assessment in Southern France, thèse de doctorat, université Toulouse-III Paul Sabatier, <https://theses.hal.science/tel-03515990>.
- Henry R.J., 2020. Innovations in plant genetics adapting agriculture to climate change, *Current Opinion in Plant Biology*, 56, 168-173, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.11.004>.
- Herbe-book. La base de données en ligne des variétés fourragères, Semae, <https://www.herbe-book.org/>.
- Hernández-Morcillo M., Burgess P., Mirck J., Pantera A., Plieninger T., 2018. Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe, *Environmental Science & Policy*, 80, 44-52, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.013>.
- Hill S.B., Mac Rae R.J., 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture, *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1), 81-87, https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07.
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 103, 1-25, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018>.
- Holzkämper A., 2020. Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland, *Agricultural Water Management*, 237, 106202, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106202>.
- Howden S.M., Soussana J.F., Tubiello F.N., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H., 2007. Adapting agriculture to climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104, 19691-19696, <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>.
- Jones R.N., Mearns L.O., 2005. Assessing future climate risks, in *Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies and measures*, B. Lim, E. Spanger-Siegfried, I. Burton, E. Malone, S. Huq (Eds), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 119-143.
- Jung J., Maeda M., Chang A., Bhandari M., Ashapure A., Landivar-Bowles J., 2021. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems, *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 15-22, <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>.
- Kallida R., Zhouri L., Volaire F., Guerin A., Julier B., Shaimi N. *et al.*, 2016. Combining drought survival via summer dormancy and annual biomass productivity in *Dactylis glomerata* L., *Frontiers in Plant Science*, 7, 82, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00082>.
- Kates R.W., Travis W.R., Wilbanks T.J., 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 109(19), 7156-7161, <https://doi.org/10.1073/pnas.1115521109>.
- Kersebaum K.C., 2022. Modelling to evaluate climate resilience of crop rotations under climate change, in Kondrup C. *et al.* (Eds), *Climate Adaptation Modelling*, Springer Climate, 87-93, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4>.
- Labeyrie V., Renard D., Aumeeruddy-Thomas Y., Benyei P., Caillon S., Calvet-Mir L. *et al.*, 2021. The role of crop diversity in climate change adaptation: insights from local observations to inform decision making in agriculture, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 51, 15-23, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.006>.
- Lamichhane J.R., Alletto L., Cong W., Dayoub E., Maury P., Plaza-Bonilla D., Reckling M., Saia S., Soltani E., Tison G., Debaeke P., 2023. Relay cropping for sustainable intensification of agriculture across temperate regions: crop management challenges and future research priorities, *Field Crops Research*, 291, 108795, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108795>.

- Lauri P.-E., Lubello P., Warlop F., 2022. L'adaptation des productions fruitières au changement climatique par l'évolution des systèmes et des aires de culture, in Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 409-436.
- Legave J.-M., 2022. *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 462 p.
- Lehmann N., Finger R., Klein T., Calanca P., Walter A., 2013. Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale, *Agricultural Systems*, 117, 55-65, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.12.011>.
- Lemaire G., 2008. Sécheresse et production fourragère, *Innovations Agronomiques*, 2, 107-123, <https://doi.org/10.17180/ypfa-3k85>.
- Liagre F., Marin A., Ori D., Béral C., 2020. Production d'herbe et de feuilles d'arbres en fonction de la densité de plantation et de la gestion des houppiers, *Fourrages*, 242, 87-94.
- Litrico I., Barkaoui K., Barradas A., Barre P., Beguier V., Birouste M. et al., 2016. Utiliser les mélanges fourragers pour s'adapter au changement climatique : opportunités et défis, *Fourrages*, 225, 11-20.
- Lorite I.J., Castilla A., Cabezas J.M., Alza J., Santos C., Porras R. et al., 2023. Analyzing the impact of extreme heat events and drought on wheat yield and protein concentration, and adaptation strategies using long-term cultivar trials under semi-arid conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 329, 109279, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109279>.
- Magrini M.B., Anton M., Cholez C., Corre-Hellou G., Duc G., Jeuffroy M.H. et al., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agri-food system, *Ecological Economics*, 126, 152-162, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>.
- Martin G., Durand J.L., Duru M., Gastal F., Julier B., Litrico I. et al., 2020. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 17, 1-25, <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00620-9>.
- Maury P., Andrianasolo F.N., Alric F., Berger M., Beugniet G., Chambert C. et al., 2015. Le semis très précoce : une stratégie agronomique pour améliorer les performances du soja en France ?, *OCN, Oilseeds and Fats*, 22(5), D503, <https://doi.org/10.1051/ocl/2015028>.
- Meilhac J., Durand J.L., Béguier V., Litrico I., 2019. Increasing the benefits of species diversity in multispecies temporary grasslands by increasing within-species diversity, *Annals of Botany*, 123, 891-900, <https://doi.org/10.1093/aob/mcy227>.
- Mérot A., Thiollet-Scholtus M., Martinez A., 2023. Towards stopping pesticides: survey identification of on farm solutions, 22nd Giesco International meeting, 17-21 juillet, Cornell, Ithaca (NY), États-Unis.
- Métay A., Métral R., Gaviglio C., van Leeuwen C., 2024. Modes de conduite et gestion des sols, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 86-105.
- Meyer N., Bergez J.E., Constantin J., Justes E., 2019. Cover crops reduce water drainage in temperate climates: A meta-analysis, *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 3, <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0546-y>.
- Meyer N., Bergez J.E., Constantin J., Belleville P., Justes E., 2020. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management. *Agricultural Water Management*, 231, 105998, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105998>.
- Meza J.F., Silva D., Vigil H., 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative, *Agricultural Systems*, 98, 21-30, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.03.005>.
- Michaud A., Plantureux S., Baumont R., Delaby l., 2021. Les prairies, une richesse et un support d'innovation pour des élevages de ruminants plus durables et acceptables, *INRAE Productions Animales*, 33, 153-172, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2020.33.3.4543>.
- Minoli S., Jägermeyr J., Asseng S., Urfels A., Müller C., 2022. Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change, *Nature Communications*, 13, 7079, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>.

- Molénat J., Barkaoui K., Benyoussef S., Mekki I., Zitouna R., Jacob F., 2023. Diversification from field to landscape to adapt Mediterranean rainfed agriculture to water scarcity in climate change context, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 65, 101336, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101336>.
- Moreau J.C., Béral C., Hannachi Y., Lavoyer S., Monier S., Novak S. *et al.*, 2020. Arbele – L’arbre dans les exploitations d’élevage herbivore : des fonctions et usages multiples, *Innovations Agronomiques*, 79, 499-521, <http://doi.10.15454/zrtp-av46>.
- Moriondo M., Bindi M., Kundzewicz Z.W., Szwed M., Chorynski A., Matczak P. *et al.*, 2010. Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15, 657-679, <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9219-0>.
- Moser S.C., Ekstrom J.A., 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 107, 22026-22031, <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C., Frick R., Boller B., 2015. Modes d’exploitation, contraintes climatiques : les comportements des mélanges d’espèces en polyculture élevage et leur certification, Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie (métaprogramme ACCAF), Poitiers, 16-17 novembre, Inra, 167-175.
- Mosimann E., Bossuyt N., Frund D., Vuffray Z., Bittar A., Calanca P. *et al.*, 2017. Préparation de la production fourragère au changement climatique, *Agroscope Science*, 49, 36 p.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Hossard L., 2021a. Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production – A systematic review, *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-20, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607859>.
- Naulleau A., Prévot L., Gary C., Hossard L., 2021b. Penser l’adaptation au changement climatique au sein d’un territoire viticole : l’apport des modèles dans une réflexion multi-acteur, *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 11(2), 12-25.
- Neethling E., Duchêne E., van Leeuwen C., Marguerit E., Goulet E., Grondain V., 2023. Sustaining wine identity through intra-varietal diversification, *Ives Technical Reviews*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7510>.
- Nendel C., Kersebaum K.C., Mirscheil W., Wenkel K.O., 2014. Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model, *European Journal of Agronomy*, 52, 47-56, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.005>.
- Nendel C., Reckling M., Debaeke P., Schulz S., Berg-Mohnicke M., Constantin J. *et al.*, 2023. Future area expansion outweighs increasing drought risk for soybean in Europe, *Global Change Biology*, 29, 1340-1358, <https://doi.org/10.1111/gcb.16562>.
- Nguyen Q., Hoang M.H., Oborn I., van Noordwijk M., 2013. Multipurpose agroforestry as a climate change resiliency option for farmers: an example of local adaptation in Vietnam, *Climatic Change*, 117, 241-257, <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0550-1>.
- Nielsen D.C., Unger P.W., Miller P.R., 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the Great Plains, *Agronomy Journal*, 97, 364-372, <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0364>.
- Olesen J.E., Carter T.R., Diaz-Ambrona C.H., Fronzek S., Heidmann T., Hickler T. *et al.*, 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models, *Climatic Change*, 81, 123-143, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9216-1>.
- Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvag A., Seguin B., Peltonen-Sainio P. *et al.*, 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change, *European Journal of Agronomy*, 34, 96-112, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>.
- Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 282 p.
- Ollat N., Cookson S.J., Destrac-Irvine A., Lauvergeat V., Ouaked-Lecourieux F., Marguerit E. *et al.*, 2019. Grapevine adaptation to abiotic stress: an overview, *Acta Horticulturae*, 1248, 497-512, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1248.68>.
- Ollat N., van Leeuwen C., Yobregat O., Julliard S., Bordenave L., Lacombe T., 2021. Des milliers de cépages : une clef face au changement climatique, in *Les Raisins de Pierre-Joseph Redouté : des aquarelles pour l’avenir de la vigne*, éditions Paulsen, Paris, p. 225-245.

- Parent B., Leclère 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, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 115, 10642-10647, <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>.
- Parker P.S., Shonkwiler J.S., Aurbacher J., 2017. Cause and consequence in maize planting dates in Germany, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203, 227-240, <https://doi.org/10.1111/jac.12182>.
- Parra-López C., Ben Abdallah S., García-García G., Hassoun A., Sánchez-Zamora P., Trollman H. *et al.*, 2024. Integrating digital technologies in agriculture for climate change adaptation and mitigation: State of the art and future perspectives, *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, 109412, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109412>.
- Pitchers B., Do F.C., Pradal C., Dufour L., Lauri P.-E., 2021. Apple tree adaptation to shade in agroforestry: an architectural approach, *American Journal of Botany*, 108(5), 732-743, <https://doi.org/10.1002/ajb2.1652>.
- Pitchers J., Ferrand N., Pull M., Minette S., Abella M., Debaeke P., 2023. Opportunities and risks of double cropping in southwestern France with a focus on soybean and sunflower crops, *OC&L, Oilseeds & fats Crops and Lipids*, 30, 16, <https://doi.org/10.1051/ocl/2023016>.
- Poni S., 2023. *Designing and managing a sustainable vineyard in a climate change scenario*, Poni S. (Ed.), 154 p.
- Porter J.R., Durand J.L., Elmayan T., 2016. Edited plants should not be patented, *Nature*, 530(7588), 33, <https://doi.org/10.1038/530033b>.
- Poux X., Aubert P.M., 2022. Putting permanent grassland at the heart of a European agroecological transition: Findings and questions arising from the 'Ten Years for Agroecology' (TYFA) scenario, *Grass and Forage Science*, 77, 257-269, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gfs.12597>.
- Quandt A., Neufeldt H., Gorman K., 2023. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, 101244, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>.
- de Rességuier L., Mary S., Le Roux R., Petitjean T., Quénol H., van Leeuwen C., 2020. Temperature variability at local scale in the Bordeaux area. Relations with environmental factors and impact on vine phenology, *Frontiers in Plant Science*, 11, 515, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00515>.
- de Rességuier L., Pieri P., Mary S., Pons R., Petitjean T., van Leeuwen C., 2023. Characterisation of the vertical temperature gradient in the canopy reveals increased trunk height to be a potential adaptation to climate change, *OENO-One*, 57(1), 41-53, <https://doi.org/10.20870/oenone.2023.57.1.5365>.
- Ricart S., Gandolfi C., Castelletti A., 2023. Climate change awareness, perceived impacts, and adaptation from farmers' experience and behavior: a triple-loop review, *Regional Environmental Change*, 23, 82, <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02078-3>.
- Rickards L., Howden S.M., 2012. Transformational adaptation: agriculture and climate change, *Crop and Pasture Science*, 63, 240-260, <https://doi.org/10.1071/CP11172>.
- Rolo V., Rivest D., Maillard E., Moreno G., 2023. Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil-based perspective, *Soil Use and Management*, 39, 1006-1032, <https://doi.org/10.1111/sum.12932>.
- Rouet S., Barillot R., Leclercq D., Bernicot M.H., Combes D., Escobar-Gutiérrez A. *et al.*, 2021. Interactions between environment and genetic diversity in perennial grass phenology: a review of processes at plant scale and modeling, *Frontiers in Plant Science*, 12, 672156, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.672156>.
- Ruget F., Durand J.L., Ripoche D., Graux A.I., Bernard F., Lacroix B., Moreau J., 2013. Impacts des changements climatiques sur les productions de fourrages (prairies, luzerne, maïs) : variabilité selon les régions et les saisons, *Fourrages*, 214, 99-109.
- Sampoux J.P., Baudouin P., Bayle B., Béguier V., Bourdon P., Chosson J.F. *et al.*, 2011. Breeding perennial grasses for forage usage : An experimental assessment of trait changes in diploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars released in the last four decades, *Field Crops Research*, 123, 117-129, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.007>.

- Schoeneberger M., Bentrup G., de Gooijer H., Soolanayakanahally R., Sauer T., Brandle J. *et al.*, 2012. Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture, *Journal of Soil and Water Conservation*, 67, 128-136, <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.128A>.
- Schultz H., 2022. Soil, vine, climate change; the challenge of predicting soil carbon changes and greenhouse gas emissions in vineyards and is the 4 per 1000 goal realistic?, *OENO-One*, 56(2), 251-263, <https://doi.org/10.20870/oenone.2022.56.2.5447>.
- Scopel E., Triomphe B., Affholder F., Da Silva F.A.M., Corbeels M., Xavier J.H.V. *et al.*, 2013. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 113-130, <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0106-9>.
- Seifert C.A., Lobell D.B., 2015. Response of double cropping suitability to climate change in the United States, *Environmental Research Letters*, 10, 024002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024002>.
- Senthilkumar K., Bergez J.E., Leenhardt D., 2015. Can farmers use maize earliness choice and sowing dates to cope with future water scarcity? A modelling approach applied to south-western France, *Agricultural Water Management*, 152, 125-134, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.004>.
- Simon-Miquel G., Reckling M., Lampurlanes J., Plaza-Bonilla D., 2023. A win-win situation – Increasing protein production and reducing synthetic N fertilizer use by integrating soybean into irrigated Mediterranean cropping systems, *European Journal of Agronomy*, 146, 126817, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126817>.
- Simon-Miquel G., Reckling M., Plaza-Bonilla D., 2024. Maximising soybean productivity with late maturity groups in Mediterranean irrigated systems, *Field Crops Research*, 307, 109274, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109274>.
- Simonneau T., van Leeuwen C., Coulouma G., Saurin N., La Jeunesse I., Ollat N., 2024. La gestion de l'eau, *in* Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 106-120.
- Smit B., Skinner M.W., 2002. Adaptation options in agriculture to climate change: a typology, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7, 85-114, <https://doi.org/10.1023/A:1015862228270>.
- Snowdon R.J., Wittkop B., Chen T.W., Stahl A., 2021. Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding, *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1613-1623, <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>.
- Soriano M.A., Orgaz F., Villalobos F.J., Fereres E., 2004. Efficiency of water use of early plantings of sunflower, *European Journal of Agronomy*, 21, 465-476, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.001>.
- Stewart B.A., Nielsen D.R. (Eds), 1990. *Irrigation of agricultural crops*, Agronomy Monograph 30, ASA-CSSA-SSSA, Madison (WI), États-Unis.
- Tardieu F., 2012. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario, *Journal of Experimental Botany*, 63, 25-31, <https://doi.org/10.1093/jxb/err269>.
- Terasaki Hart D.E., Yeo S., Almaraz M. *et al.*, 2023. Priority science can accelerate agroforestry as a natural climate solution, *Nature Climate Change*, 13, 1179-1190, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01810-5>.
- Thornton P., 2014. Is the IPCC's Fifth Assessment Report telling us anything new about climate change and food security?, Livestock Systems and Environment (LSE), séminaire ILRI, Nairobi, 11 juin 2014.
- Tuck G., Glendining M.J., Smith P., House J.I., Wattenbach M., 2006. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate, *Biomass & Bioenergy*, 30, 183-197, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.019>.
- Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F., Singh R.P., 1991. Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semiarid regions, *Soil & Tillage Research*, 20, 219-240, [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90041-U](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90041-U).
- Vallès A., Carrera A., Marsac S., Gendre S., Tscheiller R., Moynier J.L. *et al.*, 2023. Climassol : l'assolement comme levier d'adaptation des exploitations agricoles face au changement climatique, revue Agronomie Environnement & Sociétés, Association française d'agronomie, 13-1, juin 2023, <https://doi.org/10.54800/ava999>.

- Van Leeuwen C., Pieri P., Gowdy M., Ollat N., Roby J.P., 2019. Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change, *OENO-One*, 53(2), 129-146, <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.2.2420>.
- Van Leeuwen C., Sgubin G., Bois B., Ollat N., Swingedouw D., Zito S. *et al.*, 2024. Climate change impacts and adaptations of wine production, *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 258-275, <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5>.
- Volaire F., 1995. Growth, carbohydrate reserves and drought survival strategies of contrasting *Dactylis glomerata* populations in a Mediterranean environment, *Journal of Applied Ecology*, 32, 56-66, <https://doi.org/10.2307/2404415>.
- Volaire F., Ahmed L.Q., Barre P., Bourgoin T., Durand J.L., Escobar-Gutiérrez A.J. *et al.*, 2016. Quelle est la variabilité intra et interspécifique des caractères d'adaptation des espèces prairiales pérennes aux variables du changement climatique?, *Fourrages*, 225, 1-19.
- Wakatsuki H., Ju H., Nelson G.C., Farrell A.D., Deryng D., Meza F. *et al.*, 2023. Research trends and gaps in climate change impacts and adaptation potentials in major crops, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, 101249, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101249>.
- Wenden B., Chuine I., Farrera I., García de Cortázar-Atauri, Legave J.-M., 2022. Des modèles prédictifs comme outils d'anticipation des changements phénologiques chez les espèces fruitières, *in* Legave J.-M. (Coord.), *Les Productions fruitières à l'heure du changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 227-258.
- Willaume M., Rollin A., Casagrande M., 2014. Farmers in southwestern France think that their arable cropping systems are already adapted to face climate change, *Regional Environmental Change*, 14, 333-345, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0496-5>.
- Wittling C., Ruelle P. (Coords), 2022. *Guide pratique de l'irrigation*, 4^e édition, Versailles, éditions Quæ.
- Xiong W., Reynolds M., Xu Y., 2022. Climate change challenges plant breeding, *Current Opinion in Plant Biology*, 70, 102308, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102308>.
- Yang C., Fraga H., van Ieperen W., Trindade H., Santos J.A., 2019. Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal, *Climatic Change*, 154, 159-178, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02419-4>.
- Zavlyanova M., Bonnardot V., van Leeuwen C., Quénol H., Ollat N., 2023. The use of GFV and GSR temperature-based models in emerging wine regions to help decision-making regarding choices in grape varieties and wine styles. Application to Brittany (France), *Vitis*, 62, 10-26, <https://doi.org/10.5073/vitis.2023.62.10-26>.
- Zhao G., Webber H., Hoffmann H., Wolf J., Siebert S., Ewert F., 2015. The implication of irrigation in climate change impact assessment: a European-wide study, *Global Change Biology*, 21, 4031-4048, <https://doi.org/10.1111/gcb.13008>.
- Zhao J., Bindi M., Eitzinger J., Ferrise R., Gaile Z., Gobin A. *et al.*, 2022. Priority for climate adaptation measures in European crop production systems, *European Journal of Agronomy*, 138, 126516, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>.
- 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, 4097-4105, <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1005>.

Chapitre 12

Adaptation de l'élevage au changement climatique

*David Renaudeau, Jean-Christophe Bambou, Anne Collin,
Luc Delaby, Jean-Luc Gourdine, Sylvie Lecollinet, Sandra Novak,
Aurélie Vinet, Hélène Gilbert*

Sous l'effet des émissions anthropiques, l'augmentation de la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre s'est traduite par une hausse de la température moyenne continentale (+ 1,6 °C à l'échelle mondiale), et par une augmentation des fréquences et des amplitudes des aléas et des événements extrêmes (IPCC, 2023). Ces changements ont des conséquences déjà visibles sur les filières animales, augmentant notamment les incertitudes sur la disponibilité et sur la qualité des ressources utilisées pour alimenter les animaux, l'émergence ou la réémergence de maladies, ou générant des pertes de production durant les vagues de chaleur (voir chapitre 9). Dans les prochaines décennies, l'évolution tendancielle du climat va continuer à affecter en profondeur le secteur de l'élevage, avec des enjeux majeurs autour de sa capacité à s'adapter à cet environnement changeant, en particulier à l'occurrence d'aléas variés et interconnectés.

Pour gérer les aléas et pour adapter leurs pratiques, les éleveurs peuvent mettre en place des stratégies très diverses, qui mobilisent différents leviers biotechniques ou organisationnels. Ces stratégies couvrent un gradient d'approches allant de mesures incrémentales pour anticiper ou pour corriger les impacts du changement climatique par une extension directe des pratiques et des systèmes de production actuels, à des adaptations « transformantes » destinées à faire évoluer les systèmes en profondeur pour les rendre moins vulnérables à terme à des aléas climatiques récurrents (Leclère *et al.*, 2014). Parmi les stratégies d'adaptation incrémentales disponibles, certaines peuvent être internalisées dans le système (par exemple le changement de la conduite des animaux ou du système fourrager, la mise en place de solutions de « refroidissement », etc.) et d'autres, externalisées au niveau du territoire ou au-delà (par exemple les achats de fourrages, l'évolution des schémas génétiques des animaux, la gestion collective de l'eau ou des risques de perte de production *via* des contrats d'assurance, etc.) (Noury *et al.*, 2013). Ces différentes stratégies ne sont pas exclusives et peuvent être combinées. Compte tenu des enjeux majeurs d'adaptation et d'atténuation face au changement global, il est admis que, sur le long terme, les stratégies incrémentales seront probablement insuffisantes et devront être associées à des adaptations « transformantes », pouvant aller du changement radical des objectifs de production à une relocalisation des exploitations (Rigolot *et al.*, 2019).

Ce chapitre propose de faire la synthèse des stratégies d'adaptation actuellement disponibles ou qui pourraient l'être prochainement pour améliorer la résilience des systèmes d'élevage face au changement climatique.

► Adaptation des conduites générales des animaux ou des troupeaux

De nombreux leviers en lien avec les conduites d'élevage peuvent être utilisés pour atténuer les impacts du changement climatique. Ils mobilisent des adaptations de la conduite alimentaire, de la gestion de la reproduction et des modalités de logement des animaux.

Stratégies impliquant des modifications de la gestion des ressources alimentaires des animaux

Adaptation du système fourrager et de la gestion des ressources

L'élevage des ruminants en France se caractérise par une autonomie alimentaire élevée (Rouillé *et al.*, 2014), essentiellement du fait qu'il repose sur la consommation de fourrages, dont la production est réalisée sur ou à proximité de l'exploitation détentrice du cheptel. Cette autonomie nécessaire à la viabilité économique de l'élevage induit une sensibilité accrue des systèmes au changement climatique. Sa conséquence la plus dommageable fait suite à la survenue de périodes de sécheresse, associées ou non à des phases de canicule : l'absence durable de pluies, notamment en période estivale, entraîne alors une baisse, voire un arrêt de la croissance des végétaux, avec pour conséquence une réduction de la disponibilité immédiate en fourrages à pâtrurer, ou une baisse de rendement à la récolte, quelques semaines plus tard.

Diverses options dans la gestion des ressources fourragères sont envisageables afin d'éviter ou de pallier les conséquences d'une moindre disponibilité en fourrages. Les choix d'adaptation tactiques ou stratégiques, à court ou plus long terme, vont dépendre de la fréquence de l'occurrence de l'événement climatique défavorable (Lemaire et Pflimlin, 2007; Moreau et Lorgeou, 2007). En cas d'événements peu fréquents, l'éleveur développera des solutions palliatives et avec peu d'impact sur le système d'élevage, tel que cela se pratique avec l'apport de fourrages conservés, récoltés lors de périodes favorables. À l'inverse, en cas d'événements climatiques plus fréquents, des modifications structurelles sont alors mises en œuvre, tant au niveau de l'assoulement que de la conduite des troupeaux. La stratégie d'évitement consiste à récolter des fourrages avant que n'intervienne la phase critique, par exemple en période de sécheresse. C'est un des atouts des récoltes précoces d'herbe au printemps, et également des mélange (mélanges de céréales-protéagineux récoltés en plante entière, avant la maturité des grains) ensilés avant l'été (Emile *et al.*, 2016). D'autres cultures sont réputées plus résistantes aux sécheresses et aux vagues de chaleur et moins gourmandes en eau, tels la luzerne, le trèfle violet et le sorgho. Elles ne sont cependant pas exemptes de contraintes agronomiques qui empêchent leur culture dans certaines régions. Une autre pratique fréquente et facile dans le cas du maïs consiste à semer plus de surfaces que nécessaire. Cette culture à double fin (grain ou ensilage) permet de différer la décision de son orientation finale en automne, au moment de la récolte et ce, en fonction des conditions climatiques passées. Les betteraves fourragères semées au printemps et pouvant être

pâturées à partir d'août sont également une ressource fourragère d'intérêt (Novak *et al.*, 2022a). Enfin, les cultures dérobées estivales ou automnales, semées après l'ensilage des mœufs ou après la récolte des céréales à paille, permettent de pallier un déficit de stocks, même si ces fourrages (moha, millet fourrager, colza, navet fourrager, ray-grass d'Italie) à pousse rapide se caractérisent parfois par des valeurs alimentaires faibles qui les destinent plutôt à des animaux aux besoins limités (Delaby *et al.*, 2022). Dans le cas des prairies, outre les légumineuses déjà citées, certaines graminées telles que la fétuque élevée ou le dactyle résistent mieux aux températures élevées que le ray-grass anglais, ce qui leur confère une capacité à reprendre leur croissance plus rapidement en cas de retour des pluies, notamment en automne. D'autres dicotylédones (chicorée, plantain), grâce à leur système racinaire particulier ou leur moindre évapotranspiration, ont également démontré leur capacité à mieux résister aux phases de sécheresse et de canicule. Ces plantes sont souvent proposées lors de l'implantation de prairies multi-espèces (Lüscher *et al.*, 2023). La présence de légumineuses, notamment le trèfle blanc dont la valeur alimentaire diminue lentement avec l'âge de repousse, permet à court terme de pratiquer le report sur pied et de valoriser plus tardivement des stocks d'herbe accumulés avant l'occurrence de la sécheresse. Enfin, les prairies, parce qu'elles sont en place toute l'année et présentent une capacité de résilience élevée, offrent des opportunités de rebond intéressantes à saisir. Le changement climatique avec ses printemps plus précoces et ses automnes plus chauds favorise la croissance de l'herbe à des périodes où classiquement la pratique du pâturage est possible. Si la portance du sol le permet, pâturer tôt au printemps et tard en automne contribue à économiser des stocks, dont l'utilité peut s'avérer précieuse à d'autres saisons moins favorables.

Lorsque des perturbations climatiques sont systématiques et répétées, des changements profonds de système fourrager deviennent nécessaires. Il importe alors d'adapter le chargement (le nombre d'animaux à nourrir par hectare de fourrages) aux années les plus risquées, les plus difficiles, afin de garantir l'autonomie fourragère de l'élevage. Outre l'effectif d'animaux, les surfaces fourragères peuvent souvent être accrues au détriment des cultures de vente, notamment les surfaces à proximité des bâtiments, accessibles au pâturage. L'ensemble des moyens et des méthodes (diversité fourragère, cultures adaptées à la sécheresse, pratiques opportunistes) décrits ci-dessus est alors à mettre en œuvre systématiquement. La diversification des espèces doit concerner idéalement à la fois les prairies et les cultures annuelles, à l'échelle de l'assoulement et de la parcelle. Elle peut aller jusqu'à l'implantation d'arbres fourrager, pouvant fournir une ressource de bonne qualité en été et en début d'automne (Novak *et al.*, 2020a). Enfin, le report de stocks d'une année faste à une année de « vaches maigres » est une pratique connue de longue date, notamment dans les systèmes nécessitant la réalisation de beaucoup de stocks, peu diversifiés. Il s'agit notamment de systèmes herbagers soumis à des hivers longs (et/ou des étés très secs), comme dans les zones de montagne et de piémont qui ont l'habitude de « jouer » avec les reports de stocks d'une année sur l'autre pour gérer les incertitudes interannuelles de la productivité des prairies.

Modification de la composition de la ration

Des stratégies visant à modifier la composition des aliments concentrés peuvent être proposées pour répondre aux besoins des éleveurs confrontés à des épisodes de fortes chaleurs. Encore peu développées en France, elles le sont beaucoup plus en Espagne et dans les autres grands bassins mondiaux de production de porcs (Brésil, Australie,

Asie du Sud-Est) soumis à de longues périodes de fortes températures. Ces stratégies permettent de lutter contre les conséquences du stress thermique sur les animaux d'élevage (désordres métaboliques et physiologiques). Il s'agit notamment de compenser la baisse d'ingestion de nutriments énergétiques et/ou protéiques en formulant des aliments densifiés en ces mêmes nutriments, afin de maintenir les apports quotidiens et les performances de production des animaux. Ainsi, chez le porc, l'augmentation de la teneur en énergie nette des aliments permet d'atténuer les effets de la chaleur pour des stades physiologiques très sensibles à la température (truite en lactation, porc en finition) (Renaudeau *et al.*, 2012). Chez la volaille, si une augmentation de la teneur en protéines des régimes n'offre que peu d'intérêts en matière de performances du poulet de chair, la stratégie visant à limiter les apports en protéines tout en optimisant l'ingéré en acides aminés relativement aux besoins des animaux soumis à la chaleur est une voie à approfondir, avec des bénéfices à la fois sur les performances des animaux et sur la réduction des rejets azotés (Collin *et al.*, 2024). Chez les ruminants, il est également recommandé de concentrer la ration en protéines et en énergie, et de réduire les apports en fourrages secs, tout en veillant à maintenir un taux suffisant en cellulose pour limiter les risques de dysfonctionnement de la physiologie ruminale.

Au cours d'une exposition à la chaleur, les réponses adaptatives mises en place pour éviter une hyperthermie (réduction de la consommation d'aliments et du métabolisme, modulation du fonctionnement des systèmes cardio-vasculaire et cardio-respiratoire, etc.) peuvent se traduire par un certain nombre de déséquilibres physiologiques qui, lorsqu'ils ne sont pas corrigés, ont des conséquences négatives sur la santé, le bien-être et les performances des animaux. Ainsi, il est par exemple nécessaire de compenser par la voie alimentaire les pertes de minéraux (potassium, sodium, magnésium, chlore) liées à l'augmentation des déperditions de chaleur par la voie latente (sudation, hyperventilation respiratoire) ou par l'excration urinaire, en relevant l'équilibre alimentaire anions-cations, notamment chez la vache laitière (Block, 1994) ou en ajustant le bilan électrolytique chez la volaille (Gamba *et al.*, 2015). Chez la poule pondeuse exposée à la chaleur, un déséquilibre acido-basique du sang peut apparaître, qui nécessite une attention particulière à la nutrition calcique pour limiter ses impacts sur la ponte et le risque de fractures. En condition de stress thermique, la production de composés pro-oxydants issus du métabolisme de l'oxygène utilisé pour la respiration cellulaire augmente. La capacité des défenses antioxydantes peut alors être dépassée. Ce déséquilibre de la balance oxydative (stress oxydant) est généralement accentué par la diminution des apports en antioxydants d'origine alimentaire liée à la réduction de l'ingestion des animaux d'élevage exposés à une température élevée. Le stress oxydant a des effets délétères sur le fonctionnement des cellules et des tissus à fortes demandes métaboliques et physiologiques (muscles squelettiques et cardiaques, glande mammaire, foie et cellules sanguines), qui peuvent altérer la santé et le niveau de production des animaux. Une supplémentation alimentaire en antioxydants enzymatiques (supéroxyde dismutase) ou non enzymatiques (vitamines C et E, sélénium organique, glutathion, polyphénols, extraits de plantes, etc.) est assez couramment pratiquée en élevage avec une efficacité variable dont les déterminants restent encore mal connus. Compte tenu des actions synergiques entre la vitamine E et le sélénium, une supplémentation combinée de ces deux additifs peut limiter les effets négatifs d'un stress thermique chez le porc, chez la volaille et chez les ruminants laitiers (Chauhan *et al.*, 2021). D'autres additifs alimentaires (bétaïne,

levures vivantes) ont également montré leur efficacité en situation de fortes chaleurs grâce à leur action osmorégulatrice ou sur le métabolisme énergétique des animaux d'élevage (Chauhan *et al.*, 2021).

Face à une perturbation sanitaire (par exemple une émergence de maladies à vecteurs) pouvant être indirectement liée à des modifications de certaines composantes du climat, l'utilisation du levier alimentaire pour augmenter la résistance des animaux aux maladies infectieuses est un axe de recherche prometteur. En effet, la réponse immunitaire contre les agents pathogènes est étroitement liée au statut nutritionnel de l'hôte, car particulièrement coûteuse en nutriments. Ainsi, certains micronutriments (vitamines et minéraux) jouent un rôle essentiel dans la régulation des réponses immunitaires. Des carences sont associées à une augmentation de la sensibilité aux maladies, et la supplémentation, à une amélioration des réponses protectrices. L'interaction entre la supplémentation en énergie et en protéines et le parasitisme gastro-intestinal est bien étudiée chez les petits ruminants. Si un impact positif de la supplémentation en nutriments fait consensus, en revanche la contribution respective de l'énergie et des protéines reste discutée (Ceï *et al.*, 2018). Les travaux conduits chez les caprins créoles de Guadeloupe montrent qu'il existe un équilibre entre la quantité et la qualité des protéines alimentaires de la ration qui permet d'améliorer la réponse des caprins créoles contre les parasites gastro-intestinaux ainsi que leurs performances de production (Cériac *et al.*, 2019).

Modification des modalités de distribution de la ration

Au-delà de la possibilité de faire varier la composition de la ration distribuée aux animaux, l'éleveur peut également modifier le rythme et la temporalité de la distribution de la ration, voire (quand les équipements d'élevage le permettent) modifier le lieu de la distribution d'aliment ou utiliser un aliment supplémenté de manière différentiée selon la sensibilité individuelle des animaux aux fortes chaleurs. Ces stratégies sont mises en place uniquement pendant certaines périodes de l'année (périodes de sécheresse, vagues de chaleur), ce qui oblige l'éleveur à renforcer la gestion dynamique de son exploitation.

Les stratégies visant à modifier la répartition de la production de chaleur pour éviter la coïncidence d'une thermogénèse alimentaire importante avec le pic de température du milieu de journée en saison chaude ont été testées notamment chez la volaille. Ainsi la distribution d'un aliment en dehors des heures chaudes ou la limitation de l'ingestion en maintenant l'obscurité pendant ces périodes conduit à limiter l'hyperthermie et les mortalités (Francis *et al.*, 1991), mais cette stratégie appliquée à grande échelle est efficace au prix d'une diminution des performances de croissance et d'un allongement de la durée d'élevage (Picard *et al.*, 1993). Compte tenu des effets de la nature des nutriments sur l'efficacité métabolique avec laquelle les animaux vont les utiliser pour répondre à leurs besoins de production, De Basilio *et al.* (2001) montrent qu'une alimentation alternée entre un aliment riche en protéines en fin d'après-midi et un aliment riche en énergie durant le reste de la journée permet de limiter la hausse de température interne des poulets de chair en période chaude. Plus généralement, une modification du rythme d'alimentation (plus de repas pour limiter les pics de production de chaleur métabolique, distribution de la majorité de la ration très tôt le matin ou tard le soir, etc.) et/ou l'ajout d'eau dans la ration sont des techniques simples à mettre

en place les jours de forte chaleur. Chez les animaux en croissance, une réduction momentanée des apports alimentaires ou l'utilisation de fourrages de moindre qualité sont des leviers qu'il est possible de mobiliser pour aider le troupeau ou la bande d'animaux à mieux tolérer la chaleur et à réduire la mortalité (Picard *et al.*, 1993) ou pour pallier l'absence de ressources pâturees. Une fois cette période de restriction énergétique passée, les animaux peuvent mettre en place des réponses compensatrices, qui dans certaines conditions leur permettent de retrouver une trajectoire de production normale (Hoch *et al.*, 2003).

Compte tenu du surcoût lié à la modification de la composition de la ration destinée aux animaux exposés à une forte température et de la variabilité individuelle de tolérance à la chaleur au sein des troupeaux ou des bandes d'animaux, l'application des stratégies alimentaires listées plus haut pourrait être réservée uniquement aux animaux les plus sensibles, en mobilisant les principes de l'alimentation individualisée de précision. Même si elles sont prometteuses, ces approches ont été peu investiguées (Santos *et al.*, 2018) et restent pour l'instant compliquées à mettre en place en élevage pour des raisons pratiques (détection des animaux « sensibles », disponibilité des équipements pour distribuer les aliments, etc.).

Gestion des apports en eau

L'eau est le principal constituant corporel et demeure indispensable pour le transport des nutriments, pour la synthèse des produits animaux (viande, œufs et lait) et pour l'élimination des déchets de l'organisme *via* l'urine. Elle est essentielle au contrôle de la température interne en facilitant le transport de la chaleur des parties internes vers la surface corporelle et le refroidissement par l'évaporation sudorale et respiratoire. L'eau consommée par les animaux d'élevage est principalement apportée par l'alimentation (par les concentrés ou les fourrages) et l'eau de boisson. Une bonne gestion de l'abreuvement des animaux exposés à de fortes chaleurs est donc cruciale. À titre d'exemple, une vache laitière peut consommer entre 50 et 100 litres d'eau par jour, voire 150 litres lorsqu'il fait très chaud. En pratique, il est donc nécessaire de prévoir suffisamment de points d'eau dans les bâtiments d'élevage comme au pâturage pour que tous les animaux puissent boire sans compétition excessive et pour limiter les facteurs qui pourraient limiter la consommation d'eau (mauvaise qualité sanitaire, température trop élevée, etc.). Contrairement à la consommation d'aliments, les quantités d'eau bues augmentent en condition de stress thermique et, par conséquent, une supplémentation de l'eau avec des électrolytes (Na^+ , K^+ , Cl^-) ou des molécules fonctionnelles (antioxydants, osmolytes, acides aminés) peut donc s'avérer une stratégie efficace pour aider les animaux exposés momentanément à une forte chaleur. Ce type de solutions disponibles sur le terrain existe et leur efficacité a été objectivée principalement en volaille. Ainsi, en volaille de chair, l'ajout d'électrolytes ou d'un mélange de bétaïne et de vitamine C permet d'atténuer les effets de la chaleur sur la croissance des animaux (Shin *et al.*, 2019; Elshafaei *et al.*, 2020).

Stratégies impliquant des modifications dans la gestion du troupeau

Les ajustements dans la conduite du troupeau pour s'adapter aux conséquences du réchauffement climatique sont des leviers principalement utilisés en élevage de ruminants. Réduire la demande alimentaire animale en période de pénurie fourragère

associée à un événement climatique conjoncturel ou structurel est une stratégie d'adaptation qui peut être activée (Pottier *et al.*, 2007). Par exemple, pour les femelles de renouvellement, choisir de retarder la mise à la reproduction et l'âge au premier vêlage de quelques mois peut permettre de moduler les apports de fourrages en cas d'urgence climatique. En système allaitant, un sevrage avancé de quelques semaines peut être envisagé, afin de réduire la demande alimentaire des mères alors taries, tout en réservant aux jeunes animaux sevrés les meilleurs fourrages, voire de l'aliment concentré. Les systèmes herbagers, qui cherchent à maximiser la part d'herbe pâturée dans la ration annuelle des animaux, trouvent leur cohérence au travers de la pratique des vêlages ou des agnelages groupés au printemps (Delaby et Horan, 2021), afin de synchroniser la demande alimentaire du troupeau avec la croissance de l'herbe en zones de climat tempéré. Dans les régions caractérisées par une sécheresse estivale récurrente, la double saison de vêlages espacés de six mois permet de réduire la demande alimentaire lors des saisons de pénuries fourragères que sont l'hiver et l'été (figure 12.1). La pratique rigoureuse d'une double saison de reproduction de deux mois (en juin et juillet, et en décembre et janvier) et le tarissement systématique de toutes les vaches d'un même groupe le même jour (début janvier et début juillet), permettent d'avoir la moitié du troupeau avec de moindres besoins, réduisant ainsi de moitié le chargement sur la surface accessible au pâturage en été et permettant de réserver les meilleurs fourrages aux seules vaches en lactation en hiver. Cette pratique présente également d'autres avantages notables. Elle permet un premier vêlage à l'âge de 30 mois (contre 24 mois), ce qui réduit la pression sur les besoins alimentaires des génisses. Elle permet le « recyclage » de quelques vaches non gestantes intéressantes à conserver, par l'allongement de la durée de la lactation. Elle répartit mieux les pointes de travail sur l'année et surtout réduit le temps d'astreinte de traite durant quatre mois de l'année, à des périodes socialement intéressantes.

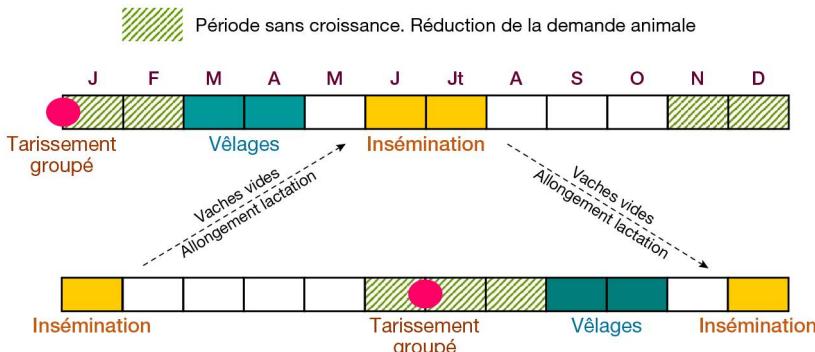


Figure 12.1. Chronologie des diverses étapes de la double saison de vêlage.

La modification de la gestion de la conduite des animaux permet aussi de réduire le risque sanitaire qui pourrait être accru à cause du changement climatique. Ce type d'approche est bien documenté pour la prévention des infestations par les nématodes gastro-intestinaux. Depuis les années 1970, des études suggèrent que le pâturage mixte (association d'espèces animales différentes) présente des avantages à la fois en matière de santé individuelle, de performances de production, ainsi que de production globale par unité de surface (Hoste *et al.*, 2023). Cette stratégie repose sur le tropisme

sélectif des parasites pour leurs hôtes, impliquant l'hypothèse d'un effet de dilution, où une espèce animale ingère des parasites incapables de l'infester. De plus, une meilleure utilisation des ressources fourragères et un impact positif sur le développement de la flore et de la biodiversité des pâturages en général sont souvent associés en plus à une réduction de la charge parasitaire, en particulier pour les petits ruminants. De la même manière, le pâturage tournant ou en rotation recommande une période de pâturage d'une semaine sur une parcelle et un retour des animaux sur cette même parcelle après 25 à 30 jours. Ce délai est basé sur le cycle de vie des parasites pour réduire le risque de recontamination, et pour permettre également d'optimiser la gestion de la ressource en herbe de l'exploitation (production fourragère et valeur nutritionnelle). Ainsi, en zone tropicale humide, l'association de jeunes brebis et chèvres sevrées avec des bovins a montré un grand potentiel pour réduire le parasitisme gastro-intestinal et pour améliorer la production individuelle et par hectare (Mahieu, 2013). Par ailleurs, des combinaisons entre pâturages mixtes et tournants réduisent durablement la pression parasitaire chez les jeunes chevreaux.

La modification de la conduite générale des troupeaux est beaucoup plus compliquée à mettre en œuvre dans les systèmes d'élevage porcins et avicoles, où les animaux sont élevés au sein de bâtiments (fermés ou non) et gérés en lots ou en bandes. Ce type de conduite est associé à un fonctionnement en «tout plein, tout vide», qui consiste à remplir en une seule fois un bâtiment (ou une salle d'un bâtiment) avec des animaux au même stade physiologique (que l'on nomme lot ou bande), à les gérer de manière identique, puis à les retirer tous ensemble. Calés sur des cycles biologiques des animaux relativement courts par rapport à ceux des ruminants, ces lots sont espacés de quelques semaines au plus (typiquement une à huit semaines en fonction des productions). Dans ce type d'élevage, le revenu de l'éleveur est fortement lié à sa capacité à maximiser l'utilisation de ses bâtiments et toute modification de la conduite ayant des impacts importants sur l'ensemble de l'élevage; seuls des impacts du changement climatique potentiellement très forts seront pris en considération (voir partie suivante).

Stratégies impliquant des modifications des conditions de logement des animaux

Les animaux d'élevage peuvent être exposés à un stress thermique, qu'ils aient accès à l'extérieur ou qu'ils soient logés dans des bâtiments d'élevage. À l'extérieur, les radiations solaires directes ou indirectes et leurs conséquences sur la température ambiante vont modifier la température ressentie par les animaux. En période estivale et en particulier pendant les heures les plus chaudes de la journée, la présence d'ombrages naturels (haies, arbres) ou artificiels (ombrières) permet de réduire l'exposition directe au soleil et de diminuer le risque d'hyperthermie chez la vache laitière (Nielsen et Wredle, 2023). Dans les systèmes de productions de volaille labels ou biologiques avec un accès au plein air, l'agencement des parcours, les espaces aménagés avec des arbres, des haies et des bosquets ont un rôle crucial dans le maintien d'un microclimat autour du bâtiment, mais également dans la fourniture d'ombre aux animaux (Chiron *et al.*, 2022).

En bâtiment, la température ressentie par les animaux dépend de facteurs liés à l'animal (poids, stade physiologique, niveau de production), à son micro-environnement bioclimatique (température, humidité, vitesse de l'air, etc.) et aux conditions de logement (densité animale, type de sol, orientation du bâtiment, isolation de la toiture, etc.).

Les bâtiments d'élevage jouent donc un rôle primordial sur les performances techniques et économiques des exploitations, sur le bien-être des animaux et sur les conditions de travail des éleveurs. En France, le parc des bâtiments d'élevage est vieillissant, surtout dans certaines filières : selon les chiffres de la dernière enquête Agreste (2015), l'âge moyen des bâtiments d'élevage de porcs était de vingt-deux ans (Bertin et Ramonet, 2016) et plus de 40 % des élevages bovins comptaient une dernière construction ou une rénovation datant de plus de vingt ans. Les futurs bâtiments d'élevage devront prendre en compte de multiples enjeux parfois contradictoires (agrandissement des cheptels animaux, amélioration des conditions de travail, du bien-être des animaux et de la biosécurité, réduction des empreintes environnementales locales et globales et du risque climatique, etc.). Ainsi, la gestion des conditions de logement des animaux d'élevage face au changement climatique est devenue une préoccupation majeure pour les éleveurs. Par exemple, l'évolution des conditions climatiques (fortes chaleurs, fortes sécheresses) constraint de plus en plus les éleveurs de bovins laitiers ou allaitants à rentrer leur troupeau l'été afin de les protéger des fortes températures, mais également à les alimenter avec des fourrages conservés pour pallier le déficit de productivité des prairies. Par conséquent, les bâtiments doivent donc être conçus aujourd'hui non seulement pour protéger les animaux des intempéries hivernales, mais aussi pour constituer une zone de confort en période chaude. Pour cela, de nouveaux paramètres sont à prendre en compte dans leur conception et dans leur aménagement.

L'utilisation de matériaux clairs pour la construction des bâtiments permet de réfléchir les rayons du soleil et de limiter le réchauffement des bâtiments (Amand *et al.*, 2004). Lorsque la température extérieure est élevée, une ventilation efficace est cruciale pour évacuer l'air chaud (lié à la chaleur sensible produite par les animaux et aux rayonnements sur les murs et les toits du bâtiment), l'humidité (liée à la production de chaleur latente des animaux et à l'utilisation de systèmes de refroidissement) et pour renouveler l'air vicié par les gaz produits par les animaux (CO_2 , CH_4 et NH_3). Dans la plupart des filières animales, les bâtiments d'élevage possèdent des systèmes de ventilation naturelle ou mécanique. Dans des systèmes ouverts ou semi-ouverts, l'implantation des bâtiments doit être réfléchie pour bénéficier d'un vent traversant et pour maximiser la ventilation naturelle, mais également pour éviter un risque de rayonnement direct du soleil sur les animaux ou sur les zones d'abreuvement ou d'alimentation (Fournel *et al.*, 2017). En situation de fortes chaleurs, l'ajout de ventilateurs mécaniques ou de brasseurs d'air permet d'augmenter le renouvellement et la vitesse de l'air pour faciliter la dissipation de chaleur par les animaux. Les bâtiments fermés disposent tous de systèmes de ventilation mécaniques qui sont pilotés pour réguler la vitesse des ventilateurs, le renouvellement de l'air, la température et l'humidité, voire d'autres paramètres environnementaux en fonction des besoins des animaux et des conditions météorologiques extérieures. En pratique, plus la température extérieure augmente, plus l'écart entre la température intérieure et la température extérieure tend à diminuer. Dans ces conditions, le seul renouvellement de l'air ne suffit plus à maintenir une température compatible avec les besoins des animaux, avec des conséquences négatives sur leur bien-être, sur leur santé et sur leur performance. Ces effets sont accentués lorsque la densité animale devient importante, notamment en fin de phase d'engraissement chez le porc ou chez la volaille (Amand *et al.*, 2004). Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir un dispositif permettant de refroidir l'air intérieur ou l'air entrant dans le bâtiment.

Le refroidissement adiabatique de l'air (à bilan énergétique favorable) est une stratégie abordable et efficace pour réduire la température ressentie par les animaux. Le principe général est basé sur la conversion de l'énergie thermique de l'air présente, sous forme de chaleur sensible en chaleur latente. Dans le bâtiment d'élevage, l'utilisation de ce type de système de refroidissement basé sur l'évaporation d'eau permet d'abaisser la température de l'air du bâtiment (brumisation) ou de la surface de l'animal (goutte-à-goutte, aspersion) (Liang *et al.*, 2020). L'installation et l'utilisation de filtres humides (*pad cooling*) dans les bâtiments neufs ou en rénovation sont très efficaces, notamment au cours des périodes les plus chaudes de la journée pour écrêter les pics de chaleur (Renaudeau *et al.*, 2012). Cependant, l'ensemble de ces systèmes consomme des quantités importantes d'eau, estimées à 3,13 millions de mètres cubes par an aux États-Unis pour les élevages de poulets de chair selon Liang *et al.* (2020). En élevages avicoles, les dispositifs de refroidissement par aspersion permettent de réduire de 66 % la consommation d'eau par rapport au *pad cooling*, tout en réduisant efficacement le stress thermique ressenti par les animaux (Liang *et al.*, 2020). En revanche, l'utilisation de tels systèmes requiert une gestion fine du taux de renouvellement et de la vitesse de l'air pour maximiser l'efficacité de refroidissement tout en maîtrisant l'hygrométrie afin de ne pas détériorer la qualité de l'air ou de la litière.

L'intensité et la direction des échanges de chaleur entre l'animal et son environnement (air ambiant, sol, mur ou autres congénères) sont déterminées principalement par le gradient de température entre ces deux compartiments (Renaudeau *et al.*, 2012). En situation de stress thermique, une quantité importante de la chaleur produite par les animaux peut être dissipée par conduction par un contact direct entre l'animal et le sol, si celui-ci a une bonne conductivité thermique ou s'il a été artificiellement refroidi. Bien que peu développée en France, la création d'une zone disposant d'un sol refroidi permet d'améliorer les pertes de chaleur par conduction, le confort et les performances des animaux élevés au Brésil en situation de fortes chaleurs (Silva *et al.*, 2009).

Enfin, quand cela est techniquement et économiquement possible, la réduction du nombre d'animaux par unité de surface en fin d'engraissement (Abudabos *et al.*, 2013) ou lors du transport (Shynkaruk *et al.*, 2023) est une stratégie efficace qui permet d'améliorer nettement le confort thermique des animaux et d'abaisser la surmortalité liée à la chaleur.

► Stratégies d'adaptation basées sur le levier génétique

Le levier génétique, en privilégiant la reproduction des animaux ayant les meilleurs potentiels d'adaptation, présente l'avantage de faire évoluer de façon pérenne les caractéristiques d'une population. La sélection des reproducteurs a été mise en place de façon organisée dans les populations d'élevage depuis les années 1960, avec d'abord des objectifs de productivité puis une diversification avec l'intégration d'indicateurs de qualité des produits, de santé, de longévité, etc., pour répondre aux évolutions des systèmes d'élevage (Ducos *et al.*, 2021). Plus récemment, la possibilité d'intégrer des indicateurs de la capacité d'adaptation des animaux aux conditions du changement climatique est étudiée avec deux défis importants : savoir prédire les nouvelles conditions d'élevage qui seront offertes aux animaux dans les années et les décennies à venir, mais qui ne sont pas observées actuellement et sont amenées à évoluer, et définir des critères et des stratégies de sélection qui correspondent à ces nouvelles

situations. Le premier défi a été évoqué dans le chapitre 9. Le second défi est abordé dans cette section, en distinguant des stratégies qui améliorent la réponse des animaux aux nouvelles conditions environnementales, et des stratégies qui font évoluer plus globalement les schémas de sélection, c'est-à-dire l'organisation des populations en sélection et de leurs liens avec l'ensemble des populations de production.

Améliorer l'adaptation des animaux aux effets du changement climatique : quels caractères sélectionner ?

Cibler les indicateurs physiologiques de stress thermique

Chez les animaux d'élevage, la tolérance aux températures ambiantes élevées a pour partie des fondements génétiques (Renaudeau *et al.*, 2012). De nombreuses études ont comparé la variabilité des réponses des animaux au sein d'une même espèce aux stress thermiques aigus ou chroniques. Un animal tolérant à la chaleur est un animal capable de maintenir sa température corporelle dans des limites physiologiquement acceptables lorsque la température ambiante est élevée. Ce maintien dépend de la capacité de l'animal à équilibrer la thermogenèse et la dissipation de la chaleur. Les mesures qui permettent d'identifier les animaux tolérants à la chaleur sont des indicateurs directs (température corporelle) ou indirects (fréquence respiratoire, fréquence cardiaque, transpiration) de ce phénomène. Elles sont associées à des différences génétiques entre populations, que l'on peut lier à des fréquences alléliques différentes établies à la suite de pressions environnementales différentes. On observe aussi des variabilités intrapopulations, avec des héritabilités faibles à modérées de ces indicateurs, par exemple chez le porc (Gourdine *et al.*, 2021). La tolérance à la chaleur est un caractère polygénique. Les rares exemples de gènes à effet majeur sur la réponse à la chaleur sont liés à des caractéristiques anatomiques qui généralement favorisent la dissipation de chaleur, comme le gène « *slick hair* » chez le bovin (Ortiz-Colón *et al.*, 2018) et les gènes « *cou nu* » et « *frisé* » chez la volaille (Nawab *et al.*, 2018). Des études récentes ont cherché de façon plus générique des régions génomiques associées à des réponses à la chaleur, qui permettraient d'envisager la sélection pour une meilleure tolérance à la chaleur avec des approches de sélection génomique (Worku *et al.*, 2023).

Cibler les indicateurs d'une meilleure valorisation des ressources alimentaires

La quantité, la qualité et la variabilité des ressources alimentaires disponibles pour les animaux d'élevage sont d'ores et déjà affectées par les effets du changement climatique (voir chapitre 9). La première stratégie de sélection des animaux pour répondre à ces variations est de poursuivre l'amélioration de leur efficacité ou efficience alimentaire (capacité à transformer les matières premières utilisées en alimentation en viande, lait ou œufs). À titre d'exemple, la quantité d'aliments nécessaire à la production d'un kilogramme de viande de porc a été réduite de 30 % depuis les années 1970. Dans les filières monogastriques (volailles, porcins), ces progrès importants sont expliqués à la fois par la sélection génétique, mais également par des améliorations des conduites d'élevage (biosécurité et conduites alimentaires). Dans l'ensemble des filières, ces progrès génétiques ont été réalisés avec des aliments généralement très digestibles

et distribués de manière non limitante, optimisés pour répondre aux besoins des animaux, même dans les filières de ruminants. Si les animaux actuels sont efficents pour utiliser des rations alimentaires équilibrées ou très digestibles, leur capacité à bien valoriser des aliments de moindre qualité reste à déterminer. Cela nécessite d'évaluer si la nature de la ration affecte non seulement l'efficience des animaux en valeur absolue, mais surtout leur classement, c'est-à-dire s'il existe des interactions « génétique × aliment » qui affecteraient l'efficience alimentaire. Des relations génétiques hétérogènes (plutôt élevées entre les mesures effectuées sur les mâles nourris avec un aliment concentré, et faibles avec les mesures réalisées chez les femelles nourries avec des fourrages; Taussat *et al.*, 2023) entre les efficiencies alimentaires mesurées à différents stades et dans différentes conditions chez des bovins allaitants ont été rapportées, ce qui suggère que les caractères d'efficience diffèrent en fonction de l'aliment dans cette filière. Chez les monogastriques, peu d'interactions sont mises en évidence, par exemple pour des porcs nourris avec des aliments conventionnels ou contenant plus de fibres, mais formulés pour couvrir leurs besoins nutritionnels (Déru *et al.*, 2020). En complément de ces stratégies de sélection de l'efficience globale, il est possible de cibler des fonctions biologiques stimulées par les nouveaux types d'aliments, telles que la digestibilité et l'efficience d'utilisation des acides aminés, mais également des fonctions biologiques stimulées par des disponibilités variables de ressources alimentaires de qualité, telles que la capacité à constituer des réserves corporelles en période d'abondance pour les mobiliser quand les ressources deviennent limitantes, et les reconstituer ensuite. Ces nouvelles approches nécessitent de mettre au point des indicateurs mesurables en élevage. Parmi ces nouveaux indicateurs, citons par exemple l'utilisation de l'information du microbiote ruminal ou intestinal, qui contribue à la valorisation de la ration en complément des capacités propres de l'animal, grâce au concept récent de sélection basée sur l'holobionte (meilleure combinaison [animal × microbiotes]). Cependant, si le lien entre la variabilité du microbiote digestif et la variabilité des fonctions digestives a été démontré chez les bovins (Roehe *et al.*, 2016), chez le porc (Déru *et al.*, 2022) et la volaille (Mignon-Grasteau *et al.*, 2015), sa contribution à l'efficience globale reste marginale par rapport à d'autres facteurs, et la façon de l'utiliser en sélection pour améliorer les caractères demande de stabiliser les modèles qui prédisent les liens entre microbiotes et performances, comme illustré récemment chez le porc (Calle-García *et al.*, 2023). Enfin, dans les conditions nouvelles du changement climatique, il peut être proposé de faire évoluer la notion d'efficience alimentaire : historiquement, elle a été sélectionnée comme la capacité de l'animal à maximiser la production par unité de ressources. Cela a amené à sélectionner des animaux plus exigeants (augmentation de la densité en acides aminés par unité d'énergie, par exemple) et aux besoins d'entretien accrus (animaux de plus grand format). Si les ressources alimentaires deviennent limitantes (absence de pâturage en été, disponibilité limitée en ressources alimentaires denses en énergie ou en protéines), de nouveaux critères d'efficience sous contrainte ou ciblant un nutriment donné pourraient émerger, conduisant à une réorientation du profil des animaux. Il a par exemple été montré que des animaux en croissance peuvent être sélectionnés en régime alimentaire restreint pour une meilleure efficience en maximisant la vitesse de croissance sous cette contrainte (Drouilhet *et al.*, 2016), conduisant à des réponses à la sélection différentes d'une sélection avec accès *ad libitum* à l'alimentation.

Cibler les indicateurs d'une meilleure adaptation à des pressions sanitaires grandissantes

Par ailleurs, le changement climatique s'accompagne de l'émergence de nouvelles maladies et modifie la prévalence de certains agents pathogènes déjà présents (voir chapitre 9). Des modifications dans l'abondance, la saisonnalité et la répartition spatiale de certains parasites, agents pathogènes ou de leurs vecteurs (tiques, moustiques) sont déjà attribuables au changement climatique (Baylis, 2017; Erazo *et al.*, 2024). La sélection d'animaux résistants à ces pathologies et l'organisation des troupeaux pour contrôler leur propagation sont donc nécessaires (Phocas *et al.*, 2016). Cependant, si une base génétique existe pour la résistance à la majorité des agents pathogènes, il est souvent difficile de trouver une mesure de résistance individuelle aux maladies qui soit utilisable en sélection, car leur mesure s'appuie sur des « challenges infectieux » (Bishop et Woolliams, 2014). Il arrive que des déterminants génétiques majeurs soient identifiés et permettent la sélection grâce à la connaissance du statut de sensibilité ou de résistance des animaux à sélectionner, comme pour la tremblante (Elsen *et al.*, 1997), le syndrome dysgénésique et respiratoire du porcelet ou SDRP (Zhang *et al.*, 2020), et la coccidiose (Pinard-van der Laan *et al.*, 2009). Dans les autres cas, la mise en œuvre de sélections en routine passe généralement par l'utilisation d'indicateurs peu spécifiques, mais faciles d'accès en élevage, tels que les comptages de cellules du lait, utilisés comme indicateurs de mammites chez les ruminants laitiers, ou les comptages d'œufs dans les fèces pour les infestations parasitaires. Il est cependant difficile de cibler conjointement de multiples agents pathogènes, la sélection pour la réponse à un premier agent pathogène ne garantissant pas nécessairement des réponses favorables corrélées pour les réponses à d'autres agents pathogènes (Pinard-van der Laan *et al.*, 2009). Il a alors été proposé de sélectionner pour la résistance non spécifique aux maladies, en utilisant les enregistrements de syndromes en élevage. La notation la plus simple revient alors à un critère binaire (0 : malade ou mort; 1 : sain) à un instant *t*. Ce critère est héritable dans différentes populations (Lenoir *et al.*, 2022), mais demande un minimum de pression en agents pathogènes sur les animaux. Cette approche permet *a priori* de consolider la capacité générale des animaux à répondre à des agents pathogènes. Dans le contexte de changement climatique qui voit l'arrivée de nouveaux agents pathogènes dans les régions d'élevage, sélectionner pour ces réponses génériques pourrait être une option à privilégier. De plus, depuis quelques années, la gestion de certaines pathologies, en particulier celles associées au parasitisme dans les systèmes pâturés, a évolué d'une logique d'élimination des parasites et d'augmentation de la résistance par sélection vers une logique de construction d'équilibres soutenables hôtes-parasites (Hoste *et al.*, 2023). Le développement de modèles épidémiogénétiques *in silico* permet alors d'évaluer les meilleures combinaisons de stratégies de sélection, de gestion des pâturages et de composition des troupeaux (Saccareau *et al.*, 2016). Ces stratégies de sélection doivent être associées à d'autres approches, afin de limiter la pression en agents pathogènes et les risques d'émergence, par le biais de stratégies de gestion intégrée de la santé et d'une approche One Health, mais aussi des réseaux de surveillance vétérinaires et d'alerte.

Cibler les indicateurs d'une amélioration de la robustesse générale des animaux

Chez les animaux d'élevage, le concept générique de robustesse fait généralement référence à la capacité d'un animal à exprimer son potentiel de production dans une

gamme d'environnements variés sans compromettre ses performances, sa santé et son bien-être. Une absence de robustesse peut impliquer des reclassements des animaux ou des populations en fonction de l'environnement : il s'agit d'interactions « géotype \times environnement » (plasticité) (Rovelli *et al.*, 2020). Selon la nature et l'importance de ces interactions, des efforts différents sont consacrés à la gestion génétique des populations ou à l'amélioration et au contrôle des environnements d'élevage. Cependant, la difficulté majeure de la sélection pour la robustesse réside dans la nécessité, très demandeuse en données connectées génétiquement entre ces environnements (Knap et Su, 2008), d'estimer précisément le potentiel génétique des individus dans un gradient d'environnements plus ou moins bien caractérisés. Une autre approche consiste à essayer de capter ces différences de robustesse entre animaux à partir de l'hétérogénéité des performances répétées d'un animal au cours de sa carrière : on s'attend à ce qu'un animal robuste ait des performances très similaires d'une répétition à l'autre, alors qu'un animal moins robuste verra ses performances varier de façon plus importante. Cela correspondrait par exemple à un animal dont la température corporelle varie peu en fonction de la température ambiante, ou d'une femelle qui maintient sa production laitière quand les ressources alimentaires se raréfient en été. Des modèles statistiques spécialisés sont disponibles pour capter une variabilité génétique de ces réponses, comme les modèles dits de canalisation (Bodin *et al.*, 2010) et les modèles analysant les trajectoires de données longitudinales (Le *et al.*, 2022). Ces approches peuvent s'appliquer à des enregistrements de routine des niveaux de production, de reproduction, de santé et de bien-être obtenus chez des animaux exposés à des températures variées, ou chroniquement élevées, ce qui affranchit du besoin d'enregistrements spécifiques de réponses d'adaptation. Cependant, les mécanismes biologiques impliqués dans le maintien de différentes fonctions (croissance, reproduction, santé, etc.) sont mal connus, et leurs liens restent à décrire (Ravagnolo *et al.*, 2000). La générnicité des réponses face à différents défis n'est donc pas validée, même si certaines études suggèrent des relations favorables entre les réponses à des stress spécifiques et la résilience générale. Il est donc important de considérer plusieurs indicateurs de diminution des performances en situation de températures extrêmes simultanément (Vinet *et al.*, 2024).

Améliorer l'adaptation des animaux aux effets du changement climatique : quelles évolutions des schémas de sélection actuels ?

Pour l'amélioration des populations d'élevage, une fois les indicateurs d'intérêt identifiés, il est possible, en privilégiant la reproduction des individus qui apporteront des caractéristiques favorables à la population, de sélectionner pour une meilleure adaptation de la population. Cette stratégie est très efficace quand le caractère cible est facile à mesurer, disponible sur beaucoup d'animaux et héritable, ou que des gènes majeurs sont connus et que le génotypage permet d'orienter l'évolution de leur fréquence dans la population. Dans la majorité des filières animales, les schémas de sélection s'appuient sur des index de sélection qui intègrent conjointement des caractères de production, des caractères fonctionnels et de santé, dans des stratégies de sélection multicaractères (par exemple dans la filière porcine; Bidanel *et al.*, 2020). Cela permet d'ajuster les pondérations de tous les caractères à sélectionner en fonction de leurs covariances génétiques, pour assurer que les progrès réalisés sur certains n'entraînent pas la détérioration des autres. Pour intégrer les objectifs d'adaptation des animaux

aux effets du changement climatique, cette approche devra être maintenue, car il a été montré chez la plupart des espèces que les animaux les plus producteurs sont généralement les plus sensibles à des températures élevées, certainement en lien avec des productions de chaleur métaboliques accrues qui pourraient limiter leur capacité à faire face à des vagues de chaleur (voir chapitre 9).

La majorité des stratégies de sélection actuelles repose sur l'amélioration de la performance de la population par la sélection d'individus qui ont le meilleur potentiel génétique individuel. Il a été proposé qu'au-delà des caractéristiques individuelles il existe une capacité génétique des individus à contribuer à l'adaptation du groupe, qui pourrait être sélectionnée pour favoriser les comportements de coopération. L'application à la sélection des espèces d'élevage est envisagée par la mise en œuvre de modèles génétiques dits à effets indirects : la valeur d'un individu est la somme de son effet individuel sur sa propre performance, et de son effet sur celle des autres individus du groupe (par exemple, Marjanovic *et al.*, 2018). Ce concept pourrait être étendu à la mise en place de troupeaux hétérogènes, dans lesquels les aptitudes des animaux seraient complémentaires entre troupeaux ou entre espèces, permettant par exemple de valoriser des ressources alimentaires différentes dans l'année ou de limiter la propagation d'agents pathogènes. Si de telles approches émergent sur le terrain chez les plantes, qui s'appuient généralement sur des lignées génétiquement homogènes, leur validation et leur déploiement en sélection animale, où les populations ont une variabilité intrinsèque élevée, demandent des développements méthodologiques encore importants.

Finalement, des stratégies sont aussi envisagées pour préparer précocement l'animal à des conditions altérées d'élevage par une acclimatation précoce (Loyau *et al.*, 2015) et un établissement de marques épigénétiques (David *et al.*, 2019). Un animal à fort potentiel pourrait ainsi être mieux préparé aux conditions stressantes qu'il rencontrera. Une baisse de mortalité chez les poulets qui ont été soumis à des températures d'incubation des œufs élevées et cycliques a ainsi été observée quand ils sont ensuite soumis à la chaleur. Néanmoins ces opérations doivent cibler des fenêtres de développement particulières pour ne pas avoir d'effets contraires (Serviento *et al.*, 2020). Il est à noter que les modifications ainsi induites peuvent être transmises sur plusieurs générations mais sont potentiellement réversibles, comme cela a été montré chez les mammifères (Laporta *et al.*, 2024) et chez la caille (Vitorino Carvalho *et al.*, 2023). Les mécanismes impliqués sont en partie épigénétiques, et modifient l'expression future du génome des animaux ainsi préacclimatés.

► Stratégies de lutte contre l'émergence ou la réémergence de nouvelles maladies

Les hausses de température associées au changement climatique auront à la fois des impacts directs (croissance accélérée d'agents pathogènes, augmentation de l'aire de distribution d'arthropodes vecteurs d'agents pathogènes, par exemple) et indirects (modification des habitats et des migrations d'animaux sauvages, pouvant favoriser les contacts entre la faune sauvage et les animaux d'élevage) sur la circulation et la propagation des agents pathogènes en élevage (voir chapitre 9). Ces impacts seront très hétérogènes d'une région à l'autre, car ils dépendent des variations et des aléas climatiques locaux d'une part et des caractéristiques des systèmes de production sur un territoire donné (modes d'élevage, mesures de surveillance, de prévention, de

biosécurité et de gestion des risques). On conçoit aisément que, pour des agents pathogènes ayant pour réservoir les animaux d'élevage comme le virus de la fièvre catarrhale ovine, les régions d'élevages intensifs et de grande taille favoriseront des émergences de plus grande ampleur, aux conséquences sanitaires et économiques majeures. Dans un tel contexte, il apparaît donc central de consolider et d'adapter les réseaux et les outils de surveillance et de gestion aux enjeux du changement climatique aux échelons globaux, nationaux, mais également territoriaux : des stratégies flexibles et intégrées, s'appuyant sur un partenariat régional fort et relevant d'une approche One Health, autoriseront un partage efficace d'informations, une anticipation des risques, un diagnostic précoce, une gestion et une prévention rapide en cas de foyers (disponibilité de plans d'urgence, recourant à différentes mesures comme l'encadrement des mouvements d'animaux domestiques, la vaccination, etc.). Le réseau collaboratif CaribVet⁴⁸ créé en 2006 dans la région des Caraïbes illustre très bien ce concept : il appuie les capacités de surveillance nationale de trente-quatre territoires caribéens et le développement d'une stratégie régionale en santé animale, pour une meilleure anticipation des risques émergents (influenza aviaire et peste porcine africaine actuellement).

L'épidémiiosurveillance occupe une place prépondérante dans la lutte contre les maladies animales, car elle permet une détection des émergences, une intervention sur les phases précoces de transmission et un suivi de l'évolution des maladies et des agents pathogènes. Le caractère transfrontalier des émergences et des épizooties encourage à renforcer les outils d'épidémiiosurveillance et de veille sanitaire internationale, qui sont coordonnés en France par la plateforme d'Épidémiologie en santé animale⁴⁹ (ESA). La plateforme ESA, en fédérant les acteurs nationaux du sanitaire et en appuyant les politiques publiques pour le déploiement de systèmes de surveillance plus efficaces, joue un rôle essentiel depuis 2011 dans le suivi des épizooties animales (exemple avec le virus Schmallenberg; Dominguez *et al.*, 2014). D'autres plateformes récemment développées peuvent appuyer la détection des épizooties chez l'animal de façon non spécifique, comme Padi-Web au travers de la collecte automatique d'actualités sur les maladies animales à partir du Web (Valentin *et al.*, 2023). Des priorisations et des cartographies des risques d'émergence en matière de maladies animales, tenant compte des enjeux climatiques locaux et des caractéristiques du système alimentaire, ont été générées tant au niveau national⁵⁰ qu'international (Carlson *et al.*, 2022). La détection et le contrôle rapides des agents pathogènes émergents nécessiteront par ailleurs un suivi précis de l'identité, de la carte génétique et des capacités d'évolution des agents pathogènes par les laboratoires experts (laboratoires de référence); un diagnostic précis et rapide au chevet de l'animal et le développement de nouvelles stratégies de vaccination (vaccins de nouvelle génération comme les vaccins à ARNm, vaccins dits Diva permettant de différencier les animaux vaccinés de ceux naturellement infectés, etc.) devront être soutenus (Hobbs *et al.*, 2021; de Pinho Favaro *et al.*, 2022).

Il est important dans le même temps de promouvoir la recherche pour consolider les connaissances sur les cycles épidémiologiques des maladies, pour identifier les futurs agents pathogènes émergents à l'interface faune sauvage-faune domestique (veille écologique) et pour modéliser plus finement l'impact du changement climatique sur

48. <https://www.caribvet.net/fr>

49. <https://www.plateforme-esa.fr/fr>

50. <https://www.anses.fr/fr/system/files/SANT-Ra-Rechauffementclimatique.pdf>

l'émergence des maladies en élevages, avec l'ambition d'améliorer notre capacité à prévoir les futures menaces, exacerbées par le changement climatique, pour la santé animale. Le développement de l'éducation sanitaire du grand public ainsi que les sciences citoyennes mobilisant les non-scientifiques autour des enjeux des maladies émergentes (par exemple celui des vecteurs de maladies, comme les tiques⁵¹) permettront de mieux appréhender les verrous culturels, organisationnels et autres, associés au déploiement des mesures de gestion et d'augmenter l'efficacité de la maîtrise du risque sanitaire.

► Vers une reconception des systèmes d'élevage pour répondre aux enjeux du changement climatique

À court terme, l'utilisation de leviers d'adaptation « incrémentaux » basés sur la modification d'un élément du système d'élevage (par exemple la gestion de l'alimentation, les conditions de logement des animaux, l'amélioration des schémas de sélection génétique) permet assez souvent d'apporter des solutions immédiates pour réduire les impacts des aléas climatiques sur les systèmes de production animale actuels. En revanche, sur le long terme, ils peuvent dans certains cas entrer en contradiction avec les mesures d'atténuation et s'avérer insuffisants pour réduire la vulnérabilité des exploitations face aux enjeux futurs du changement climatique. Face à ces enjeux, des stratégies en rupture (« transformationnelles ») avec les solutions actuelles doivent être envisagées. Rigolot *et al.* (2019) distinguent deux modalités d'adaptation transformationnelle, selon qu'elles impliquent une reconception des systèmes d'élevage ou des stratégies d'adaptation territoriales pouvant aller jusqu'à une relocalisation des activités d'élevage.

La reconception des systèmes d'élevage passe par une mobilisation combinée de différents types de leviers internes à l'exploitation (la gestion du troupeau, des ressources et du travail) pour tendre vers plus de flexibilité opérationnelle (plus grande marge de manœuvre) et plus de résilience vis-à-vis des aléas d'origine climatique. Elle implique des changements importants de paradigme, notamment sur la notion de diversité, qui dans ce cas devient un levier et un atout pour sécuriser les exploitations au lieu d'être vue plutôt comme une source de travail supplémentaire, voire un risque de perte de revenus dans les systèmes d'élevage dit « conventionnels ». En pratique, cette diversité permet à l'éleveur de « ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier » et doit être construite dans l'ensemble des composantes du système d'élevage pour laisser la possibilité à l'éleveur de redéfinir ou d'ajuster la stratégie de conduite du troupeau et des cultures selon les aléas. Compte tenu du fort lien au sol de la majorité des élevages de ruminants, la reconception du système est probablement plus « facile » à imaginer dans ces filières que dans les filières monogastriques (porc, volaille). Cette reconception implique souvent un changement radical de pratiques avec la construction progressive d'une nouvelle cohérence systémique (Rigolot *et al.*, 2019). En pratique, la mise en œuvre de ce type de démarche reste complexe et demeure probablement toujours perçue comme risquée pour les éleveurs.

Depuis 2013, INRAE expérimente en grandeur nature l'impact de la reconception d'un système bovin laitier dans une zone classiquement soumise à des sécheresses estivales (Poitou-Charentes). Le dispositif OasYs est conduit sans irrigation et avec très peu d'intrants (figures 12.2 et 12.3). Il teste de manière imbriquée toute une série de

51. <https://www.citique.fr/>

leviers agroécologiques d'adaptation et d'atténuation au changement climatique, que ce soit au niveau du système fourrager ou du système d'élevage (Novak *et al.*, 2013). Dans OasYs, l'adaptation au changement climatique est basée sur la diversification des ressources fourragères, sur la mise en place de deux périodes de vêlage et sur l'utilisation de plantes et d'animaux moins sensibles aux températures élevées. Les leviers d'atténuation reposent sur le développement du pâturage et des légumineuses pour économiser les intrants consommateurs d'énergie fossile, sur le stockage de carbone dans les sols par les prairies et les arbres, et sur la limitation des périodes où les animaux sont improductifs pour réduire la production de méthane par litre de lait sur toute la carrière des animaux. Au niveau du système fourrager, les espèces sont diversifiées à la fois sur l'assoulement et au sein des parcelles (Novak *et al.*, 2018). Les prairies associent diverses graminées, légumineuses et dicotylédones, avec des espèces et des variétés différentes pour chacune d'entre elles, de manière à avoir un large panel de précocités et d'aptitudes à pousser aux différentes saisons et sous des conditions climatiques variées. Des cultures annuelles prennent le relais des prairies afin d'allonger la saison de pâturage, avec par exemple des betteraves fourragères, du sorgho multicoupe ou du méteil. Afin de diversifier les stocks, les fourrages conservés comportent, en plus de l'herbe, du sorgho monocoupe, du maïs et des méteils. Le sorgho et le méteil sont à double fin et peuvent être pâturés ou récoltés selon les conditions climatiques de l'année. Des plantations de ligneux sont un élément supplémentaire de cette diversification fourragère. La stratégie d'élevage a pour objectif de valoriser le mieux possible ces ressources fourragères (y compris les arbres) par le pâturage. Ainsi, deux périodes de vêlage, centrées

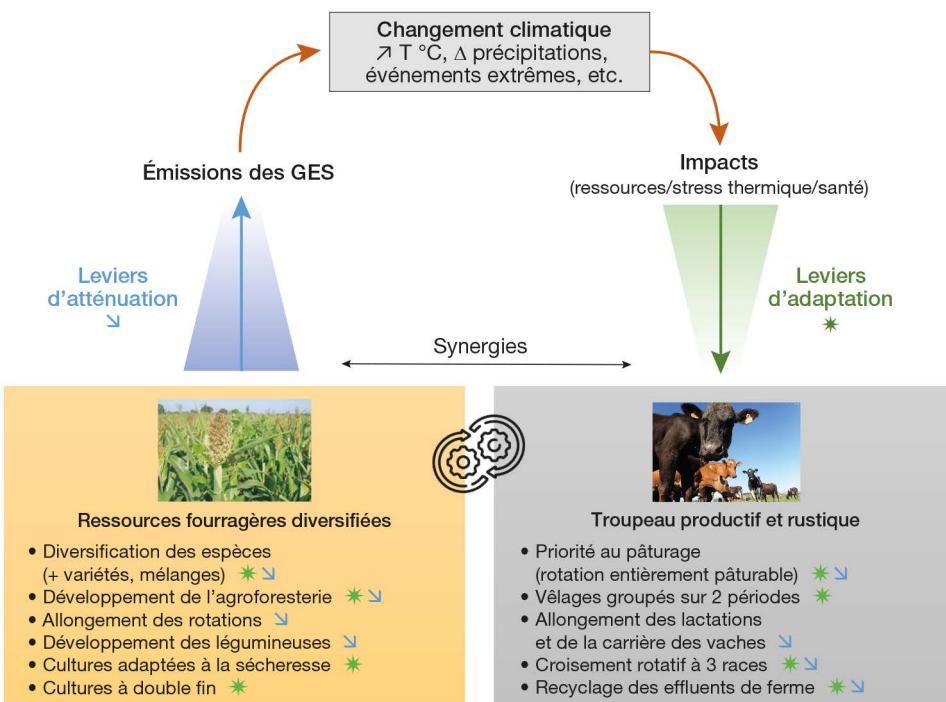


Figure 12.2. Représentation schématique de l'ensemble des leviers d'adaptation et d'atténuation mis en place dans le dispositif OasYs (INRAE Lusignan).

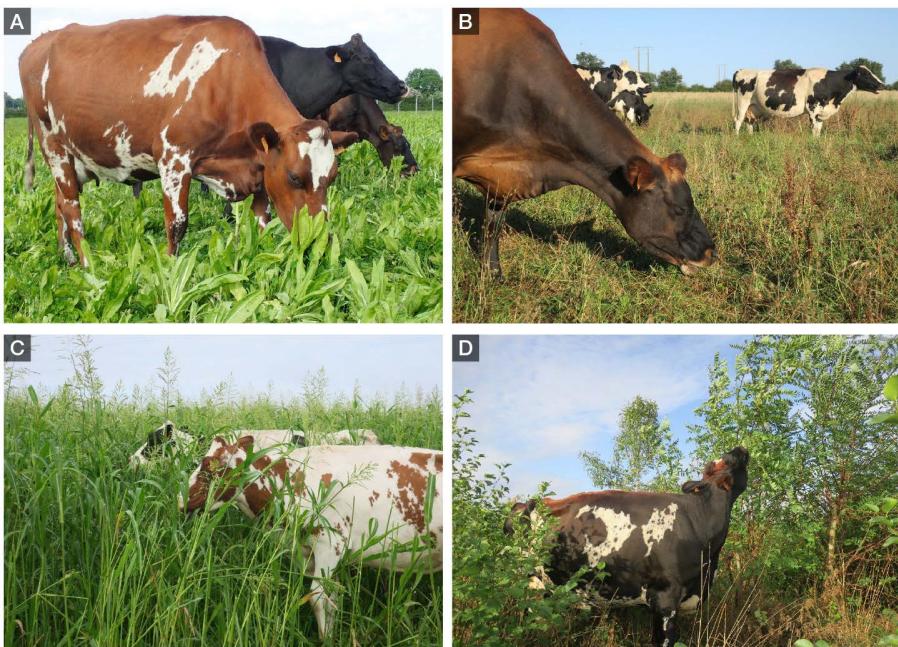


Figure 12.3. Illustrations en lien avec le dispositif OasYs.

A : vaches croisées avec des robes de différentes couleurs, pâturent une prairie riche en chicorée au printemps. B : vaches pâturent une prairie riche en légumineuses conservées en stock sur pied en été. C : vaches pâturent un couvert de sorgho multicoupe en été. D : vaches pâturent un arbre fourrager (robinier) en été sur une parcelle agroforestière.

sur les périodes de pousse de l'herbe (printemps et automne), ont été mises en place afin de bénéficier d'une alimentation abondante et de bonne qualité lorsque les besoins des animaux sont les plus élevés. Cela permet également de s'adapter à un aléa qui affaîterait la pousse de l'herbe sur l'une des deux saisons. Les lactations ont été allongées à seize mois pour diminuer les périodes improductives et pour améliorer la reproduction des animaux. Enfin, depuis juin 2013, le troupeau est engagé dans un croisement rotatif à trois races (Holstein, rouge scandinave, jersiaise) afin de disposer de vaches laitières plus rustiques, avec de bonnes capacités de production et de reproduction, et bien adaptées au pâturage. Le croisement avec la jersiaise vise en outre à améliorer les taux de matière utile du lait, mais aussi à limiter l'impact des températures élevées sur la production laitière. Les résultats sont très satisfaisants, tant aux niveaux technique et économique (Novak *et al.*, 2020b) qu'environnemental (Novak *et al.*, 2022b), même si tous les leviers mis en place ne sont pas encore pleinement actifs.

► Dispositifs permettant une prise en charge collective des risques

En complément de mesures mises en place par l'éleveur pour s'adapter ou pour rendre son système de production plus résilient aux conséquences du changement climatique (« autoassurance »), une partie de la gestion du risque climatique peut être mutualisée. Une gestion territoriale de l'eau avec la création de retenues de substitution pour irriguer

les cultures utilisées localement en alimentation animale est un exemple de stratégies pour mutualiser le risque de sécheresse. L'utilisation de dispositifs assurantiels pour sécuriser et pour limiter les pertes de revenus lors des années marquées par de forts aléas climatiques est également une option possible. Généralement, les sinistres liés à l'impact d'événements extrêmes sur les infrastructures de l'élevage et leurs conséquences directes ou indirectes sur le revenu de l'éleveur sont couverts par l'assurance multirisque agricole. L'éleveur peut également souscrire une assurance pour couvrir le risque de surmortalité dans son troupeau. Si une surmortalité liée à un coup de chaleur dans les bâtiments est prise en charge, celle consécutive à une maladie contagieuse ne l'est pas toujours. Aujourd'hui, moins de 10% des éleveurs ont souscrit une assurance qui couvre la mortalité des troupeaux (données Pacifica, compagnie d'assurances dommages du groupe Crédit agricole, communication personnelle). Depuis début 2023, la réforme de l'assurance récolte a été mise en place pour remplacer le régime des calamités agricoles et l'offre assurantielle proposée dès 2005, tous deux jugés peu adaptés par rapport à la forte inflation des risques climatiques. Ce nouveau système crée une protection plus universelle pour les agriculteurs face aux risques climatiques, qu'ils choisissent de s'assurer ou non. Il est basé sur le partage du risque entre la solidarité nationale, les compagnies d'assurances privées et les agriculteurs, avec des taux d'intervention indexés sur les taux de pertes de production. L'assurance « prairie » couvre les pertes (liées à la sécheresse ou aux inondations) quantitatives de production d'herbe sur pied destinée à l'alimentation des animaux, mais pas l'incapacité de récolter ou de pâturez ni les pertes de qualité de l'herbe. Au-delà de 20% de déficit de pousse d'herbe, l'éleveur qui a souscrit une assurance « prairie » voit une partie de ses pertes prise en charge d'abord par son assurance puis par l'État, si le déficit de production d'herbe est supérieur à 30%. L'État incite fortement les éleveurs à souscrire une assurance en proposant un abaissement de la franchise minimum (20% contre 30%) et en subventionnant à hauteur de 70% le montant de la prime d'assurance. Cela permet à un éleveur d'assurer ses prairies à un coût raisonnable (environ 10 €/ha, aides déduites; données Pacifica, communication personnelle). Actuellement, environ 8 à 10% de la surface agricole (SAU) implantée en prairie est assurée en France (contre environ 1% avant la réforme), et l'objectif est d'atteindre 30% des surfaces assurées en 2030. Dans le futur, l'amélioration du taux de pénétration de ces produits assurantiels passera d'abord par une meilleure sensibilisation des éleveurs aux conséquences du changement climatique, notamment dans les régions qui sont peu affectées jusqu'à présent, mais également par l'acceptation par l'ensemble des acteurs (éleveurs, syndicats, etc.) de l'indice établi à partir de données satellitaires pour calculer les variations de la production de biomasse.

► Conclusion

Au vu de l'augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes et des autres aléas climatiques, l'adaptation des élevages aux conséquences du changement climatique est un défi majeur pour l'avenir des filières animales. Elle implique de prendre conscience des aléas et des risques auxquels les éleveurs sont actuellement exposés ou le seront à l'avenir (voir chapitre 9), et d'intégrer ces éléments dans des stratégies globales pour planifier l'adaptation, tout en travaillant sur l'atténuation et sur la durabilité économique des exploitations agricoles.

Pour répondre à ces défis, il est nécessaire d'adopter des approches intégrées et holistiques, combinant plusieurs leviers et échelles, allant de l'échelle individuelle

de l'animal à celle du territoire et en gérant les synergies ou les antagonismes entre ces différents niveaux d'organisation. À long terme, les stratégies « incrémentales » pourraient ne pas suffire, et des adaptations « transformantes » pourraient s'avérer nécessaires, allant jusqu'à des changements radicaux des systèmes ou des objectifs de production, voire par la relocalisation des exploitations dans des territoires moins touchés par le changement climatique ou qui permettent une meilleure réassocation entre les systèmes de culture et d'élevage. Sur ce point, l'expérimentation dans le dispositif d'OasYs montre que la conception de ce type de système innovant est possible. Par ailleurs, le changement climatique peut, dans certains cas, offrir de nouvelles opportunités, par exemple la possibilité de relocaliser des élevages de ruminants dans des zones où l'allongement de la durée du pâturage pourrait être favorisé par un adoucissement des températures.

Bien que ce chapitre se concentre sur les stratégies d'adaptation pour contrer les effets à court et long terme du changement climatique, il ne traite pas en profondeur des synergies, des complémentarités ou des antagonismes avec la nécessité de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre de l'élevage ou de mieux préserver et partager l'utilisation de l'eau entre tous les acteurs du territoire. Cela souligne ainsi le besoin d'une part de travaux complémentaires pour renforcer le soutien aux décisions politiques, et d'autre part de gestion visant à atteindre les objectifs d'adaptation et d'atténuation du changement climatique, et à éviter la maladaptation et la malatténuation.

► Références

- Abudabos A.M., Samara E.M., Hussein E.O.S., Al-Ghadi M.a.Q., Al-Atiyat R.M., 2013. Impacts of stocking density on the performance and welfare of broiler chickens, *Italian Journal of Animal Science*, 12, e11, <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e11>.
- Amand G., Aubert C., Bourdette C., Bouvarel I., Chevalier D., Dusantier A. *et al.*, 2004. La prévention du coup de chaleur en aviculture, *Sciences & Techniques Avicoles, La revue scientifique de l'aviculture*, hors-série, mai 2004, 64 p.
- Baylis M., 2017. Potential impact of climate change on emerging vector-borne and other infections in the UK, *Environmental Health*, 16, 112, <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0326-1>.
- Bertin C., Ramonet Y., 2016. État des lieux des bâtiments d'élevage de porcs en Bretagne chez les naisseurs-engraisseurs en 2015, *Journées de la recherche porcine*, 48, 1-6.
- Bidanel J.P., Silalahi P., Tribout T., Canario L., Ducos A., Garreau H. *et al.*, 2020. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives, *INRAE Productions Animales*, 33, 1-16, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2020.33.1.3092>.
- Bishop S.C., Woolliams J.A., 2014. Genomics and disease resistance studies in livestock, *Livestock Science*, 166, 190-198, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.034>.
- Block E., 1994. Manipulation of dietary cation-anion difference on nutritionally related production diseases, productivity, and metabolic responses of dairy cows, *Journal of Dairy Science*, 77, 1437-1450, [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(94\)77082-x](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(94)77082-x).
- Bodin L., Bolet G., Garcia M., Garreau H., Larzul C., David I., 2010. Robustesse et canalisation : vision de généticiens, *INRAE Productions Animales*, 23, 11-22, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2010.23.1.3281>.
- Calle-García J., Ramayo-Caldas Y., Zingaretti L.M., Quintanilla R., Ballester M., Pérez-Enciso M., 2023. On the holobiont 'predictome' of immunocompetence in pigs, *Genetics Selection Evolution*, 55, 29, <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00803-4>.
- Carlson C.J., Albery G.F., Merow C., Trisos C.H., Zipfel C.M., Eskew E.A. *et al.*, 2022. Climate change increases cross-species viral transmission risk, *Nature*, 607, 555-562, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>.

- Céï W., Salah N., Alexandre G., Bambou J.C., Archimède H., 2018. Impact of energy and protein on the gastro-intestinal parasitism of small ruminants: A meta-analysis, *Livestock Science*, 212, 34-44, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.03.015>.
- Cériac S., Durbant P., Godard X., Barbier C., Feuillet D., Félicité Y. *et al.*, 2019. Effect of the nutritional status of Creole goats on the density-dependent prolificacy of *Haemonchus contortus*, *Veterinary Parasitology*, 276, 108973, <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2019.108973>.
- Chauhan S.S., Rashamol V.P., Bagath M., Sejian V., Dunshea F.R., 2021. Impacts of heat stress on immune responses and oxidative stress in farm animals and nutritional strategies for amelioration, *International Journal of Biometeorology*, 65, 1231-1244, <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02083-3>.
- Chiron G., Marion P., Lesgourgues M., Média B., Fortun-Lamothe L., Liagre F. *et al.*, 2022. Bouquet – Une méthode pour évaluer les services rendus par les ateliers de volailles plein-air, *Innovations Agronomiques*, 85, 31-46, <https://doi.org/10.17180/ciag-2022-vol85-03>.
- Collin A., Coustham V., Tona J.K., Tesseraud S., Mignon-Grasteau S., Média B. *et al.*, (2024). Face au changement climatique, quelles stratégies d'atténuation et d'adaptation pour les productions avicoles?, *INRAE Productions Animales*, 37(1), 8069, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.1.8069>.
- David S.-A., Vitorino Carvalho A., Gimonnet C., Brionne A., Hennequet-Antier C., Piégu B. *et al.*, 2019. Thermal manipulation during embryogenesis impacts H3K4me3 and H3K27me3 histone marks in chicken hypothalamus, *Frontiers in Genetics*, 10, 1207, <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01207>.
- De Basilio V., Vilarino M., Yahav S., Picard M., 2001. Early age thermal conditioning and a dual feeding program for male broilers challenged by heat stress, *Poultry Science*, 80, 29-36, <https://doi.org/10.1093/ps/80.1.29>.
- Delaby L., Horan B., 2021. Improved efficiency in temperate grass based dairy systems, *INRAE Production Animales*, 34, 161-172, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.3.4870>.
- Delaby L., Dozias D., Leurent-Colette S., 2022. Le tour du moha en 80 jours, 3R – Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 26, 174, <http://journées3r.fr/spip.php?article5022>.
- De Pinho Favaro M.T., Atienza-Garriga J., Martínez-Torró C., Parlade E., Vázquez E., Corchero J.L. *et al.*, 2022. Recombinant vaccines in 2022: a perspective from the cell factory, *Microbial Cell Factories*, 21, 203, <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01929-8>.
- Déru V., Bouquet A., Hassenfratz C., Blanchet B., Carillier-Jacquin C., Gilbert H., 2020. Impact of a high-fibre diet on genetic parameters of production traits in growing pigs, *Animal*, 14, 2236-2245, <https://doi.org/10.1017/S1751731120001275>.
- Déru V., Tiezzi F., Carillier-Jacquin C., Blanchet B., Cauquil L., Zemb O. *et al.*, 2022. Gut microbiota and host genetics contribute to the phenotypic variation of digestive and feed efficiency traits in growing pigs fed a conventional and a high fiber diet, *Genetics Selection Evolution*, 54, 55, <https://doi.org/10.1186/s12711-022-00742-6>.
- Dominguez M., Gache K., Touratier A., Perrin J.-B., Fediaevsky A., Collin E. *et al.*, 2014. Spread and impact of the Schmallenberg virus epidemic in France in 2012-2013, *BMC Veterinary Research*, 10, 248, <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0248-x>.
- Drouilhet L., Achard C.S., Zemb O., Molette C., Gidenne T., Larzul C. *et al.*, 2016. Direct and correlated responses to selection in two lines of rabbits selected for feed efficiency under ad libitum and restricted feeding: I. Production traits and gut microbiota characteristics, *Journal of Animal Science*, 94, 38-48, <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9402>.
- Ducos A., Douhard F., Savietto D., Sautier M., Fillon V., Gunia M. *et al.*, 2021. Contributions de la génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage, *INRAE Productions Animales*, 34, 79-96, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4773>.
- Elsen J.M., Bariillet F., Vu Tien Khang J., Schelcher F., Amigues Y., Laplanche J.L. *et al.*, 1997. Génétique de la sensibilité à la tremblante ovine : recherches en cours et perspectives, *INRAE Productions Animales*, 10, 133-140, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1997.10.2.3989>.
- Elshafaei H.E., Rashed R.R., Goma A.A., El-Kazaz S.E., Kerr M.J., Smith M. *et al.*, 2020. Use of water electrolyte supplementation for three days prior to processing helps alleviate the consequences of a severe thermal challenge on performance in meat chickens, *Livestock Science*, 242, 104260, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104260>.

- Emile J.C., Coutard J.-P., Forel E., Stephany D., 2016. Développer les associations annuelles céréales-protéagineux dans les systèmes fourragers, *Fourrages*, 226, 143-151.
- Erazo D., Grant L., Ghisbain G., Marini G., Colón-González F.J., Wint W. *et al.*, 2024. Contribution of climate change to the spatial expansion of West Nile virus in Europe, *Nature Communications*, 15, 1196, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45290-3>.
- Fournel S., Ouellet V., Charbonneau É., 2017. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review, *Animals (MDPI)*, 7, 35, <https://doi.org/10.3390/ani7050037>.
- Francis C.A., Macleod M.G., Anderson J.E.M., 1991. Alleviation of acute heat stress by food withdrawal or darkness, *British Poultry Science*, 32, 219-225, <https://doi.org/10.1080/00071669108417343>.
- Gamba J.P., Rodrigues M.M., Garcia Neto M., Perri S.H.V., Faria Júnior M.J.d.A., Pinto M.F., 2015. The strategic application of electrolyte balance to minimize heat stress in broilers, *Brazilian Journal of Poultry Science*, 17, 237-246, <https://doi.org/10.1590/1516-635x1702237-246>.
- Gourdine J.-L., Rauw W.M., Gilbert H., Poulet N., 2021. The Genetics of thermoregulation in pigs: A review, *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 770480, <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.770480>.
- Hobbs E.C., Colling A., Gurung R.B., Allen J., 2021. The potential of diagnostic point-of-care tests (POCTs) for infectious and zoonotic animal diseases in developing countries: Technical, regulatory and sociocultural considerations, *Transboundary and Emerging Diseases*, 68, 1835-1849, <https://doi.org/10.1111/tbed.13880>.
- Hoch T., Begon C., Cassar-Malek I., Picard B., Savary-Auzeloux I., 2003. Mécanismes et conséquences de la croissance compensatrice chez les ruminants, *INRAE Productions Animales*, 16, 49-59, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2003.16.1.3644>.
- Hoste H., Ravinet N., Chartier C., Marie-Magdeleine C., Bambou J.-C., Bonneau M. *et al.*, 2023. Réduction d'usage et alternatives aux antiparasitaires en élevage des ruminants, *INRAE Productions Animales*, 35, 327-344, <https://doi.org/10.20870/productions-animaux.2022.35.4.7333>.
- IPCC, 2023. Summary for Policymakers, in *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*, Genève, Suisse, p. 1-34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- Knap P.W., Su G., 2008. Genotype by environment interaction for litter size in pigs as quantified by reaction norms analysis, *Animal*, 2, 1742-1747, <https://doi.org/10.1017/s1751731108003145>.
- Laporta J., Khatib H., Zachut M., 2024. Review: Phenotypic and molecular evidence of inter- and trans-generational effects of heat stress in livestock mammals and humans, *Animal*, 101121, <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101121>.
- Le V., Rohmer T., David I., 2022. Impact of environmental disturbances on estimated genetic parameters and breeding values for growth traits in pigs, *Animal*, 16, 100496, <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100496>.
- Leclère D., Havlík P., Fuss S., Schmid E., Mosnier A., Walsh B. *et al.*, 2014. Climate change induced transformations of agricultural systems: insights from a global model, *Environmental Research Letters*, 9, 124018, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124018>.
- Lemaire G., Pflimlin A., 2007. Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ?, *Fourrages*, 190, 163-180.
- Lenoir G., Flatres-Grall L., Friggens N.C., David I., 2022. Robustness scores in fattening pigs based on routinely collected phenotypes: determination and genetic parameters, *Journal of Animal Science*, 100, 157, <https://doi.org/10.1093/jas/skac157>.
- Liang Y., Tabler G.T., Dridi S., 2020. Sprinkler technology improves broiler production sustainability: From stress alleviation to water usage conservation: A mini review, *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 544814, <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.544814>.
- Loyau T., Bedrani L., Berri C., Métayer-Coustard S., Praud C., Coustham V. *et al.*, 2015. Cyclic variations in incubation conditions induce adaptive responses to later heat exposure in chickens: a review, *Animal*, 9, 76-85, <https://doi.org/10.1017/s1751731114001931>.
- Lüscher A., Barkaoui K., Finn J.A., Suter D., Suter M., Volaire F., 2023. Utilisation de la diversité végétale pour réduire la vulnérabilité et accroître la résilience à la sécheresse des prairies productives permanentes et semées, *Fourrages*, 253, 61-74.

- Mahieu M., 2013. Effects of stocking rates on gastrointestinal nematode infection levels in a goat/cattle rotational stocking system, *Veterinary Parasitology*, 198, 136-144, <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.08.029>.
- Marjanovic J., Mulder H.A., Rönnegård L., Bijma P., 2018. Modelling the co-evolution of indirect genetic effects and inherited variability, *Heredity*, 121, 631-647, <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0068-z>.
- Mignon-Grasteau S., Narcy A., Rideau N., Chantry-Darmon C., Boscher M.-Y., Sellier N. et al., 2015. Impact of selection for digestive efficiency on microbiota composition in the chicken, *PLoS ONE*, 10, e0135488, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135488>.
- Moreau J.C., Lorgeou J., 2007. Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques : impacts sur les prairies, le maïs et les systèmes fourragers, *Fourrages*, 191, 285-295.
- Nawab A., Ibtisham F., Li G., Kieser B., Wu J., Liu W. et al., 2018. Heat stress in poultry production: Mitigation strategies to overcome the future challenges facing the global poultry industry, *Journal of Thermal Biology*, 78, 131-139, <https://doi.org/10.1016/j.therbio.2018.08.010>.
- Nielsen P.P., Wredle E., 2023. How does the provision of shade during grazing affect heat stress experienced by dairy cows in Sweden?, *Animals (MDPI)*, 3, 3823, <https://doi.org/10.3390/ani13243823>.
- Noury J.M., Fourdin S., Pauthenet Y., 2013. Systèmes d'élevage et changement climatique : perceptions d'éleveurs et stratégies d'adaptation aux aléas, *Fourrages*, 215, 211-219.
- Novak S., Delagarde R., Fiorelli J.-L., 2013. Conception d'un système fourrager bioclimatique : la démarche initiée à Lusignan, *Fourrages*, 215, 241-246.
- Novak S., Audebert G., Chargelegue F., Emile J.C., 2018. Sécuriser un système laitier avec des fourrages économies en eau et en énergie fossile, *Fourrages*, 233, 27-34.
- Novak S., Barre P., Delagarde R., Mahieu S., Niderkorn V., Emile J.C., 2020a. Composition chimique et digestibilité *in vitro* des feuilles d'arbre, d'arbuste et de liane des milieux tempérés en été, *Fourrages*, 242, 35-47.
- Novak S., Godoc B., Chargelegue F., Audebert G., Troquier C., 2020b. Analyse technico-économique d'un système bovin laitier agroécologique adapté au changement climatique, 3R – Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 25, 4 p.
- Novak S., Didiot C., Bourgoin F., Guyard R., Chargelegue F., Audebert G. et al., 2022a. Variability of multispecies grasslands production in a diversified agroecological dairy system, in Delaby L. et al. (Eds), *Proceedings of the 29th EGF Meeting "Grassland at the heart of circular and sustainable food systems*, Grassland Science in Europe, 27, p. 451-453, Wageningen Academic Publishers.
- Novak S., Guyard R., Chargelegue F., Audebert G., Foray S., 2022b. Nitrogen use efficiency and carbon footprint of an agroecological dairy system based on diversified resources, in Delaby L. et al. (Eds), *Proceedings of the 29th EGF Meeting "Grassland at the heart of circular and sustainable food systems*, Grassland Science in Europe, 27, p. 683-685, Wageningen Academic Publishers.
- Ortiz-Colón G., Fain S.J., Parés I.K., Curbelo-Rodríguez J., Jiménez-Cabán E., Pagán-Morales M. et al., 2018. Assessing climate vulnerabilities and adaptive strategies for resilient beef and dairy operations in the tropics, *Climatic Change*, 146, 47-58, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-2110-1>.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B. et al., 2016. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. II. Breeding strategies, *Animal*, 10, 1760-1769, <https://doi.org/10.1017/s175173116001051>.
- Picard M., Sauveur B., Fenardji F., Angulo I., Mongin P., 1993. Ajustements technico-économiques possibles de l'alimentation des volailles dans les pays chauds, *Inra Productions Animales*, 6, 87-103, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1993.6.2.4191>.
- Pinard-van der Laan M.-H., Bed'hom B., Coville J.-L., Pitel F., Feve K., Leroux S. et al., 2009. Microsatellite mapping of QTLs affecting resistance to coccidiosis (*Eimeria tenella*) in a Fayoumi × White Leghorn cross, *BMC Genomics*, 10, 31, <https://doi.org/10.1186/1471-2164-10-31>.

- Pottier E., Delaby L., Agabriel J., 2007. Adaptations of the management of cattle herds and of sheep flocks to the risks of drought/Adaptations de la conduite des troupeaux bovins et ovins aux risques de sécheresse, *Fourrages*, 191, 267-284.
- Ravagnolo O., Misztal I., Hoogenboom G., 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function, *Journal of Dairy Science*, 83, 2120-2125, [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(00\)75094-6](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(00)75094-6).
- Renaudeau D., Collin A., Yahav S., de Basilio V., Gourdine J.L., Collier R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production, *Animal*, 6, 707-728, <https://doi.org/10.1017/s175173111002448>.
- Rigolot C., Martin G., Dedieu B., 2019. Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : Cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement, *INRAE Productions Animales*, 32, 1-12, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2414>.
- Roehe R., Dewhurst R.J., Duthie C.-A., Rooke J.A., McKain N., Ross D.W. et al., 2016. Bovine host genetic variation influences rumen microbial methane production with best selection criterion for low methane emitting and efficiently feed converting hosts based on metagenomic gene abundance, *PLOS Genetics*, 12, e1005846, <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005846>.
- Rouillé B., Devun J., Brunschwig P., 2014. L'autonomie alimentaire des élevages bovins français, *OCIL*, 21, D404, <https://doi.org/10.1051/ocl/2014017>.
- Rovelli G., Ceccobelli S., Perini F., Demir E., Mastrangelo S., Conte G. et al., 2020. The genetics of phenotypic plasticity in livestock in the era of climate change: a review, *Italian Journal of Animal Science*, 19, 997-1014, <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1809540>.
- Saccareau M., Moreno C.R., Kyriazakis I., Faivre R., Bishop S.C., 2016. Modelling gastrointestinal parasitism infection in a sheep flock over two reproductive seasons: in silico exploration and sensitivity analysis, *Parasitology*, 143, 1509-1531, <https://doi.org/10.1017/s0031182016000871>.
- Santos L.S.D., Pomar C., Campos P., da Silva W.C., Gobi J.P., Veira A.M. et al., 2018. Precision feeding strategy for growing pigs under heat stress conditions, *Journal of Animal Science*, 96, 4789-4801, <https://doi.org/10.1093/jas/sky343>.
- Serviento A.M., Labussière E., Castex M., Renaudeau D., 2020. Effect of heat stress and feeding management on growth performance and physiological responses of finishing pigs, *Journal of Animal Science*, 98, 1-15, <https://doi.org/10.1093/jas/skaa387>.
- Shin J.-S., Um K.-H., Park H.-J., Choi Y.-S., Lee H.-S., Park B.-S., 2019. Effect of betaine and ascorbic acid in drinking water on growth performance and blood biomarkers in meat ducks exposed to heat stress, *South African Journal of Animal Science*, 49, 417-423, <https://doi.org/10.4314/sajas.v49i3.2>.
- Shynkaruk T., Long K., LeBlanc C., Schwean-Lardner K., 2023. Impact of stocking density on the welfare and productivity of broiler chickens reared to 34 d of age, *Journal of Applied Poultry Research*, 32, 100344, <https://doi.org/10.1016/j.japr.2023.100344>.
- Silva B.A.N., Oliveira R.F.M., Donzele J.L., Fernandes H.C., Lima A.L., Renaudeau D. et al., 2009. Effect of floor cooling and dietary amino acids content on performance and behaviour of lactating primiparous sows during summer, *Livestock Science*, 120, 25-34, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.04.015>.
- Taussat S., Fossaert C., Cantalapiedra-Hijar G., Griffon L., Martin P., Renand G., 2023. Paramètres génétiques de l'efficience alimentaire et faisabilité d'une sélection en population bovine Charolaise. Dossier : Efficience alimentaire des bovins allaitants, *INRAE Productions Animales*, 36, 7330, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2023.36.3.7330>.
- Valentin S., Boudoua B., Sewalk K., Arinik N., Roche M., Lancelot R. et al., 2023. Dissemination of information in event-based surveillance, a case study of Avian Influenza, *PLoS ONE*, 18, e0285341, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285341>.
- Vinet A., Mattalia S., Vallée R., Bertrand C., Barbat A., Promp J. et al., 2024. Effect of temperature-humidity index on the evolution of trade-offs between fertility and production in dairy cattle, *Genetics Selection Evolution*, 56, 23, <https://doi.org/10.1186/s12711-024-00889-4>.
- Vitorino Carvalho A., Hennequet-Antier C., Rouger R., Delaveau J., Bordeau T., Crochet S. et al., 2023. Thermal conditioning of quail embryos has transgenerational and reversible long-term effects, *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14, 124, <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00924-2>.

Worku D., Hussen J., De Matteis G., Schusser B., Alhussien M.N., 2023. Candidate genes associated with heat stress and breeding strategies to relieve its effects in dairy cattle: a deeper insight into the genetic architecture and immune response to heat stress, *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1151241, <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1151241>.

Zhang C., Thekkoot D., Kemp B., Dekkers J., Plastow G., 2020. 154 A genetic marker for PRRS resistance has no adverse effect on economically important traits in pigs, *Journal of Animal Science*, 98, 145-145, <https://doi.org/10.1093/jas/skaa054.254>.

Chapitre 13

Accompagner les acteurs du monde agricole pour l'adaptation au changement climatique : enjeux, postures, approches

Nina Graveline, Laure Hossard, Jouanel Poulmarch, Jean-Marc Touzard

Ce chapitre traite d'un enjeu opérationnel de l'adaptation au changement climatique : l'accompagnement des acteurs du monde agricole, c'est-à-dire l'implication et l'organisation d'autres acteurs, intervenants de la sphère publique ou privée, pour faciliter l'identification, l'expérimentation, la mise en œuvre et l'évaluation d'actions visant l'adaptation de l'agriculture (Toillier *et al.*, 2018). L'accompagnement dépasse alors les seules production et diffusion de connaissances, puisqu'il repose sur des interactions répétées entre acteurs, et prend en compte les situations concrètes d'action (Compagnone, 2011). Ses formes sont variées, mais l'enjeu climatique semble inciter au développement de démarches plus systémiques, participatives, prospectives et transformatives, avec la perspective que les agriculteurs « accompagnés » construisent leurs propres chemins d'adaptation (Niles *et al.*, 2016; Boyer et Touzard, 2021). Ce chapitre entend fournir un aperçu de la diversité de ces modes d'accompagnement en illustrant en particulier les actions conduites par les acteurs de la recherche avec les acteurs agricoles. Il traite plus spécifiquement de l'accompagnement collectif et non individuel des agriculteurs.

La complexité de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique peut faire appel à des connaissances et à des actions nouvelles et transformatives, que peut favoriser l'accompagnement. En effet, les impacts des changements climatiques sur l'agriculture doivent être caractérisés avec différentes approches et en tenant compte des différentes expériences qui découlent des différentes localisations, des types d'agricultures, mais aussi de caractéristiques individuelles. La seule donnée climatique ne saurait rendre compte correctement des climats locaux réels, mais constitue souvent un point de départ. De plus, l'adaptation ne peut être pensée de manière indépendante des autres risques et préoccupations de l'agriculteur, en particulier l'atténuation du changement climatique, la réduction de l'usage des pesticides, l'organisation du travail, les conditions de transmission des exploitations ou l'évolution des marchés. Enfin, elle doit aussi être coordonnée entre les différents acteurs de chaque filière ou territoire, par exemple pour la gestion de l'eau (Leenhardt *et al.*, 2020). Le changement climatique renouvelle donc les enjeux d'accompagnement des agriculteurs du fait des dimensions incertaines, urgentes, collectives et localisées des connaissances à construire pour l'action.

L'accompagnement présente aussi un intérêt parce que le recours à la participation est présenté comme une condition pour l'adaptation, qui est encouragée par le 2^e Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC2), la stratégie européenne Adaptation (Duvernoy *et al.*, 2023) et le dernier rapport du Giec (IPCC, 2022). La participation permet en effet de partager des expériences et des perceptions, de considérer conjointement des informations éparses pour poser un diagnostic, de susciter un plus large éventail d'idées, d'expérimenter des solutions en mutualisant les risques (Hassenforder *et al.*, 2021). La participation peut aussi faciliter la concertation et la coordination des acteurs dans la construction de solutions et de stratégies, comme dans leur mise en œuvre et dans leur évaluation (Toillier *et al.*, 2018). L'accompagnement apparaît alors comme une modalité d'expérimentation et de mise en œuvre de ces démarches participatives pour l'adaptation dans l'agriculture avec des degrés différents d'implications ou de postures (descendante à facilitatrice).

Dans cet accompagnement, la recherche peut jouer un rôle important (Klenk *et al.*, 2017). Elle dispose de moyens et de données pour documenter l'évolution d'indicateurs climatiques et agroclimatiques, utiles par exemple pour identifier des vulnérabilités dans les systèmes agricoles (voir chapitre 3). Elle contribue aussi directement à des innovations et à des solutions pour l'adaptation, par exemple avec des programmes sur l'innovation variétale (voir chapitre 11). La recherche peut également apporter de nouvelles méthodes, un regard systémique et prospectif qui ouvre les perspectives d'adaptation à l'échelle de groupes d'agriculteurs ou du territoire, en favorisant la prise en compte du moyen et du long terme et en introduisant l'idée d'incertitude (Naulleau *et al.*, 2022b). Enfin, la recherche peut faciliter la construction et la médiation de réseaux, ou même établir un lien entre les enjeux concrets de l'adaptation dans l'agriculture et l'élaboration de stratégies et de politiques climatiques à l'échelle des filières (voir chapitre 16) ou du territoire (Graveline *et al.*, 2024) et, bien sûr, documenter les résultats spécifiques et génériques sur les adaptations.

Les acteurs scientifiques et techniques ont de nombreux intérêts à s'engager dans ces démarches d'accompagnement : ils peuvent s'appuyer sur les connaissances et sur les expérimentations des agriculteurs pour produire plus rapidement et efficacement des connaissances scientifiques sur l'impact du changement climatique ou sur les leviers et les processus d'adaptation (sciences participatives). L'implication des chercheurs dans l'accompagnement peut avoir aussi un intérêt heuristique, permettant d'explorer de nouvelles options ou de nouvelles méthodes d'analyse des processus de changement ou de transition (Salembier *et al.*, 2016). Enfin, ils peuvent également participer à la généralisation et à la médiatisation des solutions testées localement, et amplifier ainsi leur impact en étant acteurs de l'adaptation dans la société. L'hypothèse que nous défendons ici est que les enjeux scientifiques dépassent la seule production de connaissances sur le changement climatique, et que la posture d'accompagnement permet à la fois une production de connaissances intégrant les conditions de l'action et la création d'une dynamique collective propice à la réflexion et à l'engagement d'actions individuelles ou collectives.

La première partie de ce chapitre présente la diversité des formes d'accompagnement pour l'adaptation de l'agriculture et les rôles des différents acteurs, avec l'exemple de l'accompagnement par les chambres d'agriculture. La deuxième partie se concentre sur les formes d'accompagnement par la recherche et décrit les outils et

les approches issus de la recherche en détaillant deux exemples, à l'échelle locale et à celle d'une filière nationale. La conclusion ouvre sur la perspective d'un changement d'échelle de l'accompagnement.

► Les différentes formes d'accompagnement pour l'adaptation

Panorama

L'accompagnement peut avoir différents objectifs qui vont de la sensibilisation à l'enjeu climatique (information sur le changement climatique et ses impacts) jusqu'à la mise en œuvre et l'évaluation d'actions pour y répondre. Ces différentes étapes sont au minimum (figure 13.1) : (1) la sensibilisation aux enjeux du changement climatique qui peut prendre la forme d'information, de mise en débat, de construction d'une fresque ou de formations en ayant éventuellement recours à un service climatique ; (2) la discussion sur les impacts et sur les enjeux perçus, leur caractérisation sur une filière ou sur un territoire concret, ce qui soulève — entre autres — la question des indicateurs ; (3) l'identification d'actions, de solutions ou de projets pouvant répondre aux enjeux locaux de l'atténuation et de l'adaptation, par le partage et par l'exploration (vers d'autres groupes, territoires ou filières) de ces solutions et de leurs conditions de faisabilité (technique, économique, etc.) ; (4) la description et le dimensionnement des mesures ou des projets ; (5) la construction de stratégies intégrant des actions dans

Étapes possibles	Modalités possibles		
	Participation	Gradient	Apports scientifiques
1. Sensibilisation aux enjeux du changement climatique	Information, exploration	Construction d'indicateurs et représentations	Formation, mise en forme de données (cartes)
2. Impacts actuels et futurs			Modèles agronomiques et économiques pour estimer l'impact
3. Identification d'adaptations déjà prises	Partage en entretien bilatéral, et/ou atelier	Traques, enquêtes	Analyses climatiques, analyse de données statistiques
4. Identification et construction des mesures d'adaptation		Conception innovante de systèmes agricoles	
5. Construction de stratégies d'adaptation		Conception innovante d'instruments d'actions publiques ou privées	
6. Évaluation (ex ante) multicritères ou économiques	Codéveloppement d'outils, grilles d'évaluation		Modèles, expériences ou calcul économique
7. La délibération , éventuellement la décision et la mise en œuvre	Expression de choix individuels et collectifs	Planification	Propositions méthodologiques
8. Évaluation ex post	Enquêtes, ateliers		Économétrie
9. Communication , valorisation, promotions des actions		Supports variés, médias	

Figure 13.1. Aperçu des objectifs et des étapes possibles d'un processus d'accompagnement.

différents domaines et à différents pas de temps; (6) leur évaluation *ex ante*, individuelle ou collective, multicritère ou économique, participative et éventuellement à l'aide de modèles; (7) la décision et la mise en œuvre des actions; (8) leur évaluation *ex post* et la révision possible des trajectoires d'adaptation; (9) éventuellement la communication, la valorisation et la promotion des actions et de la démarche.

Le tableau 13.1 illustre la diversité des acteurs et des formes d'accompagnement. Cette présentation ne saurait être exhaustive, même pour le cas français. Les échelles vont de la parcelle au territoire agricole. La dimension technique seule n'est présente qu'à

Tableau 13.1. Aperçu des différentes formes d'accompagnement : acteurs accompagnés et accompagnants et nature de l'accompagnement.

Échelle et acteurs accompagnés	Nature de l'accompagnement	Acteurs accompagnants
Parcelle	Technique et agronomique, repose sur un suivi d'observations, avec de plus en plus de nouvelles technologies (capteurs, sondes, drone, logiciel Mes Parcelles, etc.).	Conseillers techniques (chambre d'agriculture, coopérative, acteur privé comme les fournisseurs d'équipements, recherche agronomique, etc.).
Exploitation agricole	Conseil sur les choix techniques et économiques, sur les investissements, sur l'orientation des productions et sur l'organisation du travail; Conception de systèmes; Formations.	Conseillers techniques (chambre d'agriculture, coopérative ou acteur privé, CER, ou par exemple Solagro).
Collectif d'agriculteurs (par exemple GIEE, association, groupe d'adhérents d'une coopérative ou d'un syndicat d'appellation, collectif suscité par un projet de recherche)	Expérimentation technique (nouvelles variétés, pratiques ou équipements) ou de méthode pour la recherche; Conception de systèmes; Construction de stratégies; Évaluation de stratégies; Formations.	Recherche et instituts techniques; Chambre d'agriculture; Formation continue (par exemple Vivea); Associations (Civam); Coopérative; Syndicat d'appellation ou organisme interprofessionnel; Bureaux d'études et consultants.
Collectifs multiacteurs d'une filière	Accompagnement stratégique; Prospective à l'échelle d'une filière régionale ou nationale (par exemple vin, forêt, lait, etc.); Construction, suivi, évaluation d'un plan d'action climat.	Recherche, instituts techniques, FranceAgrimer, INAO, bureaux d'études/consultants; Interprofessions.
Territoire, interactions avec des acteurs non agricoles dont institutions publiques	PCAET : plan climat-air-énergie territorial; Chartes; Projet d'innovation ou recherche.	Collectivités (intercommunalités, parc naturel régional, etc.) appuyées par des bureaux d'étude et par des acteurs de la recherche, Ademe; Interprofessions régionales.

l'échelle parcellaire, car au-delà l'accompagnement s'effectue souvent dans la perspective d'intégrer des enjeux techniques, socio-économiques et de gestion, en tenant compte du projet global de l'agriculteur et de projets collectifs portés par les territoires ou les filières (par exemple une coopérative, un syndicat d'appellation).

L'échelle du territoire peut être mobilisée soit avec une entrée agricole soit avec une perspective plus large ouvrant à d'autres acteurs de ce territoire. La première approche peut être illustrée avec des guides produits par des chambres d'agriculture ou des bureaux d'études (pour l'État ou les collectivités) ciblant l'analyse de vulnérabilité socio-économique d'exploitations agricoles dans un territoire face au changement climatique (par exemple le rapport de Sogréah, 2010). La seconde peut être représentée par des démarches territoriales (par exemple la charte du parc naturel régional de la Narbonnaise) qui prennent en compte directement la gestion durable de ressources comme l'eau ou le foncier, avec des démarches impulsées par les collectivités ayant la charge de la gestion de l'eau et des planifications associées (par exemple Plan de gestion des ressources en eau, PGRE).

La documentation (création de références accessibles, y compris avec les médias plus récemment utilisés par les agriculteurs, comme YouTube et les «youtubeurs» agricoles) des expériences est importante pour servir d'exemple et d'inspiration à d'autres acteurs ou territoires et pour pouvoir par exemple analyser les facteurs de succès ou d'échec.

Accompagnement des agriculteurs au changement climatique par la chambre d'agriculture de l'Hérault

La chambre d'agriculture de l'Hérault développe une stratégie d'adaptation au changement climatique qui s'inscrit dans une démarche nationale portée par le groupe France des chambres d'agriculture et déclinée en trois grands axes : (1) créer plus de valeur dans les territoires, (2) faire dialoguer agriculture et société et (3) accompagner l'agriculture dans ses transitions économiques, sociétales et climatiques. Sur le troisième axe, la posture du technicien qui accompagne les agriculteurs vers une transition implique d'une part une approche systémique du problème pour proposer un plan d'action à plusieurs échelles spatiales — parcellaire, de l'exploitation et territoriale — et à plusieurs échelles temporelles — court, moyen ou long terme —, et d'autre part la possibilité de mobiliser une grande diversité de leviers qu'ils soient économiques, agronomiques, écologiques, sociaux ou sociétaux. Cela se traduit, en premier lieu, par :

- la centralisation des connaissances de ces leviers (efficacité, modalités de mise en œuvre, coordonnées des personnes expertes, lien vers de la bibliographie, etc.);
- la création de lieux et de moments d'échanges entre les différentes expertises;
- la création d'outils;
- l'actualisation régulière des connaissances;
- la constitution d'essais sous forme de réseaux de fermes de référence;
- la capitalisation de l'expérience des agriculteurs et des acteurs qui gravitent autour.

En second lieu, cela se manifeste par l'élaboration d'une méthodologie qui, bien qu'évolutive, doit permettre de sécuriser les agriculteurs et les accompagnants à la transition climatique. En effet, cet accompagnement peut amener à proposer des plans d'action bouleversant les pratiques et les mentalités habituelles, perturbant ainsi la relation entre les agriculteurs et les techniciens.

Les grandes lignes de cette méthodologie se déclinent en deux phases.

La première phase de cette méthode est la réalisation d'un diagnostic pour identifier et pour prioriser les vulnérabilités. La chambre d'agriculture de l'Hérault reconnaît l'importance de l'état économique de l'exploitation qui indique une capacité de l'entreprise à encaisser des chocs climatiques et à dégager une marge suffisante pour investir dans l'adaptation. Cet investissement doit être cohérent entre les différentes échelles temporelles. Par exemple, la mise en œuvre de leviers d'adaptation à court terme ne doit pas entraver une adaptation à plus long terme, et la mise en place d'un levier d'adaptation dont l'efficacité n'est visible qu'à moyen ou long terme ne doit pas mettre en péril économiquement une exploitation agricole à court terme.

La seconde phase consiste en l'élaboration et en la mise en œuvre d'un plan d'adaptation à l'échelle de l'exploitation et à celle du bassin-versant, ici viticole. Le changement climatique génère chez les agriculteurs un sentiment de forte inquiétude, et chez les techniciens, des incertitudes quant à l'efficacité des solutions testées sur un sujet transversal et complexe. Par conséquent, il est primordial de rendre l'accompagnement rassurant par la rationalité des outils employés, mais aussi d'installer un climat de confiance durable entre l'accompagnant et l'agriculteur. Cela nécessite d'inclure dans l'approche une forme d'humilité — une part d'incertitude est reconnue — face à un contexte économique et climatique instable. En reconnaissant le facteur humain (aspect psychologique face à la transition) et la temporalité, l'accompagnement est nécessairement réadapté régulièrement et maintenu sur le long terme. Enfin, la qualité de l'accompagnement implique un partage des références au sein du réseau national de la chambre d'agriculture et avec les partenaires techniques et les chercheurs.

En complément, des démarches nationales sont également portées comme le projet ClimaTerra (encadré 13.1).

Encadré 13.1. Le projet ClimaTerra d'accompagnement de 10 000 à 15 000 exploitations par an

ClimaTerra est un plan global d'accompagnement individualisé des exploitations agricoles face au changement climatique⁽¹⁾. Il repose sur la mobilisation des partenaires techniques des agriculteurs (chambres d'agriculture, instituts techniques, coopératives et enseignement agricole). Il s'inscrit dans le prolongement du Varenne agricole de l'eau et du changement climatique.

Le principe est d'accompagner chaque agriculteur candidat pour (1) un diagnostic de vulnérabilité face au changement climatique, (2) l'élaboration d'un programme d'action dont l'agriculteur restera libre de planifier les échéances et les actions, (3) et éventuellement un accompagnement à la mise en œuvre.

Ce programme est totalement gratuit pour les agriculteurs.

(1) <https://chambres-agriculture.fr/actualites/toutes-les-actualites/detail-de-lactualite/actualites/climaterra-le-plan-daccompagnement-des-exploitations-agricoles-face-au-changement-climatique/>

► Approches d'accompagnement par la recherche

Principe de l'accompagnement

La recherche agronomique a très tôt développé des méthodes d'accompagnement des agriculteurs, d'abord pour favoriser le conseil et la diffusion d'innovations dans la perspective d'une « modernisation de l'agriculture », mais aussi pour appuyer le développement de projets collectifs nouveaux valorisant les ressources, les connaissances et les productions locales (Campagnone, 2011). L'implication des chercheurs, leurs méthodes et leurs dispositifs ont été largement documentés dans des configurations variées au nord et au sud, et discutés dans le cadre de réflexions globales sur le conseil, le développement agricole local, la recherche-action et la recherche-intervention en agriculture (Toillier *et al.*, 2018). Absent dans les projets étudiés jusqu'au début du xxie siècle, l'enjeu climatique est maintenant présent dans beaucoup de démarches, au moins comme composante du contexte d'action. Dans ces projets, la recherche est souvent cheville ouvrière de l'intégration des différents savoirs et du processus d'accompagnement, tout en ayant un rôle d'observation et d'analyse des processus (pendant et/ou après). Le rôle de la recherche est à la fois d'aider à organiser et à piloter le processus, et de contribuer avec des productions scientifiques classiques (voir plus loin la section « Coconstruire et évaluer des scénarios d'adaptation en céréaliculture et élevage », p. 330) à une recherche-action ou intervention sur et pour l'innovation ouverte. La posture des chercheurs est souvent discutée et, si l'exigence de réflexivité est reconnue par tous, leur position peut être variable au regard des éventuelles adaptations retenues ou conçues (Hassenforder *et al.*, 2021), par exemple en recherche participante ou bien lorsque la recherche fait entendre certaines voix moins présentes, même si une exigence de neutralité est généralement promue.

Idéalement, un collectif, formel ou non, sollicite des chercheurs — une équipe pouvant être composée de quelques personnes permanentes et temporaires — pour cet accompagnement, mais ce collectif peut aussi se construire à l'occasion d'une opération de recherche. Dans d'autres cas, le collectif peut être associé à un « terrain » préexistant, construit à travers une histoire de recherche et de collaboration, ou formalisé à travers un dispositif à l'image des *living labs* (Toffolini *et al.*, 2021). La recherche peut aussi privilégier les terrains les plus exposés au changement climatique, où l'adaptation devient de plus en plus urgente et où les acteurs sont davantage préoccupés et enclins à participer.

On peut distinguer trois types de collectifs : (1) le premier est un collectif relativement homogène de pairs, agriculteurs avec les mêmes productions et pratiques et préoccupés par la nécessité d'adaptation, de reconception ou d'amélioration de leur système de production, l'objectif étant avant tout tourné vers la recherche d'options techniques et organisationnelles cadrées par des conditions proches ; (2) le second est un collectif constitué à l'échelle d'une filière, rassemblant des acteurs de l'amont et de l'aval, jusqu'aux consommateurs, avec des enjeux de coordination des actions d'adaptation, à l'image des travaux réalisés dans le projet Laccave (Ollat et Touzard, 2024) ; (3) le troisième type de collectif est territorial et repose sur des acteurs plus divers, comme les représentants des collectivités et de l'État, de la société civile (citoyens, résidents et consommateurs) et les acteurs agricoles de la chaîne de valeur d'amont en aval et d'autres secteurs économiques. L'échelle territoriale permet non seulement de

prendre en compte des concurrences ou des externalités liées à l'usage de ressources locales (cas de l'eau par exemple), mais aussi d'intégrer des acteurs non agricoles qui peuvent être parties prenantes de certaines adaptations. La composition du collectif accompagné est bien sûr liée à l'orientation de chaque projet, mais elle est cruciale, et il ne faut pas sous-estimer le temps nécessaire pour constituer ces collectifs.

Selon notre définition initiale de l'accompagnement, la participation en est une modalité indispensable, qui peut intervenir à différentes étapes du processus (Faysse *et al.*, 2014). Celle-ci apparaît encore plus indispensable pour aborder l'enjeu du changement climatique, car la connaissance des impacts et des pistes d'adaptation est largement liée aux conditions locales et suppose d'assembler des explorations et des compétences dispersées ou à construire collectivement. Certaines étapes de l'accompagnement peuvent s'appuyer sur des séquences participatives, d'autres sur des activités et des apports scientifiques plus classiques (recherche bibliographique, modélisation, recherche agronomique, analyse, rédaction, conférences, etc.). Dans les faits, les étapes reposent souvent sur une hybridation des deux. Il faut aussi souligner l'importance des objets ou des productions intermédiaires qui constituent des points clés dans les démarches, et qui permettent d'organiser les échanges dans un but précis (la construction de cet objet) avec de nombreuses retombées qui vont bien au-delà d'une fonction technique de cet objet (connaissances interpersonnelles, repères communs, engagements mutuels, etc.). Un exemple de production intermédiaire est la représentation partagée du système et fondée sur un ensemble de définitions, sur une fresque, un récit ou une carte, sur des compromis sur certaines informations, sur une modélisation systémique dynamique (Egerer *et al.*, 2021) issue de coconstruction ou de coparamétrage (Barbier *et al.*, 2016), ou encore un jeu sérieux. Parfois, la démarche peut donner lieu à la production d'un outil d'aide à la décision (réflexion) ou même de vidéos ou de publications sur les réseaux sociaux.

Les processus d'accompagnement sont conçus de manière *ad hoc*, sur mesure, avec les acteurs à l'initiative de la démarche. Ils peuvent s'inspirer des étapes et des approches présentées sur la figure 13.1 et dans la section « Principe de l'accompagnement » de ce chapitre. Le besoin d'adaptation de la démarche n'est pas spécifique à la question climatique. Le processus doit être flexible, adaptable et agile tout au long de son déroulement, pour intégrer de nouveaux participants, adapter les méthodes de participation aux participants (leur hétérogénéité, leur nombre, leurs habitudes et leurs connaissances, les éventuelles différences de perceptions, valeurs, objectifs, etc.) et aux conditions d'exercice (saisonnalité des systèmes agricoles considérés, éloignement des acteurs dans l'espace, etc.), ou pour rebondir sur des opportunités se présentant à la démarche. Cela nécessite une posture particulière de l'équipe accompagnante qui accepte de proposer de nouvelles modalités d'échange et de travail, parfois, dans des directions méthodologiques qui n'étaient pas pratiquées, ce qui amène à tester de nouveaux outils et à chercher des compétences supplémentaires.

L'adaptation au changement climatique doit être articulé avec les autres enjeux, qui correspondent souvent à des enjeux de plus court terme, perçus comme prioritaires. Inviter ces autres enjeux dans la démarche peut alors renforcer la mobilisation des acteurs qui peut être difficile sur un enjeu perçu comme de plus long terme (Faysse *et al.*, 2014). Cependant, ce problème de priorité est de moins en moins vrai, car les acteurs des territoires et des filières subissent de manière croissante les effets du

changement climatique. L'adaptation au changement climatique peut alors s'estomper dans une démarche qui revient à traiter un ensemble d'enjeux qui permettront à l'agriculture d'être plus résiliente face au changement climatique. Mais la préoccupation du changement climatique implique une prise en compte du long terme par opposition à d'autres enjeux actuels. Elle structure donc les réflexions stratégiques et peut aider à envisager des solutions transformatives telles que des reconceptions de systèmes. Cette intégration du long terme s'accompagne de la prise en compte de l'incertitude (voir plus loin la section « Coconstruire et évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique à l'échelle d'un vignoble méditerranéen », p. 329).

L'apport de connaissances ou d'outils issus de la recherche

Les contributions techniques et scientifiques qui s'articulent avec la participation consistent à produire de la connaissance à partir de données quantitatives ou qualitatives et à les analyser après les avoir mises en forme (verbatim, typologies, modèles, cartes, statistiques, etc.) pour établir des constats et des références scientifiques.

Un premier apport consiste à préciser l'évolution du climat passé, actuel et futur, sur le territoire concerné et en fonction des enjeux posés avec le collectif d'acteurs : il peut s'agir de donner à voir les faits marquants des données agroclimatiques (identification d'années marquantes, fréquences associées à un type d'événement). Le travail consiste alors à faire un choix sur les indicateurs et à mobiliser des données brutes ou des plateformes qui mettent en forme ces données pour un usage agroclimatique et qui proposent une série d'indicateurs climatiques, agroclimatiques ou écoclimatiques (voir chapitres 1 et 3). Certains sont ouverts à tous (par exemple Drias pour les données climatiques, ou Canari et Oracle pour les données agro et écoclimatiques) ou à l'accès réservé. Certaines plateformes mettent à disposition des services climatiques adaptés à une filière comme l'atlas agroclimatique d'InterLoire⁵² pour la viticulture. L'accompagnement repose alors sur le choix de l'information à transmettre, à faire discuter par les acteurs accompagnés ou à construire avec eux. L'expertise sur le choix des indicateurs, sur leur pas de temps et sur leur mise en forme, est alors recherchée. Sur les données futures, l'incertitude (plusieurs résultats correspondant à plusieurs modèles et scénarios) doit être gérée. Ces indicateurs peuvent être utilisés tels quels avec les acteurs, ou comme données d'entrée dans des modèles de simulation de l'impact du changement climatique (voir chapitre 4). Les modèles mobilisés peuvent être soit des modèles mathématiques et biophysiques soit des modèles qualitatifs comme les cartes mentales, ou encore des modèles de type *system dynamics* (Egerer *et al.*, 2021). Ils visent à représenter l'évolution d'indicateurs clés pour l'agriculture, comme le bilan hydrique (voir par exemple Naulleau *et al.*, 2022a).

Une deuxième contribution, notamment lorsque l'on cherche à appréhender l'effet de différents grands facteurs de changements, est la prospective. Cette approche permet de prendre en compte des hypothèses dans des domaines où les changements ne sont pas forcément déjà observés (signaux faibles), mais peuvent avoir des effets importants, par exemple les attentes sociétales (réduction des pesticides, consommation), l'évolution du contexte économique et politique, des changements technologiques, des dynamiques foncières (Aigrain *et al.*, 2022). Le rôle des chercheurs est alors d'organiser

52. <https://atlasagroclimatique.techniloire.com/>

cette démarche de prospective, en associant des ateliers participatifs, de l'exploration d'hypothèses souvent issues d'autres exercices de prospective, et des réalisations de synthèses (narratifs, variables associées, etc.). Un exemple est présenté plus loin dans la section « Prospective Laccave ».

Une autre contribution peut consister à identifier des adaptations et des innovations avec par exemple des études ou des enquêtes, des méthodes de traques à l'innovation (Salembier *et al.*, 2016), dans la région concernée ou en ayant recours aux analogues climatiques (Kopf *et al.*, 2008). Par exemple, la plateforme Vineas (encadré 13.2) propose aux viticulteurs et aux acteurs de la filière d'explorer des solutions mises en œuvre autour de la Méditerranée dans des climats qui pourraient devenir ceux des vignobles situés plus au nord. Le recours à la traduction littéraire des informations (synthèses, articles scientifiques ou de presse) est indispensable pour rendre accessibles, au-delà des frontières, les exemples et les connaissances.

Encadré 13.2. La plateforme collaborative Vineas : échanger entre territoires et acteurs éloignés sur la vigne, le vin et le changement climatique

Vineas.net⁽¹⁾ est une plateforme collaborative internationale (sept langues) qui rassemble les acteurs et les projets et qui permet d'échanger des connaissances et des solutions sur la vigne, le vin et le changement climatique. Elle a pour objectif de faciliter la production et la mutualisation des connaissances nécessaires pour faire face au changement climatique avec sept catégories de données :

- naviguer et contribuer à la diversité des solutions et leviers face au changement climatique ;
- identifier les acteurs engagés sur ces enjeux et mettre en valeur leurs projets ;
- être visible en tant que membre de la plateforme ;
- explorer tous les documents (de la littérature scientifique aux vidéos, aux rediffusions d'événements) qui fournissent une base de connaissances importante allant de l'expertise locale à la recherche ;
- informer et s'informer des dernières actualités sur le sujet ;
- donner de la visibilité et être sûr d'être informé de tous les événements organisés autour de ces défis ;
- poster les questions, idées, demandes d'échange d'expériences dans une agora où les autres utilisateurs peuvent répondre et réagir.

Pour en savoir plus : voir la vidéo de présentation ou la section « À propos de Vineas » dans Nougier *et al.* (2021).

(1) <https://www.vineas.net/fr/1/home.html>

Au-delà de l'identification et de l'analyse de pratiques, projets, plans ou politiques publiques existants, l'accompagnement peut viser la coconstruction de solutions d'adaptation. À l'échelle de l'agrosystème (parcelle ou exploitation agricole), il peut s'agir de mettre en œuvre des méthodes de « conception innovante » (Hatchuel et Weil, 2009) de systèmes avec les acteurs concernés. Ces méthodes peuvent partir du système actuel pour imaginer leur évolution (conception pas-à-pas), ou pour se focaliser sur la nouveauté (conception *de novo*), mais souvent sans penser la transition. Ces deux types de conception ne préjugent pas de la nouveauté des systèmes imaginés (Meynard *et al.*, 2023). Si l'on souhaite intégrer les acteurs de l'aval, notamment pour prendre en compte

les évolutions induites par les transformateurs ou la demande des consommateurs, on peut parler de « coconstruction d'innovations couplées » (Meynard *et al.*, 2017), impliquant un enjeu de coordination entre les acteurs de la filière. L'adaptation dépend en effet non seulement des agriculteurs, mais aussi de leur système sociotechnique, où peuvent s'exprimer des verrouillages qui se caractérisent par des obstacles interconnectés à différents niveaux de la chaîne de valeur (Meynard *et al.*, 2017).

L'apport peut aussi consister à accompagner l'élaboration d'une stratégie d'adaptation. Dans une stratégie, l'idée est de combiner des mesures techniques ayant des effets directs (par exemple des pratiques agricoles) avec des mesures qui visent à inciter ou à favoriser l'adoption de ces pratiques comme des mesures incitatives de politiques publiques ou des mesures d'accompagnement comme le soutien aux réseaux et à leur animation. Ces mesures peuvent être articulées dans le temps et dans l'espace. Le recours à des typologies de pratiques est utile, car il permet d'organiser la diversité des mesures. La particularité de l'enjeu climatique étant la prise en compte du long terme, des méthodes spécifiques doivent être déployées pour prendre en compte la possibilité de différentes échéances temporelles, comme « les trajectoires dynamiques d'adaptations » (Kwakkel *et al.*, 2015), et l'incertitude croissante avec le futur, qui peut être traitée avec des approches intégrant les principes de la gestion adaptive (Arvai *et al.*, 2006).

L'étape de l'évaluation est une suite logique qui recoupe parfois l'élaboration de stratégies si celle-ci comporte un volet de dimensionnement, ou si elle intègre différents cycles de révision des décisions et des actions mises en œuvre (Boyer et Touzard, 2021). L'évaluation pose la question des indicateurs et des critères de choix, et met en lumière la finalité de l'adaptation. Celle-ci peut passer par l'évaluation participative ou par la simulation de l'effet de stratégies ou de mesures d'adaptation par la modélisation. En ayant recours à la participation, les mesures d'adaptation peuvent être évaluées en demandant aux participants de les classer (Naulleau *et al.*, 2022b) ou de les noter (Juge, 2020) selon différents critères (de Bruin *et al.*, 2009; Iglesias et Garrote, 2015). Une grille d'évaluation peut être élaborée avec les acteurs afin de refléter les valeurs ou les domaines d'évaluation et les indicateurs qui les intéressent ou de s'inspirer de méthodes existantes (par exemple la méthode Idea, Zahm *et al.*, 2019). Les approches par évaluation multicritère permettent de considérer différents enjeux traduits en indicateurs en conservant davantage de dimensions que dans une évaluation économique. De telles approches peuvent ainsi intégrer des indicateurs qui reflètent la vulnérabilité de l'agriculture, le coût des adaptations, mais aussi d'autres indicateurs qui prendraient en compte les enjeux non climatiques traités (cobénéfices). L'évaluation peut aller jusqu'à des indicateurs de capacité des parties prenantes à mettre en œuvre les mesures d'adaptation (Egerer *et al.*, 2021). Tout accompagnement à la planification ou à la réflexion prospective doit prendre en compte l'incertitude. Une des adaptations consiste notamment à passer d'une logique d'optimisation à une logique de robustesse qui consiste à éviter les pires situations (les situations de « regret ») et à favoriser les solutions « sans regret », avec des marges de sécurité (Lempert *et al.*, 2010; Lecoent et Graveline, 2019).

Enfin, en théorie, l'évaluation va de pair avec le suivi de la mise en œuvre, dans le temps. Si l'accompagnement est pérenne, ce qui est rarement le cas au regard de la temporalité des financements notamment (dépassant très rarement les trois à cinq ans), la mise en place d'un dispositif de suivi de la mise en œuvre doit permettre également d'analyser les effets du processus. Enfin, la publication et la communication

pourraient être considérées comme les dernières étapes pour renforcer le processus et pour inciter le changement d'échelle et la diffusion.

Le processus d'accompagnement

Comme nous l'avons déjà vu, le processus d'accompagnement est nécessairement adapté au cas par cas. Cependant, un cadre générique peut être proposé pour concevoir et pour adapter ce processus qui consiste à :

- caractériser les enjeux et définir l'objectif de l'accompagnement, définir l'horizon ou les horizons de travail ;
- identifier les ressources de l'accompagnement, dont la bibliographie et la documentation, le temps global de l'accompagnement, les échelles spatiales, les données ;
- concevoir la participation : hybrider des moments collectifs et collégiaux avec d'autres, comme les entretiens bilatéraux, des réunions et ateliers en sous-groupes, et le suivi et l'évaluation, permet de prendre en compte des avis divergents et des personnes avec des influences moins importantes que d'autres.

Plusieurs méthodes peuvent aider à l'accompagnement. Pour animer des temps collectifs, l'approche la plus courante est la réalisation d'ateliers qui mobilisent une large palette d'outils d'animation. Ces ateliers peuvent avoir un ou plusieurs des objectifs présentés plus haut : scénariser le futur (par exemple Naulleau *et al.*, 2022b) ou concevoir de nouveaux systèmes (Jeuffroy *et al.*, 2022). Dans des processus d'accompagnement, plusieurs ateliers sont en général réalisés, dont les objectifs vont être organisés de manière progressive. Différents outils (artefacts) peuvent également être mobilisés dans ces ateliers soit pour promouvoir l'innovation soit pour s'assurer du réalisme et de la faisabilité des solutions imaginées collectivement. Ainsi, on peut citer l'utilisation de jeux sérieux, comme celui développé par Martin *et al.* (2011) pour réfléchir à l'adaptation des élevages au changement climatique, ou par Hansen *et al.* (2018) pour réfléchir à des mesures d'atténuation pour des systèmes agricoles industrialisés. Ces ateliers peuvent également permettre l'apport de connaissances par la recherche : simulations par le biais de modèles, résultats d'expérimentations (en milieu contrôlé, en station expérimentale), et la co-innovation, comme des expérimentations menées chez les agriculteurs (*on-farm experimentation*, Lacoste *et al.*, 2022). Ce dernier type d'approche peut permettre de créer des « preuves de concept », générées par les praticiens (agriculteurs) eux-mêmes, comme c'est le cas en particulier pour la sélection participative des céréales (Desclaux *et al.*, 2009).

► Illustration avec trois exemples d'accompagnement

Nous proposons d'illustrer notre propos avec trois exemples et postures d'accompagnement contrastés : le premier vise l'accompagnement d'une filière nationale avec un travail à l'échelle de grands bassins viticoles, le deuxième accompagne un collectif de viticulteurs sur un petit bassin-versant, le troisième accompagne un groupe d'acteurs agricoles sur un petit territoire agricole. L'Ademe (2022) donne d'autres exemples de projets d'accompagnement.

Prospective Laccave

Dans le cadre du projet Laccave (métaprogramme Accaf INRAE), un exercice de prospective a produit des scénarios d'adaptation de la viticulture française à l'horizon 2050

qui ont permis d'accompagner la construction de stratégies à différentes échelles du secteur. L'exercice a été animé par un groupe de chercheurs et d'experts qui a d'abord élaboré, en suivant la méthode Syspahmm (Sebillotte et Sebillotte, 2002), quatre scénarios d'adaptation, présentés sous forme de récits publiés et médiatisés dans le contexte de la COP21 (Bruguière *et al.*, 2016). L'objectif initial était d'éclairer les scientifiques travaillant sur la vigne et sur le vin, et de diffuser plus largement ces résultats. Interpellés par des responsables viticoles, les chercheurs se sont alors engagés à partir de 2016 dans des démarches d'accompagnement d'acteurs de la filière, en utilisant ces scénarios comme des objets intermédiaires, suscitant débats, propositions d'actions et construction de stratégies.

Entre 2016 et 2018, les scénarios ont été utilisés pour animer des forums participatifs dans les sept principales régions viticoles françaises. À chaque fois, entre cinquante et cent acteurs de la filière régionale ont précisé les scénarios pour leur région, puis ont proposé des actions pour favoriser le scénario souhaité. Au-delà d'un appui à la sensibilisation et à la construction de stratégies pour des organisations viticoles régionales (Touzard *et al.*, 2020), les chercheurs ont analysé, comparé et publié les 2 700 propositions d'actions recueillies dans les sept régions (Touzard *et al.*, 2018).

Une démarche d'accompagnement des organisations vitivinicoles nationales s'est alors engagée, avec la constitution en 2018 d'un groupe national rassemblant les représentants d'organisations viticoles pour élaborer un plan national d'adaptation de la filière. Les responsables professionnels ont choisi, conformément aux forums régionaux, de favoriser un scénario basé sur l'innovation, afin de préserver les fondements du modèle viticole français. Ils ont proposé de consulter de nouveau les acteurs des régions viticoles, pour préciser les actions engagées ou souhaitées, selon huit domaines. Cette nouvelle consultation, analysée par le groupe de prospective de Laccave (Aigrain *et al.*, 2021), a alimenté la rédaction du plan d'adaptation de la filière nationale, présenté au ministre de l'Agriculture le 26 août 2021. La démarche a conduit en 2023 à l'initialisation de démonstrateurs territoriaux, coordonnés par l'IFV⁵³, pour suivre et expérimenter des solutions concrètes dans chaque vignoble (Bruguière *et al.*, 2024).

Coconstruire et évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique à l'échelle d'un vignoble méditerranéen

Dans un vignoble méditerranéen, une équipe de recherche interdisciplinaire (agronomie système, agronomie des territoires, bioclimatologie, sciences participatives) a mené une démarche participative visant à coconstruire et à évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique à l'échelle du vignoble (Naulleau, 2021). L'hypothèse selon laquelle la combinaison de leviers techniques et leur distribution dans le bassin-versant donnent des marges de manœuvre pour adapter la viticulture au changement climatique a été testée. La démarche s'est déployée sur un bassin-versant viticole (45 km²), représentant une diversité de situations viticoles (plaines, coteaux) et a impliqué une diversité d'acteurs locaux (agriculteurs, coopératives, syndicats d'AOP) et régionaux (chambre d'agriculture, IFV, région Occitanie). La démarche a consisté en une modélisation participative, composée d'une série d'ateliers collectifs et de phases de modélisation. Cela nous a amenés à construire plusieurs objets avec les acteurs : une vision partagée du

53. IFV : Institut français de la vigne et du vin.

territoire (Naulleau *et al.*, 2022a), une représentation conceptuelle du système à modéliser (processus représentés, indicateurs à quantifier), une analyse partagée de scénarios climatiques à différents horizons de temps (2050, 2080), des leviers et des stratégies de changement, l'évaluation numérique de ces stratégies et leur coévaluation (faisabilité et souhaitabilité des leviers de changement) (Naulleau *et al.*, 2022b).

Coconstruire et évaluer des scénarios d'adaptation en céréaliculture et élevage

En Camargue, une équipe de recherche interdisciplinaire (agronomie système, agronomie des territoires, sciences participatives) a mené une démarche participative visant à coconstruire et à coévaluer des scénarios d'adaptation au changement climatique à l'échelle du territoire (Delmotte *et al.*, 2017). L'objectif de l'étude était d'amener les parties prenantes du territoire (groupe de municipalités du Pays d'Arles, Syndicat rizicole — le riz est la culture dominante —, parc naturel régional, association d'éleveurs) à réfléchir au futur de leurs systèmes agricoles face au changement climatique et à des conditions économiques de production particulières. La démarche a consisté en une scénarisation de quatre futurs possibles (nouveaux contextes et systèmes agricoles qui y seraient développés), ensuite simulés à l'aide d'un modèle préexistant (Delmotte *et al.*, 2016). Cela nous a amenés à construire plusieurs objets avec les acteurs : une liste des facteurs de changement possibles (basée à la fois sur l'analyse du passé, sur les tendances actuelles et sur de possibles futurs aléas), l'identification des facteurs de changement majeurs (par exemple ceux qui auront une influence forte sur les systèmes agricoles, tout en gardant une incertitude quant à leur ampleur), l'identification des systèmes agricoles qui émergeraient dans ces contextes, l'évaluation numérique de ces stratégies et leur coévaluation (souhaitabilité de ces systèmes). Cela a amené les acteurs à réfléchir aux conditions pour l'émergence ou pour l'empêchement de ces systèmes, en particulier en matière d'aides publiques, puisque certains scénarios leur semblaient plus favorables (Delmotte *et al.*, 2017).

► Conclusion

Les exemples évoqués ou détaillés ici illustrent la diversité des échelles, des approches et des acteurs impliqués dans les démarches d'accompagnement pour l'adaptation au changement climatique dans l'agriculture. La spécificité principale de cet accompagnement est la prise en compte du long terme — difficile à appréhender par définition — et de l'incertitude associée. Long terme et incertitude peuvent être appréhendés par des adaptations méthodologiques. Sur le plan technique, c'est le recours à des données et à des hypothèses sur l'évolution future qui requiert un savoir-faire technique spécifique. Une seconde spécificité est l'implication technique que peut supposer une reconception ou une transformation dans le cas de systèmes fortement affectés par le changement climatique, de manière similaire à l'enjeu de transition vers l'agroécologie (Bergez *et al.*, 2019). La complexité technique de l'adaptation agricole au changement climatique est fréquente et justifie le recours à différentes méthodes, à différents savoirs et à une innovation des méthodes d'accompagnement.

La participation de la recherche à l'accompagnement des agriculteurs permet de combiner différentes compétences, connaissances et initiatives pour construire, à différentes échelles, des solutions face au changement climatique. La démarche a

également des intérêts pour la recherche : les chercheurs bénéficient d'une connaissance accrue des acteurs accompagnés, du système dans lequel ils évoluent et ils peuvent tirer profit de l'expérience participative et scientifique mise en œuvre qu'ils valoriseront scientifiquement ou pour de futures démarches participatives. L'interdisciplinarité semble quasiment indispensable du côté de l'accompagnant. Pour les équipes de recherche, cela n'est pas toujours évident car, malgré des incitations à l'interdisciplinarité, les chercheurs restent évalués par leurs pairs et par discipline et ne sont donc pas encouragés à s'engager dans ce type de travaux. Les limites de l'interdisciplinarité pour les chercheurs sont bien connues, comme l'indiquent Howden *et al.* (2007), « *Science, too, has to adapt* ». Le facteur *temps* pousse également la recherche à s'interroger, elle qui doit arbitrer entre des engagements de court ou de long terme sur les terrains. Les « climathons », qui sont des interventions ponctuelles (48h) visant l'émergence et la cocréation d'actions locales pour l'adaptation au changement climatique (Graveline *et al.*, 2024) et qui ne s'inscrivent pas nécessairement dans un accompagnement de long terme par opposition aux dispositifs de zones ateliers ou de *living labs* qui correspondent à des engagements de long terme sur un terrains, en sont un exemple. Dans une perspective de justice sociale, on peut avancer qu'il serait important que les accompagnements soient accessibles sur tout type de territoire, afin d'assurer une couverture spatiale homogène du territoire national ou des filières accompagnées, pour éviter que seuls les territoires et les collectifs connus ou plus accessibles soient accompagnés.

Pour multiplier ces démarches d'accompagnement, on peut s'appuyer sur l'opportunité que constituent la motivation et la préoccupation des différents acteurs vers la transition, qu'elle soit écologique, agroécologique ou énergétique, et donc sur le constat largement partagé de la nécessité de renouveler les pratiques et les organisations de l'activité agricole à l'échelle individuelle et collective et au niveau des territoires et des filières. De plus, le renouvellement des générations et les nouvelles technologies constituent autant d'opportunités pour entreprendre des démarches d'accompagnement à l'adaptation au changement climatique des collectifs agricoles. Du côté des politiques publiques, il n'y a encore que peu d'incitations à l'adaptation malgré les plans d'adaptation et l'intégration de ces préoccupations dans la politique agricole commune et dans la réforme de l'assurance récolte (voir chapitre 16); des instruments innovants contractuels ou incitatifs sont à imaginer. Si les bénéfices de l'adaptation sont largement attendus par les exploitations qui s'adaptent, de nombreux cobénéfices peuvent être espérés pour les territoires et pour les filières de l'amont à l'aval jusqu'au consommateur d'un système agricole moins affecté par les événements extrêmes et par les tendances climatiques.

Comme le recommande un rapport des Conseils généraux (1) de l'environnement et du développement durable (CGEDD) et (2) de l'alimentation de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) (Ayphassorho *et al.*, 2022), il faut, grâce au travail en réseau, mieux connecter la recherche, le développement agricole, les filières et les agriculteurs pour renforcer les transformations. On peut ajouter un besoin de plus forte articulation de ces démarches et de ces acteurs avec les échelles et les acteurs territoriaux, notamment sur des questions d'usages de l'eau (Graveline *et al.*, 2023), mais plus généralement dans une perspective d'intégration territoriale des enjeux. Par exemple, il apparaît judicieux que les démarches des filières intègrent des acteurs territoriaux (comme les collectivités) pour prendre en compte les changements globaux à

ces échelles (foncier, eau, main-d'œuvre, etc.) et inversement, que les acteurs agricoles rejoignent les démarches territoriales. La recherche agronomique comme l'innovation variétale doit elle-même poursuivre le renouvellement de ses approches pour intégrer davantage les acteurs des chaînes de valeurs dans la construction d'idéotypes (par exemple le projet Vinid'Occ Lab).

Le changement d'échelle de l'accompagnement doit être pensé, car tous les agriculteurs ne pourront pas être accompagnés par la recherche ou par des professionnels : comment faire en sorte que d'autres agriculteurs au-delà des collectifs accompagnés puissent bénéficier des méthodes ou des réflexions et solutions élaborées dans ces accompagnements ? Les plateformes Web ou les réseaux sociaux peuvent être des pistes pour communiquer sur ces expériences et sur ces résultats, comme la plate-forme Vinea (encadré 13.2) ou des groupes sur les réseaux sociaux ; mais d'autres arènes plus larges que les petits collectifs doivent aussi pouvoir relayer ces démarches et ces expériences, comme les organismes intermédiaires (notamment les chambres d'agriculture).

► Références

- Ademe, 2022. Démarches d'adaptation au changement climatique dans les secteurs agricole et forestier et leurs filières, Ademe, Paris.
- Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García De Cortázar-Atauri I., Gautier J. *et al.*, 2021. Quelles actions pour la filière vigne et vin face au changement climatique ? Une sélection de propositions issues d'une démarche participative et de la consultation d'instances professionnelles, INRAE, 20 p., <https://doi.org/10.15454/ahd9-e468>.
- Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García De Cortázar-Atauri I., Gautier J. *et al.*, 2022. La fabrique d'une stratégie nationale viti-vinicole d'adaptation au changement climatique, in *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, Onerc, La Documentation française, 272-288, <https://hal.inrae.fr/hal-03641399>.
- Arvai J., Bridge G., Dolsak N., Franzese R., Koontz T., Luginbuhl A. *et al.*, 2006. Adaptive management of the global climate problem: bridging the gap between climate research and climate policy, *Climatic Change*, 78, p. 217-225, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9094-6>.
- Ayphassorho H., Sallenave M., Bertrand N., Mitteault F., Rollin D., 2022. Quelles perspectives pour l'eau et l'agriculture d'ici à 2050 dans le contexte du changement climatique ?, *Annales des Mines – Responsabilité et Environnement*, 106(2), 81-84, <https://doi.org/10.3917/RE1.106.0081>.
- Barbier J.M., Cittadini R.A., Delmotte S., Hossard L., Le Page C., Tardivo C., 2016. Accompagnement des acteurs de territoires agricoles pour l'atténuation du changement climatique, compte rendu scientifique, Climatac, Inra, hal-02801469.
- Bergez J.-E., Audouin E., Théron O., 2019. *Agroecological transitions: from theory to practice in local participatory design*, Springer Nature Switzerland AG, 335 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2>.
- Boyer J., Touzard J.-M., 2021. To what extent do an innovation system and cleaner technological regime affect the decision-making process of climate change adaptation? Evidence from wine producers in three wine clusters in France, *Journal of Cleaner Production*, 315, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128218>.
- Bruguiere F., Aigrain P., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Ollat N. *et al.*, 2016. Une prospective pour le secteur vignes et vins dans le contexte du changement climatique, *Les synthèses de FranceAgriMer*, 40, 21 p., <https://hal.inrae.fr/hal-01506534>.
- Bruguiere F., Aigrain P., Bois B., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J. *et al.*, 2024. Chapitre 7 – Prospective participative et stratégie nationale, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 231-242.

- Compagnone C., 2011. Quelles formes d'accompagnement des agriculteurs à l'innovation ?, *Pour*, 212, 123-128, <https://doi.org/10.3917/pour.212.0123>.
- de Bruin K., Dellink R.B., Ruijs A., Bolwidt L., van Buuren A., Graveland J. et al., 2009. Adapting to climate change in The Netherlands: an inventory of climate adaptation options and ranking of alternatives, *Climatic Change*, 95, 23-45.
- Delmotte S., Barbier J.M., Mouret J.C., Le Page C., Wery J., Chauvelon P. et al., 2016. Participatory integrated assessment of scenarios for organic farming at different scales in Camargue, France, *Agricultural Systems*, 143, 147-158, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.009>.
- Delmotte S., Couderc V., Mouret J.C., Lopez-Ridaura S., Barbier J.M., Hossard L., 2017. From stakeholders narratives to modelling plausible future agricultural systems. Integrated assessment of scenarios for Camargue, Southern France, *European Journal of Agronomy*, 82, 292-307, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.009>.
- Desclaux D., Nolot J.-M., Chiffolleau Y., 2009. La sélection participative pour élaborer des variétés de blé dur pour l'agriculture biologique, *Innovations Agronomiques*, 7, 65-78, <https://doi.org/10.17180/jmrk-cj59>.
- Duvernoy J., Carrega M., Voirin S., 2022. Les stratégies européenne et française d'adaptation au changement climatique, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 106, 69-71, <https://doi.org/10.3917/re1.106.0069>.
- Egerer S., Cotera R.V., Celliers L., Costa M.M., 2021. A leverage points analysis of a qualitative system dynamics model for climate change adaptation in agriculture, *Agricultural Systems*, 189, 103052, <https://doi.org/10.1016/j.AGSY.2021.103052>.
- Iglesias A., Garrote L., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe, *Agricultural Water Management*, 155, 113-124, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>.
- Juge E., 2020. Évaluation multicritère et participative de stratégies d'adaptation de la filière vigne et vin aux changements climatiques, mémoire de fin d'études, INRAE, université de Lorraine.
- Faysse N., Rinaudo J.D., Bento S., Richard-Ferroudji A., Errahj M., Varanda M. et al., 2014. Participatory analysis for adaptation to climate change in Mediterranean agricultural systems: Possible choices in process design, *Regional Environmental Change*, 14, 57-70, <https://doi.org/10.1007/S10113-012-0362-X>.
- Graveline N., Alix A., Debolini M., Dorchies D., Erdlenbruch K., Le Gallo J. et al., 2023. Talanoa : dialoguer, explorer, évaluer et innover pour la gestion de l'eau et l'adaptation de l'agriculture au changement climatique en Méditerranée, communication au congrès du Réseau de recherche sur l'innovation, Forum Innovation 2023 « Innover pour une gestion durable et concertée de l'eau ».
- Graveline N., Nougier, M., Touzard, J.-M., 2024. Faire émerger l'action climatique à l'échelle locale : l'exemple des climathons viticoles, in Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, 195-216.
- Hansen A., Schneider K., Lange J., 2018. Games for knowledge transfer and as a stimulus for climate change mitigation in agriculture. Lessons learned from a game prototype, in *Handbook of Climate Change Communication*, Springer International Publishing, 3, p. 197-208, https://doi.org/10.1007/978-3-319-70479-1_12.
- Hassenforder E., Ferrand N., Girard S., 2021. L'ingénierie de la participation : préparer et penser une démarche participative, *Sciences Eaux & Territoires*, 35, 28-35, <https://doi.org/10.3917/set.035.0028>.
- Hatchuel A., Weil B., 2009. CK design theory: an advanced formulation, *Research in Engineering Design*, 19, 181-192, <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>.
- Howden S.M., Soussana J.F., Tubiello F.N., Chhetri N., Dunlop M., Meinke H., 2007. Adapting agriculture to climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(50), 19691-19696, <https://doi.org/10.1073/pnas.0701890104>.
- 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 et New York, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.

- Jeuffroy M.H., Loyce C., Lefevre T., Valantin-Morison M., Colnenne-David C., Gauffretea A. *et al.*, 2022. Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools: learning from 12 case studies, *European Journal of Agronomy*, 139, 126573, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573>.
- Klenk N., Fiume A., Meehan K., Gibbes C., 2017. Local knowledge in climate adaptation research: moving knowledge frameworks from extraction to co-production, *WIREs Climate Change*, 8, 475, <https://doi.org/10.1002/wcc.475>.
- Kopf S., Ha-Duong M., Hallegatte S., 2008. Using maps of city analogues to display and interpret climate change scenarios and their uncertainty, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4), 905-918, <https://shs.hal.science/halshs-00260190v2>.
- Kwakkel J.H., Haasnoot J.H., Walker W.E., 2015. Developing dynamic adaptive policy pathways: A computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world, *Climatic Change*, 132(3), 373-86, <https://doi.org/10.1007/S10584-014-1210-4>.
- Lacoste M., Cook S., McNee M., Gale D., Ingram J., Bellon-Maurel V. *et al.*, 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture, *Nature Food*, 3(1), 11-18, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00424-4>.
- LeCoentP., GravelineN., 2019. Incertitude et robustesse des politiques de l'eau. Rapport BRGM/RP-68940-FR, <https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/documentation/gestion%20quanti/Rapport%20BRGM-AFB%20RobustesseVEF.pdf>.
- Leenhardt D., Voltz M., Barreteau O., 2020. *L'Eau en milieu agricole : Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*, Versailles, éditions Quæ.
- Lempert R.J., Popper S.W., Bankes S.C., 2010. Robust decision making: coping with uncertainty, *The Futurist*, 44(1), 47-48.
- Martin G., Felten B., Duru M., 2011. Forage rummy: a game to support the participatory design of adapted livestock systems, *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1442-1453, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.013>.
- Meynard J.-M., Jeuffroy M.H., Le Bail M., Lefèvre A., Magrini M.B., Michon C., 2017. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems, *Agricultural Systems*, 157, 330-339, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.002>.
- Meynard J.-M., Cerf M., Coquil X., Durant D., Le Bail M., Lefèvre A. *et al.*, 2023. Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition, *European Journal of Agronomy*, 150, 126948, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948>.
- Naulleau A., 2021. Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen, thèse de doctorat, Montpellier, SupAgro, 280 p., <https://www.theses.fr/2021NSAM0041>.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Berteloot V., Fabre J.C., Crevoisier D. *et al.*, 2022a. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed, *Environmental Modelling & Software*, 150, 105342, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105342>.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Vinatier F., Hossard L., 2022b. How can winegrowers adapt to climate change? A participatory modeling approach in southern France, *Agricultural Systems*, 203, 103514, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103514>.
- Niles M.T., Brown M., Dynes R., 2016. Farmer's intended and actual adoption of climate change mitigation and adaptation strategies, *Climatic Change*, 135(2), 277-295, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1558-0>.
- Nougier M., Graveline N., Laurent J.B., Tintinger M., Reynders S., Touzard J.-M., 2021. Collaboration et partage d'expérience à l'échelle méditerranéenne : un levier clé de l'adaptation au changement climatique, *Revue des Enologues*, hors-série, février 2021, 178, 13-14.
- Ollat N., Touzard J.-M. (Coords), 2024. *Vigne, vin et changement climatique*, Versailles, éditions Quæ, p. 195-216, ISBN : 978-2-7592-3796-8.
- Salembier C., Elverdin J.H., Meynard J.-M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa, *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1-10, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>.

Sebillotte M., Sebillotte C., 2002. Recherche finalisée, organisations et prospective : la méthode prospective SYSPAHHM, *OCL, Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 9(5), 329-345, <https://doi.org/10.1051/ocl.2002.0329>.

Toillier A., Faure G., Chia E., 2018. Penser et organiser l'accompagnement de l'innovation collective dans l'agriculture, in Faure G., Chiffolleau Y., Goulet F., Temple L., Touzard J.-M. (Coords), *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*, Versailles, éditions Quæ, p. 123-137, ISBN : 978-2-7592-2812-6.

Toffolini Q., Capitaine M., Hannachi M., Cerf M., 2021. Implementing agricultural living labs that renew actors' roles within existing innovation systems: A case study in France, *Journal of Rural Studies*, 88, 157-168, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.10.015>.

Touzard J.-M., Ollat N., Aigrain P., Bois B., Brugiere F., Duchêne E. et al., 2020. La filière vigne et vin face au changement climatique : enseignements d'un forum de prospective pour le Val de Loire, *Norois*, 2(255), 83-89, <https://doi.org/10.4000/norois.9897>.

Touzard J.-M., Ollat N., Aigrain P., Bruguière F., Duchêne E., Douvillier T. et al., 2018. La filière vigne et vin face au changement climatique en 2050 : bilan des forums de prospective, Inra/Laccave/Climate KIC, plaquette pour les acteurs de la filière, 8 p., www.vineas.net.

Zahm F., Alonso Ugaglia A., Barbier J.-M., Boureau H., Del'homme B., Gafsi M. et al., 2019. Évaluer la durabilité des exploitations agricoles : La méthode IDEA v4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité, *Cahiers Agricultures*, 28(5), 10, <https://doi.org/10.1051/cagri/2019004>.

Partie 5

Approches globales du changement climatique en agriculture

Chapitre 14

Agriculture, émissions de gaz à effet de serre et contribution à l'atténuation

Sylvain Pellerin

L'agriculture n'est pas seulement affectée par le changement climatique, elle est aussi un secteur d'activité émetteur de gaz à effet de serre, et donc contribuant au changement climatique. Elle émet en particulier du méthane (CH_4), lié à l'élevage et à la gestion des déjections animales, et du protoxyde d'azote (N_2O), lié à l'usage des engrains azotés, minéraux et organiques. Elle émet aussi du dioxyde de carbone (CO_2), en raison de l'utilisation d'énergie fossile par les engins agricoles ou pour le chauffage des bâtiments. Par ailleurs, du fait des matières organiques qu'ils contiennent, les sols agricoles représentent un stock important de carbone organique dont l'évolution à la hausse ou à la baisse donne lieu à un retrait net de CO_2 de l'atmosphère ou au contraire à une émission nette de CO_2 . Enfin, l'agriculture, par la production d'énergie renouvelable (biogaz produit par méthanisation d'effluents d'élevage et de résidus de culture par exemple), peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'énergie par substitution aux énergies fossiles. La contribution nette de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre doit donc tenir compte de ces différentes composantes (émissions, stockage et déstockage de carbone, production d'énergie renouvelable et effet de substitution). Du fait de ses liens avec d'autres secteurs, comme la production d'engrais azotés ou la collecte, la transformation et la distribution des produits jusqu'aux aliments et au recyclage des déchets, le secteur agricole donne aussi lieu à des émissions en amont et en aval, l'ensemble constituant les émissions du secteur agroalimentaire.

Dans ce chapitre, nous présentons les processus à l'origine des émissions du secteur agricole et le poids des différents gaz et des processus associés. Nous évoquons les leviers mobilisables pour réduire les émissions de CH_4 et de N_2O , pour accroître les stocks de carbone organique dans les sols et pour contribuer à la production d'énergie renouvelable. Enfin, nous examinons les synergies et les antagonismes entre l'objectif de réduction des émissions nettes du secteur agroalimentaire, la transition agroécologique et l'évolution des régimes alimentaires.

► Le secteur agricole, source et puits de gaz à effet de serre

Les gaz concernés (CH_4 , N_2O , CO_2) et la notion de potentiel de réchauffement global

Deux gaz contribuent majoritairement aux émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole : (1) le CH_4 émis par les ruminants (bovins, ovins, caprins) du fait de leur physiologie digestive (CH_4 entérique) et lors du stockage et de la gestion des effluents d'élevage, et (2) le N_2O , émis par les sols agricoles et par les effluents à l'occasion des transformations de l'azote (figure 14.1).

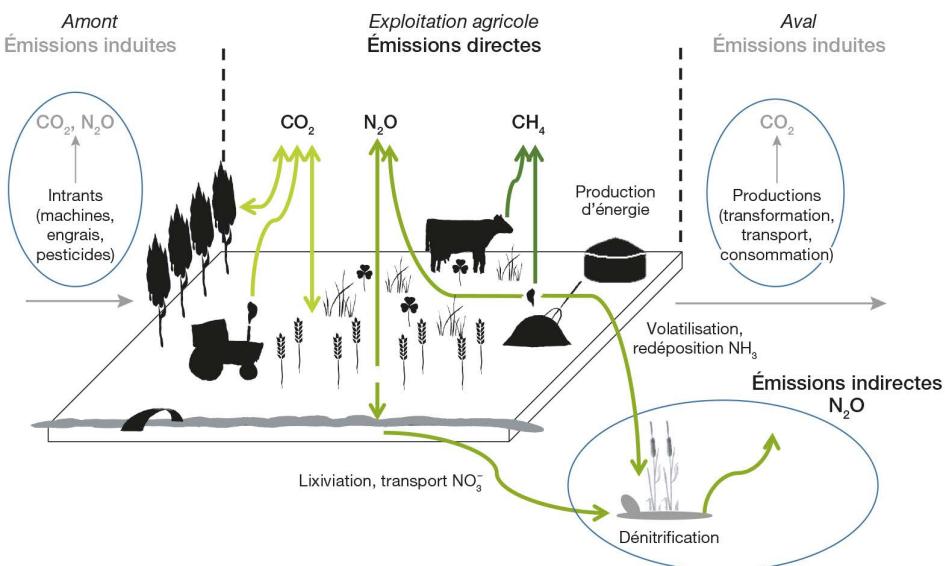


Figure 14.1. Émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole : notions d'émission directe, indirecte et induite.

Le CH_4 entérique, évacué par éruption, résulte de la digestion des glucides dans la panse des ruminants avec production de dihydrogène transformé en CH_4 par des bactéries méthanogènes. Le stockage des effluents d'élevage en condition anaérobique conduit également à la production de CH_4 par fermentation. Au niveau mondial, une troisième source majeure d'émission de CH_4 est la riziculture, du fait de la fermentation des matières organiques en condition d'anaérobiose dans les parcelles inondées. Ces émissions sont négligeables en France en raison des très faibles surfaces consacrées à la riziculture, ce qui fait que l'élevage est la principale source d'émission de CH_4 dans le cas de l'agriculture française.

Les émissions de N_2O par les sols agricoles interviennent lors des processus de nitrification (transformation de l'ion ammonium NH_4^+ en ion nitrate NO_3^- , avec production de N_2O , intervenant en condition aérobique) et de dénitrification (transformation de l'ion nitrate NO_3^- en diazote N_2 , avec production intermédiaire de N_2O , intervenant en condition anaérobique) (figure 14.2). Ces transformations résultent de processus microbiens très dépendants des conditions physico-chimiques locales (pH, pression

partielle en oxygène, température), donnant lieu à des pics d'émission lorsque les conditions favorables à la production de N_2O sont localement et momentanément réunies. Les émissions de N_2O des sols agricoles sont donc extrêmement variables dans l'espace et dans le temps. Elles dépendent très fortement des apports d'azote et des conditions physico-chimiques dans le sol lors de ses transformations.

Une particularité du CH_4 et du N_2O , qui explique leurs fortes contributions aux émissions agricoles quand elles sont exprimées en équivalent CO_2 , est que leur pouvoir de réchauffement global calculé à cent ans (PRG) est, à masse égale, 28 fois et 265 fois supérieur à celui du CO_2 pour le CH_4 et le N_2O , respectivement (IPCC, 2021).

Enfin, l'activité agricole, du fait de sa consommation d'énergie fossile (fuel des tracteurs, gaz pour le chauffage des bâtiments, etc.), est à l'origine d'émissions de CO_2 .

Contrairement aux autres secteurs de l'économie, les émissions de l'agriculture sont donc majoritairement d'origine non énergétique et diffuse. Elles sont de ce fait plus difficiles à évaluer que les émissions des autres secteurs, souvent ponctuelles (industrie) ou liées à la consommation d'énergies fossiles (transport, résidentiel).

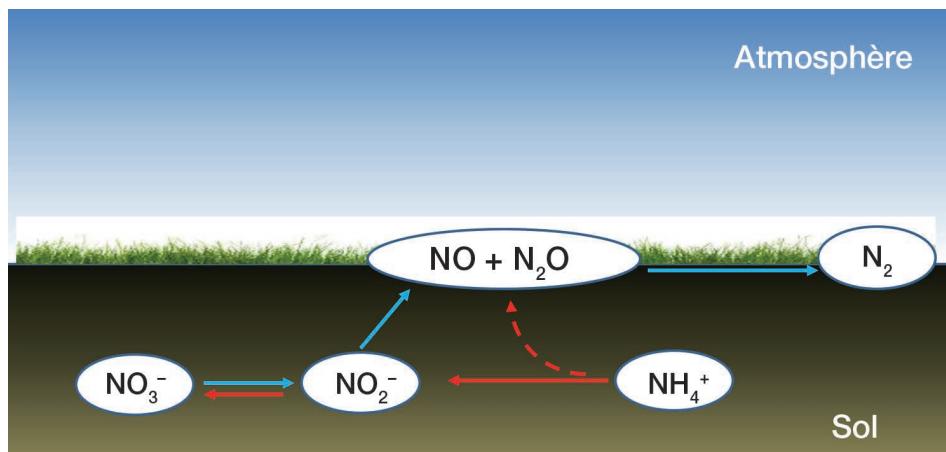


Figure 14.2. Processus à l'origine d'émissions de N_2O lors des transformations de l'azote dans les sols (dénitrification en bleu et nitrification en rouge). Source : Hénault, 2004.

En plus de contribuer à des émissions brutes de CH_4 (du fait de l'élevage), de N_2O (en raison de l'usage d'engrais azotés) et de CO_2 (du fait de l'usage d'énergies fossiles), les écosystèmes agricoles donnent lieu à des échanges constants de CO_2 avec l'atmosphère par le biais de la photosynthèse et de la respiration. Les plantes cultivées extraient du CO_2 de l'atmosphère par assimilation chlorophyllienne, dont une fraction repart dans l'atmosphère par respiration autotrophe et une autre fraction entre dans la composition de la biomasse. La plus grande partie du carbone incorporé dans la biomasse repart dans l'atmosphère à brève échéance, après la transformation et la consommation des produits récoltés par les animaux d'élevage ou par les humains et la respiration, ou après le retour au sol et la minéralisation des résidus de culture et des racines. Cependant, une partie du carbone revenant au sol est stabilisée par des interactions organominérales (Basile-Doelsch *et al.*, 2020), ce qui fait que le temps de résidence de ce carbone dans le compartiment organique du sol peut atteindre plusieurs années,

voire plusieurs décennies ou siècles (Balesdent *et al.*, 2018), constituant ainsi le stock de carbone organique des sols. La teneur en carbone organique d'un sol est généralement décroissante de la surface vers la profondeur, du fait d'entrées de carbone se faisant majoritairement depuis la surface (figure 14.3). À l'équilibre, ce stock de carbone organique est constant et il ne modifie pas le bilan de gaz à effet de serre de l'écosystème agricole. En revanche, une modification de l'occupation du sol (comme un retournement de prairie) ou une modification des pratiques agricoles (par exemple l'exportation hors de la parcelle des résidus de culture alors qu'ils étaient auparavant enfouis) vont avoir pour conséquence une évolution à la baisse ou à la hausse du stock de carbone organique, répartie sur plusieurs années, jusqu'à un nouvel état d'équilibre. Une telle variation du stock de carbone organique du sol se traduit par une émission nette de CO₂ vers l'atmosphère (en cas de diminution du stock de carbone du sol) ou par un retrait net de CO₂ depuis l'atmosphère (en cas d'accroissement du stock de carbone du sol). Les variations de stock de carbone organique du sol doivent donc être comptabilisées dans le bilan net des émissions de gaz à effet de serre des parcelles agricoles.



Figure 14.3. Coupe verticale de sol montrant la concentration des matières organiques dans l'horizon de surface.

La notion d'émission directe, indirecte, induite et l'importance du périmètre de calcul

Les données relatives aux émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole distinguent généralement les émissions directes, c'est-à-dire intervenant sur le

périmètre des exploitations agricoles, des émissions indirectes, intervenant en dehors de ce périmètre, mais qui ont pour origine les intrants utilisés en agriculture (figure 14.1). Un exemple classique correspond aux émissions de N_2O intervenant dans des milieux non agricoles (zones humides, fossés, etc.), mais dues à des transferts d'azote depuis des parcelles agricoles par lixiviation et par transfert d'ions nitrate (NO_3^-) via le réseau hydrographique, ou par volatilisation d'ammoniac (NH_3), transfert atmosphérique et dépôt dans des zones non agricoles. Bien qu'elles soient souvent confondues, ces émissions indirectes liées à un transfert physique sont à distinguer des émissions induites en amont et en aval des exploitations agricoles et liées à la fabrication et au transport des intrants utilisés en agriculture (amont), ou à la collecte, à la transformation et à la distribution des produits jusqu'à leur consommation (aval). Un exemple classique d'émission induite en amont de l'agriculture correspond aux émissions de N_2O et de CO_2 liées à la fabrication industrielle des engrains azotés, processus très consommateur d'énergie. Dans les inventaires nationaux d'émissions comme ceux effectués par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa), ces émissions ne sont pas comptabilisées dans le secteur agricole, mais dans le secteur de l'industrie. D'autres sources de données affectent ces émissions à l'agriculture ou aux produits agricoles, ce qui peut être source de confusion.

► Contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre

Les émissions directes et indirectes, hors secteur Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF)

En France, l'agriculture est à l'origine de 76,5 MtCO₂e par an (chiffre 2021 exprimé en millions de tonnes en équivalent CO₂; HCC, 2023), soit 18,9 % des émissions nationales (403,8 MtCO₂e). Ce calcul tient compte des émissions directes de CH₄, de N₂O et de CO₂ intervenant sur les exploitations agricoles et des émissions indirectes associées.

Les émissions de N₂O sont estimées en fonction des quantités d'engrais azotés épandus, minéraux et organiques, en utilisant des facteurs d'émission par défaut. Les émissions de CH₄ sont calculées d'après les effectifs des animaux et des facteurs d'émissions fonction de l'espèce, de la catégorie d'animal, des modes d'alimentation et de gestion des déjections. Les émissions de CO₂ liées à l'usage d'énergie fossile en agriculture sont comptabilisées, mais pas les émissions (négatives ou positives) de CO₂ liées aux variations de stocks de carbone dans les écosystèmes, en particulier dans les sols, et comptabilisées sous une autre rubrique (voir section suivante). En tenant compte du PRG de chacun de ces gaz, il apparaît qu'en France le CH₄ représente 55,7 % des émissions du secteur agricole, le N₂O 29,4 % et le CO₂ 14,8 %. L'élevage représente 59,6 % des émissions agricoles, dont 83 % sont liées à l'élevage bovin. Entre 2005 et 2021, les émissions agricoles ont baissé de 9,8 %, principalement du fait de la baisse des effectifs animaux liée aux difficultés économiques de la filière.

Les émissions du secteur UTCATF

L'utilisation des terres (qui distingue classiquement les terres arables, les prairies permanentes et les forêts) est un des principaux facteurs qui explique la variabilité des stocks de carbone organique dans les sols. D'après les résultats du Réseau de

mesure et de la qualité des sols (RMQS), les stocks de carbone organique du sol en France métropolitaine sont de l'ordre de 80 t de carbone par hectare dans l'horizon 0-30 cm sous forêt et sous prairie permanente, de l'ordre de 50 t de carbone par hectare sous grande culture, et de l'ordre de 35 t de carbone par hectare sous vigne (tableau 14.1). Ces chiffres moyens cachent de très importantes disparités géographiques (figure 14.4) liées à la multiplicité des facteurs qui affectent la dynamique du carbone dans les sols (volume des entrées de carbone, température et humidité, teneur en argile, etc.). Les changements d'utilisation des terres sont une cause majeure de perte ou de gain de carbone dans les sols (tableau 14.2). Le retournement d'une prairie donne lieu à une baisse du stock, étalée sur plusieurs années (de l'ordre de -2 t de carbone par hectare et par an sur vingt ans). À l'inverse, l'implantation d'une prairie après une période de grande culture donne lieu à un accroissement de

Tableau 14.1. Stock de carbone organique dans l'horizon 0-30 cm des sols métropolitains, par mode d'occupation du sol. Source : GIS Sol, 2017.

	Min	Moyenne	Médiane	Max
Stock de carbone organique sous prairie permanente (t/ha)	18,1	84,6	78,3	309
Stock de carbone organique sous grande culture (t/ha)	9,92	51,6	47,9	137
Stock de carbone organique sous forêts (t/ha)	6,87	81,0	73,4	230

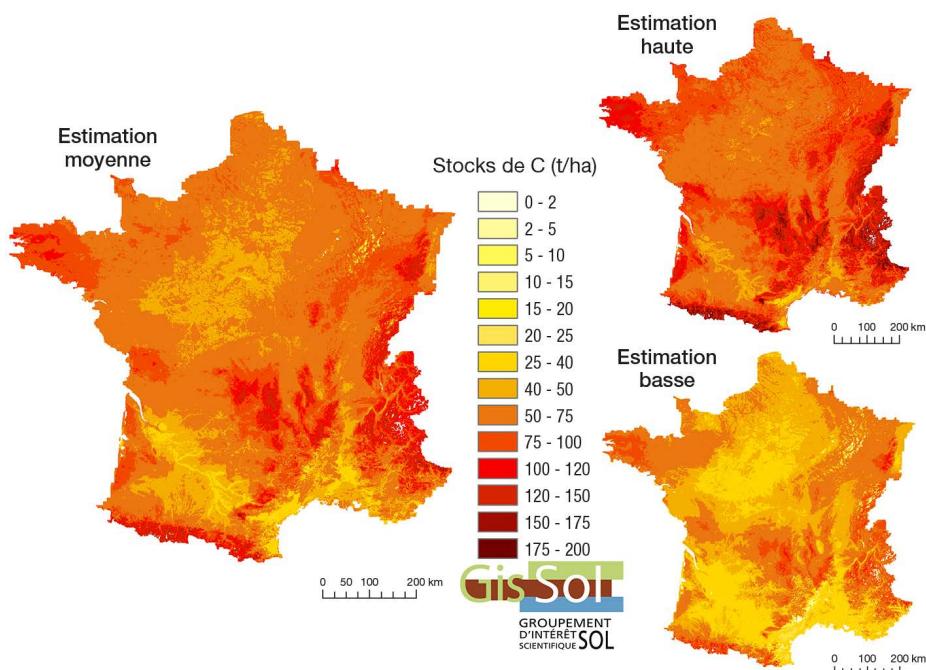


Figure 14.4. Stocks de carbone dans l'horizon 0-30 cm des sols de France métropolitaine. Source : GIS Sol, 2017.

stock (+ 0,9 t de carbone par hectare et par an sur vingt ans) (Poeplau *et al.*, 2011). Pour autant, quelle que soit l'utilisation des terres, le stock de carbone tend vers une valeur d'équilibre plus élevée dans le cas d'une forêt ou d'une prairie que dans le cas d'une grande culture, mais qui n'augmente pas indéfiniment. En France, le secteur UTCATF génère des émissions négatives (- 17,1 MtCO₂e, soit une compensation de 4,2 % des émissions nationales) liées à l'augmentation de la surface forestière, elle-même liée à la déprise agricole, et ce, malgré une réduction de la surface des prairies permanentes (- 19 % entre 1990 et 2021). On observe cependant une tendance récente à la baisse de ce puits, du fait notamment de l'effet du changement climatique sur le stock de carbone forestier (mortalité des arbres, incendies, etc.). Les variations de stock de carbone liées non pas à un changement d'utilisation des terres, mais à une modification des pratiques agricoles ou sylvicoles (nouvelles pratiques de gestion des résidus de culture par exemple) ne sont pas pour l'instant indiquées dans l'inventaire national des émissions faute d'informations statistiques suffisantes, alors qu'elles constituent un levier important pour faire évoluer à la hausse les stocks de carbone dans les sols agricoles.

Tableau 14.2. Quantité de carbone organique stockée ou déstockée (en tonnes de carbone par hectare et par an), calculée sur vingt ans, pour cinq changements classiques d'utilisation des terres. Source : d'après la méta-analyse de Poeplau *et al.* (2011).

Transition	Taille de l'échantillon	Profondeur moyenne de mesure (cm)	Stockage et déstockage de carbone organique du sol mesuré (kgC/ha/an)
Culture → Prairie	89	23,5	+ 920 ± 250
Prairie → Culture	176	27,1	- 2080 ± 260
Forêt → Culture	29	28,5	- 2310 ± 1500
Culture → Forêt	70	28,0	+ 770 ± 360
Prairie → Forêt	100	38,9	- 170 ± 250

► Les leviers de réduction des émissions directes et indirectes de CH₄ et de N₂O

Les émissions de CH₄

En agriculture, la réduction des émissions de CH₄, principalement liées à l'élevage, fait l'objet d'une attention particulière, d'une part, parce qu'il s'agit du principal poste d'émissions (55,7 % des émissions du secteur agricole) et, d'autre part, parce qu'une réduction des émissions aurait un effet rapide quant à la limitation du réchauffement, du fait de la courte demi-vie de ce gaz dans l'atmosphère.

Concernant le CH₄ entérique, des travaux ont montré qu'une réduction des émissions par animal était possible par l'alimentation (augmentation de la part des aliments concentrés, substitution d'une partie de l'apport de glucides par des lipides), mais ces modifications génèrent des émissions pour la production de ces ressources. L'ajout d'additifs inhibiteurs de la production de CH₄ est également une voie explorée (par exemple le 3-nitrooxypropanol ou 3-NOP), mais ces solutions posent des problèmes de modalités de distribution, de coût et d'acceptabilité. Des recherches sur

ces sujets se poursuivent cependant. À plus long terme, une voie de réduction des émissions par unité de produit (litre de lait ou kilogramme de viande) est d'améliorer les performances des animaux (progrès génétique) et des systèmes d'élevage (réduction du nombre d'animaux improductifs, meilleure santé, etc.).

Concernant le CH₄ produit lors du stockage des effluents, la voie d'atténuation la plus prometteuse est de développer la méthanisation. L'idée est de piloter le processus de fermentation anaérobique des effluents, de récupérer le CH₄ produit et d'en faire une valorisation énergétique par cogénération (production d'électricité et de chaleur) ou, après filtration, par injection dans le réseau de gaz. Outre la réduction des émissions de CH₄ vers l'atmosphère, ce procédé contribue à la production d'énergie renouvelable et à l'atténuation des émissions de CO₂ par substitution à du gaz fossile (voir plus loin la section « La production d'énergie renouvelable et les effets de substitution », p. 348).

Enfin, un levier majeur de réduction des émissions de CH₄ souvent évoqué est de réduire le nombre d'animaux, avec une baisse conjointe de la part des produits animaux dans notre alimentation. Ce levier a des limites, compte tenu de l'importance économique au regard des emplois dans les filières animales, en particulier dans certaines régions, et des nombreux services rendus par la présence d'animaux d'élevage dans les territoires (maintien des prairies et de la biodiversité hébergée, fournitures d'engrais organiques, etc.). Il sera évoqué à nouveau dans la section consacrée à l'alimentation (p. 350).

Les émissions de N₂O

Les ions NO₃⁻ et NH₄⁺ étant les substrats des réactions de nitrification et de dénitrification à l'origine des émissions de N₂O, une variable de premier ordre dont dépendent les émissions cumulées d'un sol sur une année est la quantité d'azote apportée sous forme d'engrais minéral et organique. Au niveau international, les émissions de N₂O liées au secteur agricole sont ainsi calculées en utilisant des facteurs d'émissions (0,016 kg de N-N₂O émis par kilogramme d'azote total épandu pour un engrais minéral et 0,010 kg de N-N₂O par kilogramme d'azote total épandu pour un engrais organique, d'après l'IPCC [2019]). Un levier majeur de réduction des émissions de N₂O est donc de limiter l'usage des engrains azotés de synthèse. Cet objectif a été travaillé de longue date par les agronomes, car l'utilisation en excès d'engrais azotés a des impacts négatifs sur plusieurs compartiments de l'environnement et sur la santé (potabilité de l'eau, qualité des milieux aquatiques, qualité de l'air, émission de gaz à effet de serre). Des progrès ont été faits, notamment grâce au développement de la fertilisation raisonnée basée sur le calcul du bilan prévisionnel, et ont conduit à une stabilisation de l'usage des engrains azotés depuis les années 1990, voire à une légère baisse. Un calcul réalisé à l'échelle de la France entière révèle cependant un excédent de bilan de l'ordre de 30 kg d'azote par hectare et par an, ce qui suggère qu'une marge de progrès subsiste (CGDD, 2013). Un autre levier majeur de réduction de l'usage des engrains azotés de synthèse connu de longue date est d'accroître la part des légumineuses dans les rotations, puisque ces espèces (comme le pois, la luzerne, le soja, etc.) hébergent dans leurs racines une bactérie (du genre *Rhizobium*) capable de fixer le N₂ de l'air et n'ont donc pas besoin d'apport d'engrais azoté. Plusieurs freins limitent la mise en œuvre de ce levier (débouchés insuffisants, concurrence du soja importé, marges insuffisantes, instabilité des rendements, sensibilité au manque d'eau et aux maladies, etc.), mais là aussi des marges de progrès existent. Une étude conduite par l'Inra (Pellerin *et al.*,

2015 et 2017) a montré qu'en combinant plusieurs leviers relatifs à la gestion de l'azote (ajustement des apports d'engrais à des objectifs de rendement plus réalistes, meilleure prise en compte des apports d'azote liés aux déjections animales, ajustement des dates d'apport au calendrier des besoins des cultures, enfouissement pour limiter les pertes par volatilisation, utilisation d'inhibiteurs de nitrification, accroissement de la part des légumineuses dans les rotations de grande culture et les prairies) il était possible de réduire les émissions directes et indirectes de N_2O de 8,2 MtCO₂e par an, représentant 26% du potentiel total d'atténuation en agriculture. Outre la réduction des émissions de N_2O , l'adoption de ces leviers donnerait lieu à plusieurs cobénéfices en matière de qualité de l'eau et de l'air, et à une réduction des coûts pour l'agriculteur. Leur mise en œuvre effective se heurte cependant à de nombreux freins, parmi lesquels l'aversion au risque, du fait de la forte sensibilité des rendements agricoles à la disponibilité en azote.

► La séquestration de carbone dans des compartiments à temps de résidence long (sol et biomasse ligneuse)

L'agriculture peut contribuer à l'atténuation du changement climatique par un usage des sols et par le choix de pratiques culturales favorisant la séquestration de carbone dans des compartiments à temps de résidence long (sol et biomasse ligneuse). À l'échelle planétaire, l'horizon de surface des sols (0-30 cm) contient environ 830 Gt de carbone sous forme de matières organiques, ce qui fait qu'une augmentation de 4 pour mille par an de ce stock ($0,004 \times 830 = 3,2$ Gt de carbone), associée à un arrêt de la déforestation (1,5 Gt de carbone par an), compenserait l'augmentation annuelle du stock de CO₂ dans l'atmosphère (+ 4,7 Gt de carbone par an) (Friedlingstein *et al.*, 2019). Ce calcul, très théorique, a été à l'origine de l'initiative internationale « 4 pour 1 000, les sols pour la sécurité alimentaire et le climat⁵⁴ ». Ce projet a cependant donné lieu à des controverses, car le stockage additionnel de carbone dans les sols est un processus limité dans le temps (l'adoption de pratiques plus « stockantes » conduit à une augmentation du stock jusqu'à un nouvel équilibre après lequel le stock n'augmente plus), réversible (l'abandon des pratiques stockantes conduit à une rediminution du stock et à une réémission de CO₂ vers l'atmosphère) et à faible rendement (seule une fraction minoritaire du carbone entrant dans le sol est stabilisée par des interactions organominérales, le reste étant rapidement émis sous forme de CO₂ vers l'atmosphère par minéralisation). Augmenter le stock suppose généralement d'augmenter les entrées de carbone dans le sol sous forme de matières organiques (résidus de culture, effluents d'élevage, composts, etc.) dont la disponibilité est limitée et inégalement répartie. L'objectif d'augmentation du stock de carbone organique des sols par augmentation des entrées pose assez vite la question des compétitions d'usage de la biomasse, car celle-ci peut aussi être orientée vers d'autres utilisations, également vertueuses en matière d'atténuation du changement climatique (production de biogaz par méthanisation par exemple, voir section suivante). Au-delà de l'enjeu d'atténuation du changement climatique, le rôle positif du carbone organique sur les propriétés et sur la fertilité des sols doit aussi être considéré (augmentation de la stabilité structurale, de la capacité du sol à stocker l'eau, de la capacité d'échange cationique, etc.).

54. <https://4p1000.org/>

Malgré les questions soulevées, l'intérêt de l'initiative « 4 pour 1 000 » a été de mettre en lumière le rôle des sols dans le cycle global du carbone et dans l'effet de serre, et d'entreprendre un grand nombre de travaux visant à évaluer le potentiel de stockage additionnel dans les sols. En France métropolitaine, une estimation de ce potentiel faite par INRAE a montré que l'adoption de pratiques « stockantes », là où elles pourraient être mises en œuvre, permettrait un stockage additionnel dans les sols et dans la biomasse ligneuse de 36,2 MtCO₂e à 52,9 MtCO₂e par an, pour deux hypothèses de rémunération du carbone stocké (55 € et 250 € par tonne de CO₂), ce qui compenserait entre 9 % et 13 % des émissions nationales (Bamière *et al.*, 2023). Les pratiques ayant le plus fort potentiel sont l'expansion de l'agroforesterie et des haies, la généralisation des cultures intermédiaires et le remplacement d'une partie de la sole de maïs ensilage par des prairies temporaires. Contrairement à une idée répandue, l'abandon du travail du sol n'apparaît pas comme un levier majeur d'augmentation du stock de carbone dans le sol dès lors que l'on considère son effet sur toute la profondeur du profil. Ce constat ne remet pas en cause l'intérêt du non-travail du sol vis-à-vis d'autres enjeux (préservation de la biodiversité tellurique, réduction de la consommation d'énergie fossile). Le potentiel d'augmentation du stock apparaît particulièrement élevé en zones de grande culture, du fait de l'évolution des pratiques au cours des dernières décennies qui ont conduit à une diminution des stocks (Pellerin *et al.*, 2021). L'augmentation des teneurs en carbone aurait aussi comme cobénéfice d'améliorer les propriétés des sols dans ces régions. À noter cependant que les simulations réalisées ont montré que, même en adoptant des pratiques favorables au stockage, notamment la généralisation des cultures intermédiaires, les systèmes de grande culture, avec les pratiques de fertilisation azotée actuelles, resteraient des émetteurs nets de gaz à effet de serre, car le stockage additionnel de carbone ne suffirait pas à compenser les émissions de N₂O (Launay *et al.*, 2021). Ce résultat montre que, pour tendre vers des systèmes de grande culture neutres en carbone, l'adoption de pratiques favorables au stockage de carbone doit aller de pair avec un effort de réduction de l'usage des engrains azotés. À l'inverse, le potentiel d'augmentation du stock est faible en prairie permanente où l'enjeu est plutôt de préserver le stock existant déjà élevé, en particulier en évitant le retournement, plutôt que de l'augmenter encore.

La Stratégie nationale bas-carbone française (SNBC) vise la neutralité carbone en 2050, avec des émissions résiduelles, incompressibles, de l'ordre de 80 MtCO₂e par an, à compenser par un puits de carbone national du même ordre de grandeur (SNBC, 2020). Les chiffres évoqués ci-dessus concernant le potentiel de stockage additionnel dans les sols et dans la biomasse ligneuse en sols agricoles suggèrent que l'agriculture, moyennant l'adoption de pratiques plus stockantes, pourrait fournir de 45 % à 66 % de ce puits, le reste étant à fournir par la forêt ou, à la marge, par des procédés industriels d'extraction du CO₂ de l'atmosphère.

► La production d'énergie renouvelable et les effets de substitution

L'agriculture peut aussi contribuer à la réduction des émissions de CO₂ en produisant de la biomasse utilisée comme source d'énergie (bois hors forêt, biogaz) avec un effet de substitution aux énergies fossiles. L'intérêt de ces énergies est que le CO₂ émis lors de leur utilisation par combustion a été préalablement prélevé par les plantes dans

l'atmosphère, ce qui fait que la production d'énergie est neutre en carbone à l'échelle de temps humaine, contrairement au cas des énergies fossiles. L'idée, un temps mise en avant, de cultures réservées à la production d'énergie (comme le miscanthus) est aujourd'hui beaucoup moins promue, car elle pose la question de la compétition pour l'usage des terres entre la production d'énergie et la production alimentaire. La valorisation énergétique de sous-produits, non utilisables en alimentation humaine et ne nécessitant pas de surfaces dédiées n'est pas redévable de cette objection. La production de biogaz par digestion anaérobique d'effluents d'élevage, de résidus de culture ou de cultures intermédiaires récoltées est ainsi un moyen de réduire les émissions de CO₂ par substitution à du gaz fossile. D'après une estimation récente, le potentiel de production en France serait de l'ordre de 110 TWh par an, représentant 20 % de la consommation de gaz, avec une atténuation correspondante de 17,1 MtCO₂e par an, soit une baisse de 4,1 % des émissions nationales (Malet *et al.*, 2023). Un inconvénient souvent évoqué est que la méthanisation réduit le retour de carbone au sol, car la quantité de carbone contenue dans les digestats issus de la méthanisation et épandus au sol est moindre que celle contenue dans les effluents d'élevage et autres ressources qui, en l'absence de méthanisation, retournaient au sol. Un calcul du bilan en gaz à effet de serre de deux voies de valorisation de la biomasse (retour au sol ou méthanisation) confirme cependant l'intérêt de la méthanisation en matière d'atténuation du changement climatique, du fait du poids de l'effet de substitution (Malet *et al.*, 2024). Ce résultat est notamment lié au fait que le stockage additionnel de carbone est fini dans le temps, alors que l'effet de substitution se répète chaque année. Le choix d'une option de valorisation des biomasses disponibles (méthanisation ou retour au sol) doit cependant tenir compte d'éventuels enjeux agronomiques qui peuvent, dans certaines situations, rendre préférable l'option de retour au sol. En France, le nombre de sites de méthanisation est passé de moins de cent dans les années 2010 à 1 400 aujourd'hui, avec une tendance au développement de cultures intermédiaires destinées, et parfois intensifiées, à la production d'énergie (cultures intermédiaires à vocation énergétique).

► Transition agroécologique et émissions de gaz à effet de serre

Les impacts négatifs du modèle agricole dit conventionnel sur l'utilisation de ressources, sur l'environnement et sur la santé humaine ont conduit les pouvoirs publics à engager l'agriculture dans une transition agroécologique. L'objectif est de réduire l'usage des intrants chimiques (produits phytosanitaires, engrains minéraux), en valorisant davantage la diversité et les régulations biologiques et en favorisant le recyclage des produits organiques. L'adaptation au changement climatique et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre sont souvent présentées comme des cobénéfices de cette transition. La réduction de l'usage des engrains minéraux, notamment azotés, voire leur bannissement (cas de l'agriculture biologique), compensée par une présence accrue de légumineuses fixatrices d'azote, et l'utilisation d'engrais organiques (effluents d'élevage) vont dans le sens d'une atténuation des émissions de gaz à effet de serre (N₂O et CO₂, voir ci-dessus la section « Les leviers de réduction des émissions directes et indirectes de CH₄ et de N₂O », p. 345). Le recours préférentiel aux engrains organiques, plutôt qu'aux engrains minéraux, pose cependant la question de la place de l'élevage, fortement émetteur de CH₄. La spécialisation des exploitations et des régions agricoles freine considérablement les possibilités de valorisation des effluents d'élevage comme engrains organiques en remplacement des engrains minéraux.

Un scénario de transition agroécologique doit donc s'accompagner d'une réassocation de l'agriculture et de l'élevage. Des simulations faites à l'échelle mondiale d'un scénario généralisant l'agriculture biologique montrent que la production alimentaire serait limitée par la disponibilité en azote (− 34 %), avec un risque associé de diminution des stocks de carbone dans les sols, du fait d'une réduction des retours au sol et, par le jeu des marchés, d'une stimulation de la déforestation (Barbiéri *et al.*, 2021; Gaudaré *et al.*, 2023). Malgré ces risques, qui doivent être considérés et évalués, la plupart des études sur le sujet montrent que la transition agroécologique des systèmes agricoles est compatible avec l'objectif d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, mais qu'elle doit s'accompagner de transitions concomitantes dans l'ensemble du secteur agroalimentaire, réduisant la demande et la pression sur l'usage des terres et des ressources (réduction des pertes et des gaspillages, végétalisation de l'alimentation, réassocation de l'agriculture et de l'élevage).

► Le lien à l'alimentation

L'empreinte carbone de l'alimentation des Français représente 140 MtCO₂e, soit 2,1 tCO₂e par habitant, soit 22 % de leur empreinte carbone totale (HCC, 2024). Ce calcul intègre non seulement les émissions de l'agriculture évoquées ci-dessus, mais aussi les émissions en amont et en aval liées aux intrants utilisés et aux processus de collecte, de transformation et de distribution, ainsi que les émissions liées aux importations, lesquelles représentent 46 % de l'empreinte carbone liée à l'alimentation. Les produits fortement importés sont les fruits et les légumes ainsi que les viandes de porc et de volaille. La part des émissions importées a augmenté, passant de 42 % de l'empreinte de l'alimentation en 2010, soit 61 MtCO₂e, à 46 % en 2018, soit 63 MtCO₂e (HCC, 2024). En décomposant l'empreinte carbone de l'alimentation par sous-secteurs, le premier poste d'émissions est celui de l'agriculture (84 MtCO₂e, soit 60 %), le second est constitué par les industries agroalimentaires qui réalisent la transformation des produits (25 MtCO₂e, soit 18 %), suivis du commerce et de la restauration hors domicile (17 MtCO₂e, soit 12 %) (figure 14.5). Les produits

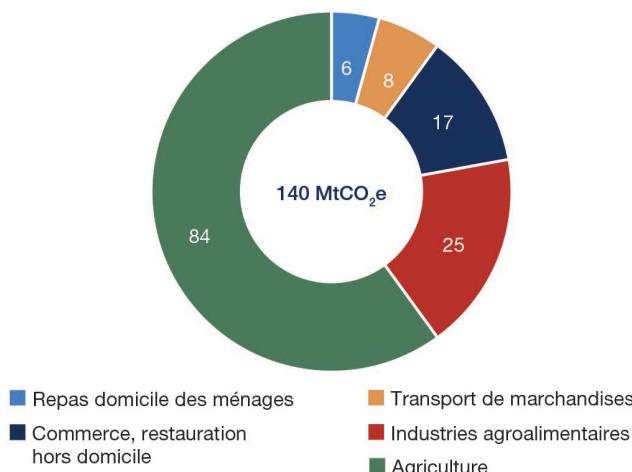


Figure 14.5. Empreinte carbone de l'alimentation des Français. Source : d'après le Haut Conseil pour le climat (2024).

d'origine animale sont responsables de la majorité de l'empreinte carbone alimentaire (51 %), suivis des boissons (15 %). Le poids des produits animaux dans l'empreinte carbone de notre alimentation est confirmé par la plupart des études scientifiques (Xu *et al.*, 2021). La réduction de la part des produits animaux, en particulier de la viande bovine, associée à une augmentation de la part des protéines d'origine végétale, apparaît ainsi comme un levier majeur de réduction de l'empreinte carbone liée à notre alimentation (Poux et Aubert, 2018).

► Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que des leviers existent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture, en particulier par le biais d'une meilleure maîtrise du cycle de l'azote. La méthanisation permet à la fois de réduire les émissions de CH₄ vers l'atmosphère, tout en produisant une énergie renouvelable (biogaz) qui permet de réduire les émissions du secteur de l'énergie par substitution aux énergies fossiles. Enfin, des pratiques peuvent être mises en œuvre pour accroître les stocks de carbone dans des compartiments à temps de résidence long, comme les sols et la biomasse ligneuse, soustrayant ainsi du CO₂ de l'atmosphère. Compte tenu du poids de l'alimentation dans l'empreinte carbone des Français (22 %), incluant l'amont et l'aval de l'agriculture ainsi que les importations, les leviers activables du côté de l'offre par les pratiques agricoles doivent être accompagnés d'un effort du côté de la demande, en particulier par une évolution de nos habitudes alimentaires. Le Haut Conseil pour le climat (HCC) considère qu'une réduction de 50 % des émissions du secteur est possible, si elle est accompagnée d'une réduction de 30 % de la part des produits animaux dans notre alimentation.

► Références

- Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadœuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z. *et al.*, 2018. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth, *Nature*, 559, 599-604, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>.
- Bamière L., Bellassen V., Angers D., Cardinael R., Ceschia É., Chenu C. *et al.*, 2023. A marginal abatement cost curve for climate change mitigation by additional carbon storage in French agricultural land, *Journal of Cleaner Production*, 383, 135423, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135423>.
- Barbieri P., Pellerin S., Smith L., Ramankutty N., Seufert V., Nesme T., 2021. Global option space of organic agriculture is delimited by nitrogen availability, *Nature Food*, 2, 363-372, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>.
- Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S., 2020. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil, *Biogeosciences*, 17, 5223-5242, <https://doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020>.
- CGDD, Commissariat général au développement durable, 2013. Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010, *Chiffres & statistiques*, 448.
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P. *et al.*, 2019. Global Carbon Budget 2019, *Earth System Science Data*, 11, 1783-1838, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Gaudaré U., Kuhnert M., Smith P., Martin M., Barbieri P., Pellerin S. *et al.*, 2023. Soil organic carbon stocks potentially at risk of decline in organically farmed croplands, *Nature Climate Change*, 13, 719-725, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01721-5>.
- GIS Sol, 2017. Carte nationale des stocks de carbone des sols de France. IGCS-RMQS, INRAE, www.gissol.fr/thematiques/matières-organiques-des-sols-42.

HCC, Haut Conseil pour le climat, 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste, rapport thématique, 167 p.

Hénault C., 2004. Les étapes dans le sol des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote : Incidences environnementales des activités anthropiques, Habilitation à diriger des recherches, école doctorale Buffon, université de Bourgogne, 68 p.

IPCC, 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Calvo Buendia E. et al. (Eds), IPCC, Suisse.

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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

Launay C., Constantin J., Chlebowski F., Houot S., Graux A.I., Klumpp K. et al., 2021. Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling, *Global Change Biology*, 27, 1645-1661, <https://doi.org/10.1111/gcb.15512>.

Malet N., Pellerin S., Nesme T., 2023. Agricultural biomethane production in France: a spatially explicit estimate, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113603, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113603>.

Malet N., Pellerin S., Nesme T., 2024. Large-scale development of biogas production in France: improved climate benefits over the long term compared to biomass burial, *under review*.

Pellerin S., Bamière L., Pardon L. (Coords), 2015. *Agriculture et gaz à effet de serre. Dix actions pour réduire les émissions*, Versailles, éditions Quæ, 200 p.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.P. et al., 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture, *Environmental Science & Policy*, 77, 130-139, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.003>.

Pellerin S., Bamière L., Savini I., Réchachère O. (Coords), 2021. *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 2050 et à quel coût ?*, Versailles, éditions Quæ, 232 p.

Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J. et al., 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach, *Global Change Biology*, 17(7), 2415-2427, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>.

Poux X., Aubert P.M., 2018. *Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. Enseignements d'une modélisation du système alimentaire européen*, étude n° 9/18, IDDRI, SciencesPo, 77 p.

SNBC, Stratégie nationale bas-carbone, 2020. *La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, ministère de la Transition écologique et solidaire, 192 p.

Xu X., Sharma P., Shu S., Lin T., CiaisP., TubielloF. et al., 2021. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods, *Nature Food*, 2, 724-732, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>.

Chapitre 15

Relations entre atténuation et adaptation au changement climatique en agriculture : favoriser les synergies, éviter les antagonismes

Thierry Caquet

L'adaptation au changement climatique et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) ont été identifiées toutes deux comme nécessaires dès la rédaction de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1992. Toutefois, jusqu'à la 21^e Conférence des parties pour le climat (COP21) de Paris en 2015, les actions internationales en faveur du climat ont pour l'essentiel concerné l'atténuation. Évoquer la problématique de l'adaptation était d'ailleurs même parfois considéré comme un aveu d'échec des stratégies d'atténuation (Tol, 2005). Observant qu'atténuation et adaptation étaient abordées séparément, certains auteurs sont allés jusqu'à parler de dichotomie, en raison de différences dans la manière dont les connaissances sont produites, dont les politiques publiques correspondantes sont définies et mises en œuvre, ou bien encore dont les divers réseaux d'acteurs sont mobilisés (Biesbroek *et al.*, 2009).

Il est toutefois largement reconnu aujourd'hui, notamment dans les rapports du Giec, que l'adaptation et l'atténuation sont liées et qu'elles sont indissociables (Nabuurs *et al.*, 2022; Schipper *et al.*, 2022). Les impacts du changement climatique en cours étant de plus en plus sensibles, qu'il s'agisse d'événements extrêmes (sécheresse, inondations, etc.) ou d'évolutions tendancielles (hausse des températures moyennes), le caractère incontournable de l'adaptation s'est imposé, en particulier dans le cas de l'agriculture. Étant donné que la réduction des émissions de GES anthropiques est très difficile à mettre en œuvre et du temps de réponse du système climatique, l'adaptation doit s'envisager dans une perspective dynamique et de long terme dans un climat qui va continuer de changer. À long terme, l'amplitude des efforts à faire en matière d'adaptation dépendra des résultats obtenus en matière d'atténuation des émissions de GES dans l'ensemble des secteurs de l'économie au niveau mondial.

La question des interactions positives ou négatives entre atténuation et adaptation demeure un sujet débattu. La notion de compromis dans le domaine de l'action climatique a été définie par Klein *et al.* (2007) comme « l'équilibre entre adaptation et atténuation lorsqu'il n'est pas possible de réaliser les deux activités pleinement en même temps ». Des compromis peuvent se produire dans l'allocation de ressources

par exemple financières, entre les activités, les connaissances ou l'intérêt de participer à une activité et d'accorder moins d'attention à une autre (Wiréhn *et al.*, 2020). À l'extrême, une démarche dans l'une des stratégies peut s'avérer totalement contre-productive (antagoniste) du point de vue de l'autre stratégie. Ce point est particulièrement critique dans l'analyse des programmes de développement à destination des pays du Sud. En effet, adaptation, atténuation et développement présentent des chevauchements substantiels. Pour accroître l'efficacité des stratégies déployées, il est de ce fait tentant de rechercher des complémentarités, voire des synergies, et de tenter de limiter, voire de supprimer les compromis et les antagonismes pour aboutir à des stratégies « triplement gagnantes » (*triple wins* ou *win-win-win*; Duguma *et al.*, 2014; Suckall *et al.*, 2015). Un corpus croissant de publications souligne que si cette vision est utile, elle peine à réellement prendre en compte certaines dimensions des problématiques, notamment sociales, et que, de ce fait, son pouvoir transformant est souvent faible (Ellis et Tschakert, 2019).

Dans ce chapitre, nous rappelons les similitudes et les différences entre atténuation et adaptation. Nous résumons ensuite les connaissances disponibles sur leurs interactions dans le domaine de l'agriculture avant de présenter deux démarches intégrées relevant respectivement de l'agroécologie et de l'agriculture intelligente face au climat. Enfin, après avoir évoqué la problématique de la maladaptation, nous examinons comment la question de la conciliation des stratégies d'atténuation et d'adaptation dans le domaine de l'agriculture doit s'envisager dans le cadre plus général de l'évolution des systèmes alimentaires.

► Une complémentarité nécessaire... mais pas systématique

Les similitudes et les différences entre adaptation et atténuation ont été largement discutées. Variables d'un secteur d'activité à un autre, les principales différences portent sur des questions d'échelles spatiales et temporelles de mise en œuvre et d'effets (Kongsager, 2018) (tableau 15.1). Ainsi, il a été suggéré que l'adaptation se déployait à un niveau local, tandis que l'atténuation était par essence une démarche plus globale portée par les gouvernements et par les accords internationaux (Biesbroek *et al.*, 2009). Or, des actions d'adaptation en agriculture sont susceptibles d'avoir des conséquences

Tableau 15.1. Comparaison des propriétés théoriques des actions d'adaptation et d'atténuation. Source : tableau adapté de Füssel (2007).

	Adaptation	Atténuation
Bénéficiaires et motivations	Acteurs localisés, intérêt personnel	Ensemble du globe, altruisme
Échelle spatiale des effets	Locale à régionale	Globale
Échelle de temps des effets	Court terme (immédiat à quelques années)	Long terme (siècles)
Durée des retombées	Immédiat à plusieurs décennies	Plusieurs décennies
Efficacité	Souvent incertaine	Certaine
Avantages connexes	Souvent	Parfois
Bénéfices locaux	Presque en intégralité	Faibles
Suivi	Difficile	Assez facile

globales, par exemple si des variétés tolérantes aux extrêmes climatiques étaient cultivées massivement à l'échelle mondiale. Inversement, le déploiement à large échelle de la production de biocarburants pour décarboner les ressources énergétiques pourrait avoir des effets sur l'adaptation de l'agriculture à l'échelle locale par le biais du choix des espèces cultivées, induisant une concurrence accrue dans l'usage des terres ou des ressources en eau par exemple (Moser, 2012). D'autres analyses montrent que si des actions d'adaptation et d'atténuation sont mises en œuvre à une même échelle, les échelles auxquelles leurs bénéfices peuvent être identifiés sont souvent différentes (Schreurs, 2008; Berry *et al.*, 2015).

Une autre différence entre atténuation et adaptation est la manière dont leurs coûts et leurs avantages peuvent être déterminés, comparés et agrégés. Bien que diverses, les options d'atténuation servent toutes à réduire les émissions de GES et, compte tenu des avantages qu'elles présentent à l'échelle mondiale, il importe finalement assez peu de savoir où elles sont déployées. Plusieurs options d'atténuation peuvent être comparées du fait de l'utilisation d'une unité commune, les équivalents CO₂. Si les coûts de mise en œuvre sont connus, la rentabilité de différentes options peut être déterminée et comparée.

Les bénéfices de l'adaptation sont plus difficiles à exprimer avec une métrique unique, ce qui empêche les comparaisons entre les options d'adaptation. De plus, contrairement aux mesures d'atténuation, les actions en faveur de l'adaptation ne sont pas nécessairement orientées vers une fin unique. En raison de la nature locale ou régionale de l'adaptation, ses avantages seront évalués différemment en fonction des contextes sociaux, économiques et politiques.

Les voies suivies par les individus ou par les groupes peuvent impliquer une évolution des systèmes de connaissances ou de valeurs, de comportement, d'organisation ou de technologie. Les réponses adaptatives, souvent réactives et opportunistes au départ, sont rarement planifiées et peuvent ne pas être cohérentes avec les stratégies d'atténuation. Cela peut conduire à une déconnexion des stratégies où, par exemple, des politiques d'atténuation à un niveau ne parviennent pas à se connecter ou à entrer en synergie avec les processus d'adaptation à un autre niveau. Les stratégies d'atténuation peuvent aussi parfois aller à l'encontre de processus d'adaptation qui fonctionnent à d'autres niveaux et à d'autres échelles (Thornton et Comberti, 2017). L'atteinte d'une complémentarité, voire d'une synergie, entre atténuation et adaptation implique d'identifier et de traiter cette déconnexion dans une approche systémique.

Les premières études sur les liens entre adaptation et atténuation en agriculture ont exploré les combinaisons optimales d'adaptation et d'atténuation (Locatelli *et al.*, 2015). Toutefois, à mesure que l'adaptation recevait une attention croissante, il est apparu qu'il pouvait exister des interactions variées et complexes entre adaptation et atténuation, avec parfois des complémentarités, voire des synergies qui se produisent lorsque l'effet global de la combinaison de deux stratégies est supérieur à la somme des effets de chacune d'entre elles si elles étaient mises en œuvre séparément (Klein *et al.*, 2007; Locatelli *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2018).

Parallèlement, d'autres études ont mis en évidence l'existence de compromis (*trade-offs*), voire d'antagonismes (voir par exemple Wilbanks *et al.*, 2007; van Vuuren *et al.*, 2011; Berry *et al.*, 2015). L'un des exemples les plus cités dans le domaine de l'agriculture est celui du développement de cultures pour la production de biocarburants

qui présentent un intérêt pour la décarbonation de l'énergie, et donc pour l'atténuation, mais qui peut se traduire par une concurrence avec les cultures alimentaires pour les terres, par une diminution de la sécurité alimentaire, par une concurrence accrue pour les ressources en eau et, pour finir, par des systèmes agricoles plus vulnérables au changement climatique (Bustamante *et al.*, 2014).

Des solutions gagnant-gagnant permettant de traiter simultanément l'adaptation et l'atténuation sont parfois trouvées au niveau local, notamment grâce à des approches intégrées telles que l'agriculture intelligente face au climat (Lipper *et al.*, 2014) (voir plus loin la section « L'agriculture intelligente face au climat », p. 358).

Enfin, il convient de garder à l'esprit que les compromis et les antagonismes entre options existent aussi au sein même des stratégies d'atténuation ou d'adaptation, avec notamment le risque de maladaptation (voir plus loin la section « Un enjeu : éviter la maladaptation et ses conséquences », p. 360).

► Interactions entre atténuation et adaptation en agriculture

Même si quelques données existent, les informations quantitatives sur les interactions entre adaptation et atténuation dans le domaine de l'agriculture sont encore peu nombreuses ou mal connues, ce qui souligne l'importance de la réalisation d'études complémentaires et de la mise à disposition des données correspondantes (van Wijk *et al.*, 2020 ; Barbieri *et al.*, 2024).

Il existe des liens positifs entre certaines options d'atténuation et l'adaptation des activités agricoles au changement climatique (tableau 15.2), par exemple les pratiques qui permettent d'augmenter la teneur en carbone des sols, la gestion durable des résidus de culture, le développement de l'agroforesterie, l'utilisation de plantes de couverture, le sylvopastoralisme, etc. (Smith et Olesen, 2010 ; Debaeke *et al.*, 2017 ; Mbow *et al.*, 2019 ; Tschora et Cherubini, 2020). Certaines options d'adaptation en revanche n'ont pas d'effets sur l'atténuation, comme l'ajustement des dates de semis ou la gestion intégrée des bioagresseurs.

Un exemple de compromis entre adaptation et atténuation a été observé en Afrique dans le cas de l'intensification de l'élevage dans de petites exploitations, où des réductions d'émissions permises par le passage à des races améliorées de bétail à haut rendement ont été associées à une moins bonne adaptation et à un risque accru pour la production, en raison de la moindre résilience de ces races aux conditions climatiques variables et extrêmes ainsi qu'aux maladies (Paul *et al.*, 2019).

Certaines options favorables à l'atténuation peuvent parfois avoir des conséquences négatives sur l'adaptation. Par exemple, la mise en place de cultures intermédiaires qui, tout en réduisant les fuites de nutriments et en ajoutant du carbone aux sols, consomment aussi de l'eau. Dans les situations de ressources en eau limitantes, cette consommation peut réduire la quantité d'eau disponible pour les cultures alimentaires qui suivent, avec un impact négatif sur les rendements de ces dernières (Launay *et al.*, 2022).

De même, la mobilisation accrue des résidus de cultures pour la production de bioénergie favorable à la décarbonation de l'énergie peut avoir des effets négatifs sur la teneur en carbone, sur la fertilité et sur la structure du sol, effets potentiellement aggravés par l'augmentation des températures qui provoque une accélération du

turnover du carbone là où l'humidité du sol est suffisante (Karan et Hamelin, 2021). Cela pourrait limiter fortement les possibilités de développement des énergies renouvelables basées sur la mobilisation des résidus de cultures, alors que cette ressource est l'objet d'attention croissante de la part des producteurs de bioénergie.

Tableau 15.2. Exemples d'options mobilisables pour l'atténuation et pour l'adaptation des systèmes agricoles (potentiel d'interaction : 0, aucun ; +, limité ; ++, élevé ; +++, très élevé). Source : tableau adapté de Mbow *et al.* (2019).

Option	Atténuation	Adaptation
Augmentation de la teneur en matière organique des sols	+++	++
Changement de variétés	+	+++
Gestion de l'eau améliorée	+	+++
Ajustement des dates de semis	0	+++
Fertilisation de précision	++	++
Gestion intégrée des bioagresseurs	0	++
Production de contre-saison	0	++
Application de biochar	++	+++
Agroforesterie	++	+++
Diversification des cultures	+	+++
Modification des surfaces cultivées, agriculture pérenne	++	+++
Travail du sol et implantation des cultures	++	++
Gestion des résidus de récolte	+++	+++
Systèmes de polyculture-élevage	++	++
Systèmes sylvopastoraux	+++	+++
Nouvelles races de bétail	+	+
Engrasement du bétail	+	++
Passage à des espèces animales plus petites, plus résistantes	+	++
Stockages d'aliments et de fourrages	++	++
Inhibiteurs de la production de méthane	+++	0
Contrôle du stress thermique	+	+++
Supplémentation alimentaire saisonnière	++	+++
Amélioration de la santé animale et de la lutte contre les parasites	++	+++

► Des leviers individuels aux démarches intégrées

Avant que les problématiques climatiques deviennent prégnantes, divers modèles alternatifs d'agriculture ont émergé en réaction à l'intensification agricole, comme l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation. Plus récemment sont apparues l'agriculture régénératrice, l'agriculture écologiquement intensive ou bien encore l'agriculture intelligente face au climat (*climate-smart agriculture*). Chacune de ces formes d'agriculture revendique de constituer une alternative durable au modèle «intensif» et entretient des liens plus ou moins étroits avec les principes de l'agroécologie (Mauguin *et al.*, 2024).

Les démarches agroécologiques

Il n'y a pas de définition consensuelle de l'agroécologie, les définitions proposées reflétant les préoccupations et les priorités de leurs auteurs (HLPE, 2019). Des points communs émergent néanmoins : transdisciplinarité, démarches participatives, combinaison de dimensions scientifiques, sociales et relatives aux pratiques, réduction du recours aux intrants de synthèse et renforcement des régulations et des interactions biologiques positives (Caquet *et al.*, 2020; Mauguin *et al.*, 2024).

Au niveau des exploitations agricoles, la mise en œuvre des démarches agroécologiques repose sur la mobilisation de plusieurs leviers : (1) diversification (au niveau génétique, mais aussi spécifique) dans le temps et dans l'espace (de la parcelle au paysage); (2) amélioration de la santé des sols; (3) bouclage des cycles des nutriments; (4) amélioration de la biodiversité non cultivée, par exemple en créant des habitats pour les ennemis naturels des bioagresseurs; et (5) renforcement des interactions biologiques positives et des synergies entre composantes de la biodiversité (cultivée et non cultivée) afin de renforcer divers processus et services écologiques clés (biocontrôle, accès aux ressources, etc.) et de limiter le recours aux intrants de synthèse (engrais minéraux, pesticides).

Divers cadres conceptuels ont été proposés, qui associent aux leviers agronomiques évoqués précédemment d'autres dimensions, notamment sociales, économiques ou relatives à la gouvernance, avec l'ambition de dépasser le niveau de la production pour passer à celui des systèmes alimentaires dans leur ensemble (Gliessman, 2007; FAO, 2010a; HLPE, 2019; Atta-Krah *et al.*, 2022).

Compte tenu de sa nature transformatrice et de ses avantages potentiels en matière d'adaptation au climat et d'atténuation de ses effets, l'agroécologie est apparue dans le discours sur le changement climatique comme une voie potentielle vers des systèmes alimentaires plus résilients et plus durables (Bezner-Kerr *et al.*, 2022). Des études de cas ont effectivement mis en évidence que la mise en œuvre des leviers de l'agroécologie est favorable à la résilience des systèmes agricoles vis-à-vis des chocs induits par le changement climatique, en permettant de réduire leur sensibilité et leur vulnérabilité tout en augmentant leurs capacités d'adaptation, avec des cobénéfices pour l'atténuation du changement climatique par notamment le stockage de carbone dans les sols (Leippert *et al.*, 2020) (figure 15.1).

Toutefois, les données sont encore fragmentaires et le plus souvent limitées à l'échelle de l'exploitation, alors qu'une partie des propriétés émergentes associées au développement des pratiques agroécologiques se manifestent aussi à l'échelle du paysage (Leippert *et al.*, 2020; Bezner Kerr *et al.*, 2021). Il est important de poursuivre l'acquisition de données complémentaires afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'une idée préconçue et de mieux cerner les conditions de sa vérification en conditions réelles.

L'agriculture intelligente face au climat

À la fin des années 2000, la FAO a mis en avant le concept d'agriculture intelligente face au climat ou agriculture climato-intelligente (*climate-smart agriculture*, CSA) (FAO, 2010b) avec pour idée de base de favoriser les synergies entre adaptation et atténuation. Au-delà de la seule dimension agronomique, il s'agit de déployer des solutions souples et adaptées localement, qui mobilisent aussi des mécanismes

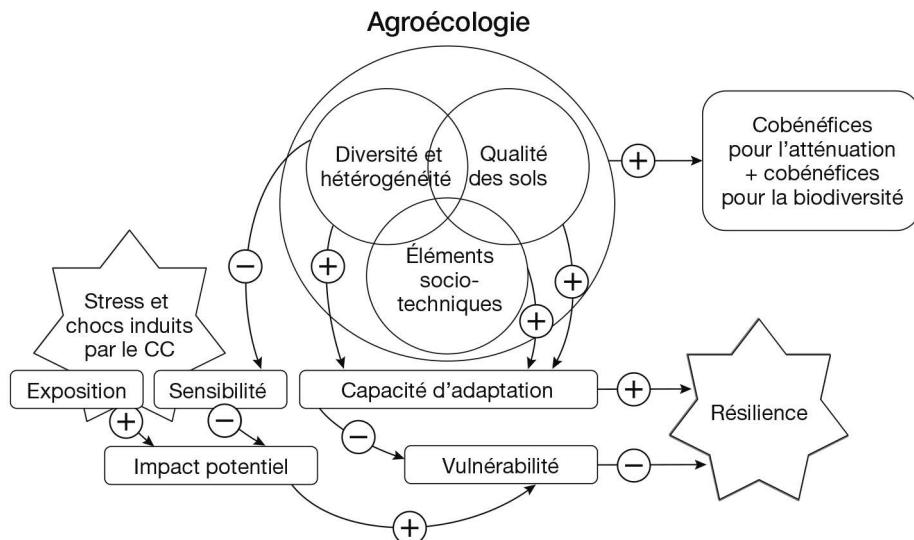


Figure 15.1. Relations entre pratiques agroécologiques, sensibilité et vulnérabilité aux stress induits par le changement climatique et résilience des systèmes agricoles. Source : figure adaptée de Leippert *et al.* (2020).

politiques et financiers innovants. Le cadre conceptuel correspondant comporte trois piliers : la sécurité alimentaire (accroissement durable de la productivité agricole et des revenus des agriculteurs); l'adaptation et la résilience des activités agricoles face au changement climatique; la contribution à l'atténuation (réduction des émissions, stockage de carbone).

De nombreuses options ont été identifiées comme pouvant contribuer à l'atteinte des objectifs de ces trois piliers, telles que le déploiement de variétés tolérantes à la sécheresse, la gestion intégrée de la fertilité des sols, les techniques de conservation de l'eau, l'amélioration de l'intégration de l'élevage dans les petites exploitations de polyculture-élevage ou bien encore la restauration des terres dans les parcours (FAO, 2018). Il convient toutefois de noter que ce qui constitue une pratique intelligente face au climat varie d'un endroit à l'autre. Cela dépend du contexte local, notamment des facteurs socio-économiques et environnementaux. Certains acteurs promeuvent aussi le recours à des technologies innovantes (robotique, capteurs connectés, fermes verticales, intelligence artificielle, etc.) en cohérence notamment avec les démarches de l'agriculture de précision (Konfo *et al.*, 2024).

Le retour d'expérience réalisé à partir de projets menés dans de nombreux pays a mis en évidence les effets positifs de la démarche, mais aussi certaines limites (Makate, 2019; Zhao *et al.*, 2023). En particulier, des questions subsistent quant à la priorité à accorder aux différentes mesures en fonction du contexte ou à la manière de mesurer les progrès accomplis dans l'atteinte des objectifs au fil du temps. C'est notamment sur le volet adaptation que les outils d'analyse semblent les moins performants (van Wijk *et al.*, 2020). L'absence de données de référence fiables permettant d'évaluer qualitativement et quantitativement les conséquences des pratiques est aussi une limite relevée dans la littérature.

De plus, alors que l'atteinte des objectifs devrait pouvoir faire l'objet d'un consensus, la démarche a rapidement été critiquée par certains acteurs de la société civile, mais aussi par des scientifiques pour son manque de définition précise et sur le fait qu'elle se focalise sur les objectifs et non sur les moyens de les atteindre, ce qui complique l'identification des pratiques agricoles qui sont à favoriser ou au contraire à proscrire. Pour certains acteurs, ce manque de clarté conceptuelle favoriserait sa mobilisation au profit d'intérêts industriels et agricoles à des fins qui s'éloignent des objectifs visés par le concept (Pimbert, 2015). Le fait que le secteur agro-industriel privé se soit rapidement engagé dans la promotion de cette démarche a contribué à construire cette représentation chez certains acteurs. La préconisation d'approches technologiques potentiellement intensives en capital contribue vraisemblablement à entretenir cette tension.

Elle a également été critiquée pour son manque de clarté quant aux interactions entre les trois objectifs, ce qui pourrait conduire à la mise en œuvre de projets privilégiant un objectif au détriment des autres (Neufeldt *et al.*, 2013; Saj *et al.*, 2017; Chandra *et al.*, 2018). Par ailleurs, les initiatives correspondantes se sont souvent concentrées sur l'exploitation agricole, ignorant notamment les apports possibles des échelles spatiales supérieures comme celle du paysage (Scherr *et al.*, 2012) ou d'autres services écosystémiques que la production (Neufeldt *et al.*, 2013). L'approche proposée favoriserait le maintien d'un statu quo qui englobe la plupart des attributs de l'agriculture conventionnelle, comme la dépendance aux intrants externes ou au système de marchés, ce qui conduirait à des situations de verrouillages sociotechniques des systèmes agricoles (Pimbert, 2015). Des propositions sont faites dans la littérature pour lever ces freins, en s'inspirant de la gestion des écosystèmes ou bien encore par une meilleure prise en compte des dimensions relatives à l'équité sociale et à la dimension humaine de la démarche (Makate, 2019; Akamani, 2021).

► Un enjeu : éviter la maladaptation et ses conséquences

Des stratégies d'adaptation mal conçues ou mises en œuvre de façon incorrecte peuvent conduire à des situations de maladaptation, où les mesures en faveur de l'adaptation ont des conséquences néfastes, tant dans le domaine de l'atténuation qu'en limitant les capacités futures d'adaptation (Juhola *et al.*, 2016) : augmentation des émissions de GES, augmentation de l'exposition et de la sensibilité aux impacts du changement climatique, renforcement de la vulnérabilité de certains groupes sociaux ou de certaines activités, réduction des possibilités d'adaptation à long terme. Dans certains cas, il est possible d'aboutir à des situations dans lesquelles les impacts peuvent être pires que si rien n'avait été entrepris.

La situation de maladaptation la plus fréquemment évoquée est celle de la vulnérabilité en rebond. Elle correspond à la situation d'un groupe humain ou d'une activité qui deviennent plus vulnérables au changement climatique qu'ils ne l'étaient initialement, après la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation. Une autre forme de maladaptation, parfois appelée déplacement de vulnérabilité, est observée lorsque le déploiement d'une stratégie d'adaptation pour un groupe humain ou une activité donnée entraîne une augmentation de la vulnérabilité pour un autre groupe ou une autre activité non concernés par la stratégie en question. Enfin, certaines actions d'adaptation peuvent augmenter les émissions de GES ou avoir un impact négatif sur

les conditions environnementales et les caractéristiques sociales et économiques des populations affectées. L'accent est mis, dans la littérature à ce sujet, sur les rétroactions négatives qui se produisent à différentes échelles, y compris à l'échelle mondiale, et qui sapent les conditions du développement durable.

Dans le domaine agricole, les situations de maladaptation sont surtout documentées en relation avec la gestion des ressources en eau. Des travaux en économie montrent par exemple que les démarches qui visent à accroître l'efficience d'utilisation de l'eau s'accompagnent souvent finalement d'une augmentation de la consommation (Benjamin et Giraldo-Hurtado, 2021), une situation illustrative de l'effet rebond, décrit dans un premier temps par Jevons dans l'énoncé du paradoxe qui porte son nom⁵⁵ (Sears *et al.*, 2018). À l'échelle d'un bassin-versant, la baisse des ressources en eau disponibles pour les activités agricoles en zone aval, du fait du développement intensif de l'irrigation dans la partie amont du bassin correspond à une situation de déplacement de vulnérabilité.

Des résultats empiriques montrent que les programmes publics de conservation de l'eau ont parfois conduit à une augmentation de l'usage de l'eau. Par exemple, l'utilisation d'une technologie d'irrigation plus efficace peut inciter les agriculteurs à privilégier des cultures avec des besoins en eau plus élevés ou à augmenter la surface irriguée (Pfeiffer et Lin, 2014) et, de ce fait, le volume d'eau utilisé (Li et Zhao, 2018). L'effet rebond peut être atténué, voire éliminé par la mise en place de régulations contraignantes telles que des quotas sur l'utilisation de l'eau ou une contrainte sur la surface cultivée (Berbel *et al.*, 2015).

Le plus souvent, les situations de maladaptation sont identifiées *ex post*, quand il est trop tard. L'un des enjeux majeurs est donc de pouvoir identifier les situations critiques en temps réel (Schipper, 2022). Cela implique de considérer les démarches d'adaptation du point de vue des processus sous-jacents plutôt que de se focaliser sur les résultats finaux attendus (Bertana *et al.*, 2022). Par exemple, l'accent mis sur les solutions technologiques relève souvent d'une compréhension étroite et à courte vue de l'adaptation, et le déploiement de solutions techniques qui manquent de flexibilité peut conduire à un verrouillage du système qui lui est à terme défavorable.

La compréhension d'erreurs passées peut permettre de ne pas les reproduire, mais, en dépit du retour d'expérience, il demeure difficile d'identifier avec certitude les options indésirables, susceptibles de conduire à une maladaptation. De plus, d'autres facteurs que le climat influencent l'efficacité des stratégies d'adaptation, par exemple les évolutions des marchés mondiaux des produits agricoles : si des agriculteurs décident de développer la culture d'espèces plus résistantes à la sécheresse, cela peut représenter un investissement important qui peut s'avérer gagnant à court terme pour la production, mais qui peut conduire à un échec économique à moyen et long terme du fait d'une demande insuffisante ou de la volatilité du marché.

55. Le paradoxe de Jevons, baptisé du nom de l'économiste W.S. Jevons qui l'a mis en évidence en 1865 en étudiant la consommation anglaise de charbon après que J. Watt a introduit sa machine à vapeur, énonce que, à mesure que les améliorations technologiques augmentent l'efficacité avec laquelle une ressource est employée, la consommation totale de cette ressource peut augmenter au lieu de diminuer.

► Conclusion

Les éléments présentés dans ce chapitre concernent pour l'essentiel la production agricole. Or, il est de plus en plus reconnu que l'alimentation des populations humaines sera affectée par le changement climatique au-delà des seuls aspects liés à la production. Il est de fait nécessaire d'étendre la vision à l'ensemble des systèmes alimentaires, lesquels rassemblent tous les éléments (environnement, personnes, intrants, processus, infrastructures, institutions, etc.) et toutes les activités liées à la préproduction, à la production, à la transformation, à la distribution, à la préparation et à la consommation de denrées alimentaires, ainsi que les résultats de ces activités, y compris les résultats socio-économiques et environnementaux. Un système alimentaire durable doit assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle pour tous sans compromettre les bases économiques, sociales et environnementales nécessaires pour assurer la sécurité alimentaire et une nutrition adéquate des générations futures.

Les systèmes alimentaires devront s'adapter à l'évolution du climat et également réduire leurs émissions de GES et séquestrer le carbone si l'on veut atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Élargir la vision à ce niveau est nécessaire, notamment pour (1) accroître le potentiel d'atténuation; (2) explorer les cobénéfices, les synergies ou les compromis en matière d'atténuation et d'adaptation; (3) identifier clairement les lacunes en matière de recherche; et (4) intégrer les options qui relèvent à la fois de la production agricole et d'autres dimensions (par exemple les choix alimentaires ou le gaspillage alimentaire) (Niles *et al.*, 2018).

Les synergies et les compromis entre les options d'atténuation et d'adaptation à l'échelle des systèmes alimentaires revêtent une importance croissante pour les communautés scientifiques et politiques en raison de la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire, c'est-à-dire de fournir des aliments nutritifs à des populations croissantes tout en répondant au changement climatique (Mbow *et al.*, 2019). Un défi particulier concerne les interactions entre le déploiement de stratégies d'atténuation basées sur les terres émergées, telles que les technologies à émissions négatives, et la sécurité alimentaire.

Tirado *et al.* (2013) ont proposé de réfléchir à des approches intégrées pour faire face aux effets du changement climatique sur la sécurité alimentaire, approche qui combinent des mesures d'adaptation et d'atténuation et qui intègrent la dimension nutritionnelle (*nutrition-sensitive*), un développement agricole résilient, la protection sociale, l'amélioration des soins et de la santé maternelle et infantile, la réduction et la gestion des risques, des mesures de développement communautaire, des investissements intelligents en matière de nutrition, une cohérence accrue des politiques et une collaboration institutionnelle et intersectorielle. Il s'agit d'obtenir des avantages à court et long terme, notamment pour les groupes pauvres et marginalisés. Compte tenu de la complexité des systèmes alimentaires et de l'existence possible de rétroactions non linéaires, il est essentiel d'explorer les possibilités d'atténuer le changement climatique et de s'y adapter, à la fois au sein des différents composants et acteurs qui interagissent dans les divers systèmes alimentaires, et dans l'ensemble de ses parties. La prise en compte de plusieurs échelles spatiales emboîtées et de différentes dimensions temporelles est indispensable.

Une approche fondée sur les systèmes alimentaires permet aussi d'identifier les possibilités intersectorielles et d'évaluer des politiques plus larges dont les cibles

principales ne sont pas seulement les producteurs et les consommateurs, mais aussi d'autres parties prenantes impliquées dans les systèmes alimentaires, avec une efficacité d'atténuation éventuellement plus élevée (Babiker *et al.*, 2022).

Concilier les stratégies d'atténuation et d'adaptation dans le domaine de l'agriculture et des systèmes alimentaires en valorisant les complémentarités et les synergies et en limitant les compromis n'est pas une option, mais une nécessité.

► Références

- Akamani K., 2021. An ecosystem-based approach to climate-smart agriculture with some considerations for social equity, *Agronomy*, 11, 1564, <https://doi.org/10.3390/agronomy11081564>.
- Atta-Krah K., Chotte J.-L., Gascuel C., Gitz V., Hainzelin E., Hubert B. *et al.* (Coords), 2022. *Transformations agroécologiques pour des systèmes alimentaires durables. Panorama de la recherche France-CGIAR*, Dossiers d'Agropolis International, 26, Agropolis International, Montpellier, France, 148 p., <https://doi.org/10.23708/fdi:010083985>.
- Babiker M., Berndes G., Blok K., Cohen B., Cowie A., Geden O., 2022. Cross-sectoral perspectives, in *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, Cambridge, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.014>.
- Barbieri L., Bittner C., Wollenberg E., Adair E.C., 2024. Climate change adaptation and mitigation in agriculture: A review of the evidence for synergies and tradeoffs, *Environmental Research Letters*, 19, 013005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad1629>.
- Benjamin C., Giraldo Hurtado A., 2021. Quand «l'irrigation verte» augmente la demande d'eau, *Revue économique*, 72, 929-946, <https://doi.org/10.3917/reco.726.0929>.
- Berbel J., Gutiérrez-Martín C., Rodríguez-Díaz J.A., Camacho E., Montesinos P., 2015. Literature review on rebound effect of water saving measures and analysis of a spanish case study, *Water Resources Management*, 29, 663-678, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0839-0>.
- Berry P.M., Brown S., Chen M., Kontogianni A., Rowlands O., Simpson G. *et al.*, 2015. Cross-sectoral interactions of adaptation and mitigation measures, *Climatic Change*, 128, 381-393, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1214-0>.
- Bertana A., Clark B., Benney T.M., Quackenbush C., 2022. Beyond maladaptation: structural barriers to successful adaptation, *Environmental Sociology*, 8, 448-458, <https://doi.org/10.1080/23251042.2022.2068224>.
- Bezner Kerr R., Madsen S., Stüber M., Liebert J., Enloe S., Borghino N. *et al.*, 2021. Can agro-ecology improve food security and nutrition? A review, *Global Food Security*, 29, 100540, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>.
- Bezner Kerr R., Hasegawa T., Lasco R., Bhatt I., Deryng D., Farrell A. *et al.*, 2022. Food, fibre, and other ecosystem products, 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 713-906, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>.
- Biesbroek G.R., Swart R.J., van der Knaap W.G., 2009. The mitigation-adaptation dichotomy and the role of spatial planning, *Habitat International*, 33, 230-237, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2008.10.001>.
- Bustamante M., Robledo-Abad C., Harper R., Mbow C., Ravindranat N.H., Sperling F. *et al.*, 2014. Co-benefits, trade-offs, barriers and policies for greenhouse gas mitigation in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector, *Global Change Biology*, 20, 3270-3290, <https://doi.org/10.1111/gcb.12591>.
- Caquet T., Gascuel C., Tixier-Boichard M. (Coords), 2020. *L'agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*, Versailles, éditions Quæ, 100 p.

- Chandra A., McNamara K.E., Dargusch P., 2018. Climate-smart agriculture: perspectives and framings, *Climate Policy*, 18, 526-541, <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1316968>.
- Debaeke P., Pellerin S., Scopel E., 2017. Climate-smart cropping systems for temperate and tropical agriculture: mitigation, adaptation and trade-offs, *Cahiers Agricultures*, 26, 34002, <https://doi.org/10.1051/cagri/2017028>.
- Duguma L.A., Wambugu S.W., Minang P.A., van Noordwijk M., 2014. A systematic analysis of enabling conditions for synergy between climate change mitigation and adaptation measures in developing countries, *Environmental Science & Policy*, 42, 138-148, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.06.003>.
- Ellis N.R., Tschakert P., 2019. Triple-wins as pathways to transformation? A critical review, *Geoforum*, 103, 167-190, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.12.006>.
- FAO, 2010a. Les 10 éléments de l'agroécologie. Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables, Rome, 13 p., <https://www.fao.org/3/i9037fr/I9037FR.pdf>.
- FAO, 2010b. Pour une agriculture intelligente face au climat. Politiques, pratiques et financements en matière de sécurité alimentaire, d'atténuation et d'adaptation, Rome, 55 p., <https://www.fao.org/4/i1881f/i1881f00.pdf>.
- FAO, 2018. Upscaling climate smart agriculture. Lessons for extension and advisory services. occasional papers on innovation in family farming, Rome, 65 p., <http://www.fao.org/3/I9209EN/I9209en.pdf>.
- Füssel H.M., 2007. Adaptation planning for climate change: Concepts, assessment approaches, and key lessons, *Sustainability Science*, 2, 265-275, <https://doi.org/10.1007/s11625-007-0032-y>.
- Gliessman S.R., 2007. *Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems*, CRC Press, Taylor & Francis, New York (NY), États-Unis, 384 p.
- High Level Panel of Experts (HLPE), 2019. Approches agroécologiques et autres approches novatrices pour une agriculture et des systèmes alimentaires durables propres à améliorer la sécurité alimentaire et la nutrition, rapport 14, 190 p., https://www.fao.org/fileadmin/templates/cfs/HLPE/reports/HLPE_Report_14_FR.pdf.
- Juhola S., Glaas E., Linnér B.-O., Neset T.-S., 2016. Redefining maladaptation, *Environmental Science & Policy*, 55, 135-140, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.014>.
- Karan S.K., Hamelin L., 2021. Crop residues may be a key feedstock to bioeconomy but how reliable are current estimation methods?, *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105211, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105211>.
- Klein R.J.T., Huq S., Denton F., Downing T.E., Richels R.G., Robinson J.B. et al., 2007. Inter-relationships between adaptation and mitigation, in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, p. 745-777.
- Konfo T.R.C., Chabi A.B.P., Amoussouga Gero A., Lagnika C., Avlessi F., Biaou G. et al., 2024. Recent climate-smart innovations in agrifood to enhance producer incomes through sustainable solutions, *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100985, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100985>.
- Kongsager R., 2018. Linking climate change adaptation and mitigation: A review with evidence from the land-use sectors, *Land*, 7, 158, <https://doi.org/10.3390/land7040158>.
- Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. et al., 2022. Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 57, <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00790-8>.
- Leippert F., Darmaun M., Bernoux M., Mpheshea M., 2020. The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems, FAO and Biovision, Rome, 154 p., <https://doi.org/10.4060/cb0438en>.
- Li H., Zhao J., 2018. Rebound effects of new irrigation technologies: the role of water rights, *American Journal of Agricultural Economy*, 100, 786-808, <https://doi.org/10.1093/ajae/aay001>.
- Lipper L., Thornton P., Campbell B.M., Baedeker T., Braimoh A., Bwalya M. et al., 2014. Climate-smart agriculture for food security, *Nature Climatic Change*, 4, 1068-1072, <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>.
- Locatelli B., Pavageau C., Pramova E., Di Gregorio M., 2015. Integrating climate change mitigation and adaptation in agriculture and forestry: opportunities and trade-offs, *WIREs Climate Change*, 6, 585-598, <https://doi.org/10.1002/wcc.357>.

- Makate C., 2019. Effective scaling of climate smart agriculture innovations in African smallholder agriculture: A review of approaches, policy and institutional strategy needs, *Environmental Science & Policy*, 96, 37-51, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.014>.
- Mauguin P., Caquet T., Huyghe C., 2024. *L'Agroécologie*, collection Que sais-je ?, Presses universitaires de France, Humensis, Paris, 128 p.
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M. *et al.*, 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*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 437-550.
- Moser S.C., 2012. Adaptation, mitigation, and their disharmonious discontents: an essay, *Climatic Change*, 111, 165-175, <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0398-4>.
- Nabuurs G.-J., Mrabet R., Abu Hatab A., Bustamante M., Clark H., Havlík P. *et al.*, 2022. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU), in *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, Cambridge, p. 747-860, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>.
- Neufeldt H., Jahn M., Campbell B.M., Beddington J.R., DeClerck F., De Pinto A. *et al.*, 2013. Beyond climate-smart agriculture: Toward safe operating spaces for global food systems, *Agriculture & Food Security*, 2, 12, <https://doi.org/10.1186/2048-7010-2-12>.
- Niles M.T., Ahuja R., Barker T., Equivel J., Guterman S., Heller M.C., 2018. Climate change mitigation beyond agriculture: a review of food system opportunities and implications, *Renewable Agriculture and Food Systems*, 33, 297-308, <https://doi.org/10.1017/S1742170518000029>.
- Paul B.K., Groot J.C.J., Birnholz C.A., Nzogela B., Notenbaert A., Woyessa K. *et al.*, 2019. Reducing agro-environmental trade-offs through sustainable livestock intensification across smallholder systems in Northern Tanzania, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 18, 35-54, <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1695348>.
- Pfeiffer L., Lin C.Y.C., 2014. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence, *Journal of Environmental Economics and Management*, 67, 189-208, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.12.002>.
- Pimbert M., 2015. Agroecology as an alternative vision to conventional development and climate-smart agriculture, *Development*, 58, 286-298, <https://doi.org/10.1057/s41301-016-0013-5>.
- Saj S., Torquebiau E., Hainzelin E., Pages J., Maraix F., 2017. The way forward: An agroecological perspective for Climate-Smart Agriculture, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 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, *Agriculture and Food Security*, 1, 12, <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-12>.
- Schipper E.L.F., 2022. Catching maladaptation before it happens, *Nature Climate Change*, 12, 617-618, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01409-2>.
- Schipper E.L.F., Revi A., Preston B.L., Carr E.R., Eriksen S.H., Fernandez-Carril L.R. *et al.*, 2022. Climate Resilient Development Pathways, 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, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis, p. 2655-2807, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.027>.
- Schreurs M.A., 2008. From the bottom up local and subnational climate change politics, *The Journal of Environment and Development*, 17, 343-355, <https://doi.org/10.1177/1070496508326432>.
- Sears L., Caparelli J., Lee C., Pan D., Strandberg G., Vu L. *et al.*, 2018. Jevons' paradox and efficient irrigation technology, *Sustainability*, 10, 1590, <https://doi.org/10.3390/su10051590>.
- Smith P., Olesen J.E., 2010. Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture, *Journal of Agricultural Science*, 148, 543-552, <https://doi.org/10.1017/S0021859610000341>.
- Suckall N., Stringer L.C., Tompkins E.L., 2015. Presenting triple-wins? Assessing projects that deliver adaptation, mitigation and development co-benefits in rural sub-saharan Africa, *Ambio*, 44, 34-41, <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0520-0>.

- Thornton T.F., Comberti C., 2017. Synergies and trade-offs between adaptation, mitigation and development, *Climatic Change*, 140, 5-18, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0884-3>.
- Tirado M.C., Crahy P., Mahy L., Zanev C., Neira M., Msangi S. *et al.*, 2013. Climate change and nutrition: Creating a climate for nutrition security, *Food and Nutrition Bulletin*, 34, 533-547, <https://doi.org/10.1177/156482651303400415>.
- Tol R.S.J., 2005. Adaptation and mitigation: Trade-offs in substance and methods, *Environmental Science & Policy*, 8, 572-578, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.06.011>.
- Tschora H., Cherubini F., 2020. Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa, *Global Ecology and Conservation*, 2, e00919, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>.
- Van Vuuren D.P., Isaac M., Kundzewicz Z.W., Arnell N., Barker T., Criqui P. *et al.*, 2011. The use of scenarios as the basis for combined assessment of climate change mitigation and adaptation, *Global Environmental Change*, 21, 575-591, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.11.003>.
- Van Wijk M.T., Merbold L., Hammond J., Butterbach-Bahl K., 2020. Improving assessments of the three pillars of climate smart agriculture: current achievements and ideas for the future, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 558483, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.558483>.
- Wilbanks T.J., Leiby P., Perlack R., Ensminger J.T., Wright S.B., 2007. Toward an integrated analysis of mitigation and adaptation: some preliminary findings, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 713-725, <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9095-4>.
- Wiréhn L., Käyhkö J., Neson T.-S., Juhola S., 2020. Analysing trade-offs in adaptation decision-making—agricultural management under climate change in Finland and Sweden, *Regional Environmental Change*, 20, 18, <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01585-x>.
- Zhao C., Yan Y., Wang C., Tang M., Wu G., Ding D. *et al.*, 2018. Adaptation and mitigation for combating climate change—from single to joint, *Ecosystem Health and Sustainability*, 4, 85-94, <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1466632>.
- Zhao J., Liu D., Huang R., 2023. A review of climate-smart agriculture: recent advancements, challenges, and future directions, *Sustainability*, 15, 3404, <https://doi.org/10.3390/su15043404>.

Chapitre 16

Les politiques publiques d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture française au changement climatique : entre mise à l'agenda tardive et marqueterie institutionnelle complexe

Marie Hrabanski, Bétina Boutroue, Gilles Massardier, Alban Thomas

Face à l'urgence climatique, les questions d'atténuation et d'adaptation de nos sociétés au changement climatique constituent désormais des enjeux majeurs pour les politiques publiques. Ce chapitre montre qu'en France, dans le secteur agricole, ce sont d'abord les enjeux d'adaptation qui ont focalisé l'attention des décideurs publics, même si des initiatives ont émergé afin que l'agriculture contribue également à l'atténuation. Les politiques agroclimatiques connaissent pourtant trois écueils majeurs qui entravent leur efficacité. Tout en présentant les principales orientations des dispositifs de la politique climatique en faveur de l'agriculture, ce chapitre est organisé de façon à expliciter ces trois limites. Premièrement, la thématique de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique (AACC) a été mise à l'agenda politique tardivement, à la fois à l'échelle des négociations internationales du climat, à l'échelle de l'Union européenne, notamment de la politique agricole commune (Pac), et dans les politiques agricoles mises en place en France. De même, à l'exception du secteur forestier, les enjeux d'atténuation pour le secteur agricole ont connu un intérêt récent. Deuxièmement, en France, même si des innovations institutionnelles existent, les politiques d'atténuation et d'adaptation de l'agriculture et leurs instruments sont majoritairement des politiques recyclées, limitant ainsi leur caractère innovant ainsi que leur portée. Enfin, un troisième écueil réside dans la complexité de leur architecture institutionnelle et de leur gouvernance, dans la mesure où la disjonction de temporalités, l'enchevêtrement des niveaux d'action publique, la multiplicité des secteurs mobilisés ainsi que le poids du néocorporatisme sectoriel pèsent fortement sur leur cohérence et leur efficacité.

► **La mise à l'agenda tardive de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique à l'échelle internationale, européenne et en France**

La mise à l'agenda tardive des questions d'adaptation et des questions agricoles dans les négociations climatiques à l'échelle mondiale

La prise en compte des questions agricoles dans la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a été particulièrement tardive. Lors de sa

signature, en 1992, le lien entre les changements climatiques et l'agriculture est évoqué (articles 2 et 4 de la CCNUCC). Toutefois, les enjeux sont focalisés à cette période sur les questions d'atténuation, et l'agriculture semble être un objet trop politique pour faire l'objet d'une réelle prise en charge par les parties prenantes à la Convention (Caron et Treyer, 2016; Hrabanski, 2020). En 1997, lors de l'adoption du protocole de Kyoto, le texte fait référence à l'agriculture et à la forêt, et estime que certaines activités agricoles comme le changement d'affectation de l'usage des terres et la foresterie peuvent constituer des sources d'émission de gaz à effet de serre (GES). Cependant, les secteurs de l'agriculture et de la foresterie ne sont intégrés ni dans le calcul de la réduction des émissions par le protocole de la CCNUCC, ni dans les projets du mécanisme de développement propre en tant que tels (Vespa, 2002).

À partir de 2011 et de la COP17 de Durban, l'agriculture est enfin réellement abordée dans les conférences des parties (COP) (Vespa, 2002). Des coalitions d'acteurs distincts, voire antagonistes, appellent dès lors à une transformation des modèles agricoles adaptés au changement climatique. Pour certains, les approches de type *climate-smart agriculture* promeuvent principalement des solutions techniques pour répondre aux enjeux du changement climatique (amélioration des techniques de gestion du sol, fermes verticales, biotechnologies, additifs pour le bétail, fertilisants chimiques, etc.). Elles doivent, d'après eux, permettre d'adapter les systèmes agricoles et alimentaires aux dérèglements climatiques et d'assurer des rendements nécessaires à la démographie mondiale tout en ne modifiant pas les systèmes productifs existants. D'autres, et notamment les mouvements paysans, les organisations de défense de la souveraineté alimentaire et une partie de la recherche agricole, estiment que, si des innovations techniques sont nécessaires, elles ne sont pas suffisantes. Pour ceux-là, des approches plus holistiques doivent être promues, afin d'atteindre la durabilité des systèmes alimentaires — par la transformation et la relocalisation de ces systèmes (Hrabanski, 2020; Hrabanski et Le Coq, 2022). Ces différentes voies illustrent à quel point l'agriculture demeure un objet extrêmement politisé dans les négociations climatiques. L'agriculture peine de fait à se hisser en haut de l'agenda climatique : en 2015, s'il y a bien une journée consacrée à l'agriculture pendant la COP21, l'Accord de Paris passe à nouveau l'agriculture sous silence. C'est uniquement sous les angles de la sécurité alimentaire et de la vulnérabilité des systèmes de production alimentaire que les questions agricoles sont indirectement abordées. Néanmoins, l'Accord de Paris demande aux pays signataires de déposer leur contribution déterminée au niveau national (NDC : National Determined Contribution), afin de réduire les émissions au niveau mondial. C'est donc principalement à l'échelle nationale que l'intégration des enjeux agroclimatiques est promue : en 2020, plus de 90 % de ces contributions nationalement 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. Si plus récemment, à l'échelle internationale, la feuille de route pour l'action commune de Koronivia (KJWA en anglais), lancée en 2017, a abouti en 2022 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, la climatisation des politiques agricoles (Foyer, 2016; Aykut *et al.*, 2017; Hrabanski et Montouroy, 2022), définie ici comme le processus d'intégration des enjeux climatiques dans les politiques agricoles et le processus d'intégration des

enjeux agricoles dans les politiques climatiques, est toutefois encore majoritairement renvoyée vers les gouvernements et vers les politiques publiques régionales (c'est-à-dire la Pac) et nationales.

Des réformes de la Pac aux politiques françaises : une climatisation tardive et progressive

En Europe, sous l'impulsion des négociations internationales, de la stratégie européenne relative à l'adaptation au changement climatique (suite au Livre vert de 2007 et au Livre blanc de 2009) et de la révision du «paquet climat⁵⁶», les politiques agricoles européennes par le biais des réformes successives de la Pac ont cherché à intégrer des objectifs d'atténuation et à promouvoir progressivement des formes d'agriculture durable, tournées vers l'adaptation au changement climatique (Bodiguel, 2017). La Pac de 2013 a d'abord innové en insérant la question climatique à la fois dans les aides liées au premier pilier (aides aux revenus) et au deuxième pilier (développement rural). Depuis, l'ensemble du système d'aides publiques agricoles promu dans le cadre de la Pac fait du climat un élément central dans les discours et dans les objectifs; ainsi, les mesures agroenvironnementales territorialisées, les Maet, sont devenues des mesures agroenvironnementales et climatiques, des Maec, en 2014. Toutefois, dans les faits, le renouveau climatique de la Pac est limité en raison de la prévalence du triptyque croissance-productivité-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. De même, le recyclage⁵⁷ d'instruments existants et la dimension contractuelle (et donc volontaire, par l'intermédiaire des Maec) de ce système d'aide publique (Bodiguel, 2014 et 2017) freinent le développement d'une logique climatique plus ambitieuse à l'échelle de l'Union européenne et par conséquent à l'échelle nationale, notamment en France. La nouvelle Pac (période 2023-2027) confirme cet objectif climatique, dans la logique du pacte vert européen qui veut «réduire l'empreinte climatique», même si l'ambition climatique est jugée inappropriée au regard de l'urgence par certains porteurs d'enjeux (associations environnementales, etc.). Cela étant, le premier pilier de la nouvelle Pac renforce le «verdissement» dans la conditionnalité des aides à l'agriculture pour accompagner massivement des pratiques agricoles vertueuses pour l'environnement, à travers neuf types de bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE). Le climat est concerné, en tant qu'enjeu majeur, par trois de ces mesures d'écoconditionnalité : le maintien des prairies permanentes (prévention du déstockage du carbone dans les sols), la protection des zones humides et des tourbières (éviter la dégradation de ces sols riches en carbone) et l'interdiction de brûler des chaumes et des résidus de cultures arables (maintien de la matière organique des sols). Les aides climatiquement conditionnées

56. En 2014, la révision du paquet climat continue de privilégier la voie de l'atténuation. Ce dernier a permis de réviser le règlement LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) qui fixe les modalités de prise en compte du secteur de l'utilisation des terres, des changements d'affectation des terres et de la forêt dans le partage de l'effort. Dès lors, la nouveauté réside dans un dispositif de flexibilité qui permet de compenser des émissions agricoles importantes avec des mécanismes de séquestration de carbone, ce qui pourrait à terme abaisser le niveau d'ambition de réduction des GES de l'Union européenne.

57. Luc Bodiguel utilise même le terme de «climate washing de la Pac» (Bodiguel, 2014), toutefois le recyclage d'instruments existants pour faire face à un nouveau problème constitue un processus classique en sciences politiques (Halpern et Le Galès, 2011).

de la nouvelle Pac n'engendrent plus d'aides supplémentaires, mais font partie du socle de règles à respecter pour bénéficier de l'intégralité des aides proposées. Le deuxième pilier (développement rural) de la nouvelle Pac demeure gouverné par sa logique « aména-geuse » traditionnelle, contractuelle et pluriannuelle du Fonds européen agricole pour le développement rural (Feader), mais le changement climatique est désormais explicitement mentionné dans la priorité 2. Une deuxième nouveauté est que chaque État membre a dû établir un plan stratégique national (PSN, Plan stratégique national français en date d'août 2022) qui détaille les priorités pour les deux piliers, en démontrant leur cohérence avec les enjeux nationaux et européens et en identifiant des indicateurs de réalisation et de résultat (par exemple le nombre d'hectares couverts par des engagements en matière de climat allant au-delà des exigences obligatoires).

Sous l'impulsion de ces dynamiques internationales et européennes, et aussi grâce à des logiques plus endogènes, les politiques agricoles développées en France se sont progressivement « climatisées », mais, là encore, ce processus a été tardif. Une première période s'ouvre à partir de 2001, date à laquelle l'adaptation est officiellement mise à l'agenda politique en France à travers la création de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (Onerc). Faisant suite à la stratégie nationale, le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) est adopté en 2011. D'une durée de cinq ans, il liste des mesures d'adaptation pour une série de politiques sectorielles, dont l'agriculture. En 2015, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), proclamée dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique et pour la croissance verte (LTECV), met cette fois la focale sur les enjeux d'atténuation. Ce premier texte officiel, qui décline l'objectif national de réduction des émissions de GES par secteur, fixe à 50 % la réduction pour le secteur agricole à l'horizon 2050, sans toutefois définir les politiques publiques spécifiques pour y parvenir. À côté de cette dynamique de climatisation des politiques publiques, portées par le ministère de l'Environnement, le secteur agricole et ses acteurs se mobilisent et s'emparent des enjeux climatiques, mais de façon plus diffuse, en les greffant notamment à des enjeux environnementaux qui leur sont plus facilement identifiables. Ainsi en 2008, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) lance le premier plan Écophyto, qui sera suivi en 2015 du plan Écophyto II+, lequel confirme les objectifs de réduction de moitié de l'utilisation des produits phytosanitaires en dix ans et prévoit de nouvelles actions telles que le dispositif de certificats d'économie de produits phytopharmaceutiques (CEPP) et celui des fermes 30 000. Toutefois, l'enjeu de réduction des produits phytosanitaires n'est pas explicitement abordé sous l'angle des enjeux climatiques, faisant de l'adaptation « sans le dire ». Par ailleurs, le modèle agricole sur lequel l'utilisation des produits phytosanitaires repose n'est pas remis en question. Par la suite, le ministère de l'Agriculture français engage en 2012 un programme de recherche sur l'agroécologie dans le but de faire changer d'échelle les expériences pionnières lancées et de proposer un modèle de production qui répondrait à la fois aux deux enjeux climatiques et à la réduction des produits phytosanitaires : le Projet agroécologique. Promu par le ministre Stéphane Le Foll, il favorise la mise en place de systèmes de production qui « contribuent à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du changement climatique », liant alors explicitement les pratiques agricoles et l'adaptation aux nouveaux enjeux climatiques. Cette première période illustre bien les logiques distinctes qui traversent le processus de climatisation, entre ambition de mise en cohérence transectorielle (PNACC) et dynamiques sectorielles (Projet agroécologique, plan Écophyto).

Une seconde période s'ouvre à la suite de l'Accord de Paris en 2015. Elle marque la montée en puissance de l'adaptation de l'agriculture et, dans une moindre mesure, des enjeux d'atténuation dans l'agenda politique et institutionnel. Ainsi, lors de la COP21, sous l'impulsion de la France, est lancée l'initiative « 4 pour 1 000 », de façon à souligner le potentiel de captation du carbone dans les sols agricoles. Toutefois, l'AACC attire davantage l'attention de la part des décideurs publics tant l'enjeu économique, politique, alimentaire et environnemental s'impose, poussé aussi par la mobilisation des professionnels dont beaucoup sont fragilisés par les épisodes extrêmes qui se succèdent depuis la fin des années 2010 (Dantec et Roux, 2019). Le PNACC2⁵⁸ (2018-2022) illustre la montée en puissance des enjeux climatiques, et d'adaptation en particulier, dans le secteur agricole. Il aborde l'agriculture par le biais des filières agricoles et agroalimentaires, et prévoit une étude prospective pour 2020 permettant d'identifier les filières prioritaires, car les plus vulnérables, afin « d'éviter les investissements dont la rentabilité serait significativement réduite en raison du changement climatique et de réorienter les investissements ». Plusieurs rapports parlementaires maintiennent l'adaptation de l'agriculture en haut de l'agenda politique, dans un contexte où la raréfaction de l'eau s'impose, débouchant sur le lancement du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique initié par le ministre de l'Agriculture, Julien Denormandie, et par la secrétaire d'État chargée de la biodiversité, Bérangère Abba, en 2021. Cet accord conclu en février 2022 est clairement orienté vers l'adaptation au changement climatique. Les trois piliers du Varenne étaient la gestion des risques climatiques (dont la mesure phare, la réforme de l'assurance récolte), la résilience de l'agriculture (qui incluait la préservation des sols, le choix des variétés, les pratiques de culture et d'élevage) et l'irrigation (qui comprenait l'examen de la création de retenues d'eau et la discussion du partage de l'eau).

Parallèlement à cette mise en politique des enjeux climatiques dans les politiques agricoles à l'échelle internationale, européenne et nationale, les acteurs territoriaux infranationaux s'emparent également de cette thématique, complexifiant davantage l'architecture institutionnelle des politiques et des initiatives en faveur de l'adaptation en France. En outre, la multiplication des plans et des stratégies nous renseigne peu sur ce qui est effectivement disponible et mis en œuvre pour les agriculteurs eux-mêmes.

► Les instruments d'adaptation en France : quelques innovations et de nombreux recyclages

Au-delà des rhétoriques et du design institutionnel de ces politiques et autres stratégies ou plans, l'enjeu principal réside dans leur mise en œuvre, c'est-à-dire dans l'adoption de mesures tangibles, effectives et efficaces pour s'adapter. L'étude des instruments⁵⁹

58. Le PNACC2 (2018-2022) propose une série de moyens au service de l'AACC déclinés en cinq domaines d'action : gouvernance, connaissance et information, prévention et résilience, économie et action internationales, nature et environnement.

59. 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 » (Bemelmans-Vidéc et al., 2011; 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.

de politiques d'adaptation et d'atténuation du changement climatique permet d'identifier « au concret » (Padioletto, 1982) les dispositifs et les outils disponibles en France pour accompagner les agriculteurs dans l'adaptation et l'atténuation des émissions de GES. Après avoir analysé une typologie des instruments d'adaptation de l'agriculture en France et d'atténuation, deux instruments seront pris pour exemple : un instrument incitatif de gestion du risque (l'assurance récolte) et un instrument de type communicationnel, basé sur la sensibilisation et l'information du public (le label bas-carbone).

Davantage d'instruments d'adaptation, mais pour la plupart, recyclés

À partir de plusieurs projets de recherche menés entre 2018 et 2022 (Typoclim, Tackling Climate Change, Artimix), un inventaire des instruments d'adaptation de l'agriculture en France a été élaboré. Cet inventaire a permis de rassembler des éléments à la fois sur la date de création des instruments, sur leur niveau de fabrication (international, européen, national et territorial, à partir du cas de l'Occitanie), sur leur nature sectorielle ou multisectorielle, et enfin sur le type d'instrument disponible. En mobilisant la typologie classique de Bemelmans-Videc *et al.* (2011), cet inventaire permet en effet de distinguer les instruments incitatifs, les instruments réglementaires et les instruments communicationnels. Dans la lignée des travaux de Pacheco-Vega (2020), nous appréhendons également les combinaisons d'instruments qui associent ces différentes dimensions. Cet inventaire, devenu typologie, permet de souligner quatre résultats majeurs.

Le premier résultat de cette typologie est d'abord l'accélération du nombre d'instruments tournés vers l'AACC à partir des années 2010, confirmant ainsi la mise à l'agenda tardive de cette thématique par rapport aux autres secteurs. Le second résultat témoigne d'une préférence marquée pour les instruments de type incitatif (*carrot*), pour les instruments de type communicationnel (*nodality*) et pour l'association de ces deux modalités d'instruments (*regulatory pluralism*). Les instruments incitatifs recouvrent principalement des dispositifs d'aide financière (organisation commune de marché [OCM], Maec, groupement d'intérêt économique et écologique [GIEE], mesures du plan de développement rural, aide à la rénovation des vergers et des mécanismes assurantiels, assurances multirisques climatiques, etc.). Conçus au niveau européen et régional pour les aides 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. Les instruments communicationnels 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. Ces instruments et leurs combinaisons (GIEE par exemple) incitent les agriculteurs à la fois à transformer leurs pratiques, à partager de l'information climatique et à échanger avec des acteurs agricoles ou non agricoles à propos des enjeux du changement climatique pour l'agriculture. À l'échelle internationale (Banque mondiale, OCDE, Union européenne), ces instruments sont largement plébiscités parce qu'ils seraient plus faciles à mettre en œuvre que des instruments réglementaires (*command and control*, de type *stick*) basés sur des obligations ou des interdictions. Ces derniers sont en effet très peu utilisés pour adapter l'agriculture française au changement climatique, hormis quelques mesures liées à la restriction

des usages de l'eau agricole, dans certaines conditions. On peut toutefois nuancer cette idée en identifiant aussi des instruments qui combinent les trois dimensions étudiées (incitation, communication et réglementation) : les incitations sont souvent conditionnées à des changements de pratiques, comme c'est le cas d'une partie des Maec. Le troisième résultat a trait au fait que les instruments d'AACC sont principalement des instruments sectoriels : la structuration historique du secteur agricole, lequel dispose de nombreuses organisations qui encadrent la profession sur les territoires (conseil agricole, chambre 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 un secteur particulièrement organisé et structuré, qui certes complexifie le dialogue et la prise en compte des enjeux non sectoriels, mais qui permet aussi d'intégrer rapidement l'enjeu climatique dans ses objectifs et ses instruments, au moins dans sa rhétorique.

Le quatrième 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'AACC, les pouvoirs publics recyclent des dispositifs créés au préalable avec d'autres objectifs en y intégrant une dimension climatique. Ces évolutions, qui marquent les sigles et les registres de justification des instruments, ne sont pas toujours suivies d'une application concrète en matière d'AACC. Les Mae en sont une illustration, car de nombreux professionnels (chambres d'agriculture, syndicats agricoles, agences de l'eau, etc.) restent perplexes quant à l'impact climatique de ces mesures sur le terrain à la suite de l'ajout du C à la fin de l'acronyme. Toutefois, la mise à l'agenda de l'AACC a aussi amené, dans une moindre mesure, à la création de nouveaux instruments, principalement des instruments communicationnels, dont les effets cognitifs sont réels (Hood, 1983), mais les changements concrets de pratiques plus incertains. C'est le cas des observatoires créés à l'initiative des chambres d'agriculture (Oracle, ClimA-XXI) qui élaborent des diagnostics climatiques localisés et des projections territoriales à différents horizons, du projet agroenvironnemental de l'appellation d'origine contrôlée (AOC) Languedoc, des projets de recherche Laccave puis Laccave 2 qui semblent devenir une base sur laquelle est en train d'être négociée une véritable politique d'adaptation de la filière viticole en France. Nous pouvons considérer cette création d'instruments d'AACC comme une forme d'innovation institutionnelle, au sens où de nouveaux instruments sont conçus pour répondre à un enjeu récent. Toutefois, il convient de distinguer sur le terrain ce qui relève d'initiatives innovantes ou non. Par exemple, si les GIEE sont en soi des instruments qui témoignent d'une dynamique d'innovation institutionnelle, ils ne représentent pas une originalité particulière dans leur mise en œuvre. En effet, s'ils permettent de réunir formellement un groupe d'agriculteurs, de nombreux membres de GIEE rencontrés expliquent qu'ils travaillaient déjà ensemble avant la constitution officielle de leur groupe en GIEE, afin de se convertir en bio et de mettre en place des Maec. *A contrario*, pour ce qui est du projet OccitAnum formulé dans le cadre de l'appel à projets « Territoire d'innovation » du Grand Plan d'investissement, il est dans un sens innovant étant donné qu'il regroupe l'ensemble des filières agricoles à l'échelle d'une région au sein d'un projet commun basé sur le recours au numérique, ainsi que différents acteurs du territoire, et qu'il applique à cette échelle des outils créés par des organisations de type start-up, dans le secteur agricole.

Pour conclure, l'analyse souligne la faible dynamique d'innovation instrumentale pour l'AACC et le processus de recyclage des instruments existants. Les instruments d'adaptation au changement climatique sont pour partie des instruments recyclés, c'est-à-dire qu'ils ont d'abord été pensés pour d'autres objectifs de politique publique. Leur antériorité et l'existence de réseaux structurés sur le long terme peuvent constituer des arguments pour leur intégration dans les plans nationaux d'adaptation au changement climatique. Le recyclage des instruments peut toutefois créer des tensions entre les objectifs de l'instrument et des risques de maladaptation. Ce risque peut survenir s'il existe un décalage entre l'instrument tel qu'il a été pensé pour d'autres objectifs et les ambitions d'adaptation transformationnelle qui sont recommandées par le Giec. Une adaptation transformationnelle s'oppose à une adaptation incrémentale. L'adaptation transformationnelle est considérée comme d'une plus grande ampleur, d'une plus grande profondeur et comme étant plus rapide que l'adaptation incrémentale (Termeer *et al.*, 2016). En matière agricole, Panda (2018) identifie plusieurs pratiques qui relèvent de l'adaptation transformationnelle : adopter d'autres cultures en raison de contraintes de ressources, modifier l'utilisation des sols ou encore adopter à une large échelle des pratiques de culture adaptées. Mais, pour l'instant, force est de constater que les instruments d'adaptation proposés sont majoritairement tournés vers une adaptation incrémentale, basée sur le recyclage d'instruments existants. La section suivante illustre ces processus d'innovation et de recyclage à travers l'analyse d'un instrument d'adaptation, les assurances climatiques, et d'un instrument d'atténuation, le label bas-carbone.

Entre recyclage et innovation incrémentale : les exemples des assurances climatiques, des mesures de la Pac et du label bas-carbone

L'assurance récolte française et le label bas-carbone sont deux exemples d'instruments sectorisés : ils sont développés et portés par le secteur agricole. Ils illustrent aussi certaines limites de la prévalence des instruments recyclés dans le mix instrumental des politiques d'AACC.

Pour ce qui est de l'assurance, les innovations qui ont été proposées dans le cadre de la réforme de 2022 consistent à élargir la diffusion d'une assurance spécialisée davantage soutenue par l'État. Ce faisant, l'État accentue son soutien aux agriculteurs engagés dans ces contrats, mais diminue les aides aux non-assurés avec la suppression du fonds des calamités agricoles. En outre, le financement partiel des assurances agricoles par l'État vise aussi à rééquilibrer le système assurantiel, qui a subi de lourdes pertes depuis 2015 en raison des événements climatiques extrêmes. Cependant, cette réforme ne change pas la logique assurantuelle, qui soutient les producteurs, y compris dans la prise de risques cultureaux. L'assurance n'est pas adossée à une réflexion plus large pour planifier les cultures adaptées aux climats des territoires dans les prochaines décennies. En cela, l'assurance n'induit pas une adaptation transformationnelle⁶⁰. L'adaptation est

60. Le Giec, dans son cinquième rapport paru en 2014, définit l'adaptation transformationnelle comme une «adaptation qui modifie les attributs fondamentaux d'un système en réponse au climat et à ses conséquences» (IPCC, 2014). L'adaptation transformationnelle change les attributs principaux du système considéré, par opposition à une adaptation incrémentale qui s'attache à préserver ces attributs.

de court terme, puisqu'elle permet de préserver les revenus malgré les aléas naturels. Elle favorise ainsi la continuation d'activités de plus en plus risquées en mutualisant les risques et les pertes (O'Hare *et al.*, 2016).

L'assurance récolte et sa réforme, qui font partie du premier pilier du Varenne de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, assurent le rendement des producteurs face aux événements climatiques extrêmes comme les sécheresses, les inondations, le gel, l'échaudage ou la grêle. De façon assez paradoxale, si l'agriculture et la forêt sont les secteurs économiques les plus vulnérables aux conditions climatiques extrêmes du fait de leur emprise géographique, ils sont faiblement couverts par l'assurance. Ainsi, pour les pouvoirs publics, au tournant des années 2020, la réforme vise à mettre en cohérence un système de protection pensé comme un équilibre entre assurance (et réassurance) et compensation, avec de nouvelles conditions climatiques (et des changements globaux) qui remettent en question le potentiel de mutualisation des risques. Le principe de répartition des risques entre les agriculteurs, grâce à leur mutualisation avec les risques d'autres territoires ou secteurs d'activité, est en effet mis à mal en cas d'événements naturels extrêmes (sécheresse, tempête, etc.) touchant une large partie du territoire national.

Les débats autour de la thématique 1 du Varenne de l'eau (voir section « Les instruments d'adaptation en France : quelques innovations et de nombreux recyclages », p. 371) portant sur l'assurance du risque agricole ont rappelé la nécessité d'une catégorisation des missions de chacun. Trois catégories d'acteurs jouent un rôle important dans la refonte du système français d'assurance agricole. La première catégorie comprend les agriculteurs eux-mêmes, qui peuvent réduire leur exposition au risque et le montant des dommages causés par les événements naturels par des stratégies d'autoprotection et d'autoassurance comme les filets antigrêle, l'adaptation des itinéraires techniques, etc. Pour les encourager à s'assurer, l'État protège deux fois plus les agriculteurs (90 % pour les assurés contre 45 % pour les non-assurés) contre les pertes de récolte en cas de « coup dur »⁶¹. La deuxième catégorie est celle des assureurs et des réassureurs. Les compagnies d'assurance doivent réduire le coût, formaliser et accroître la transparence des contrats. En retour, elles bénéficient d'une meilleure couverture assurantielle du secteur agricole (obligation d'assurance à terme) et de la prise en charge des risques de « coups durs » par l'État. Les réassureurs mutualisent les risques généralisés (au sens géographique) avec les risques des secteurs ou des régions géographiques différents. Le rôle du secteur de la réassurance devient majeur au regard de la plus grande difficulté à mutualiser des risques naturels récurrents et à grande échelle. La troisième catégorie d'acteurs concerne la puissance publique, qui prend en charge la compensation de dommages exceptionnels au titre de la souveraineté nationale. L'intervention en cas de « coup dur » manifeste le renforcement du soutien de l'État. De plus, alors que la prime d'assurance payée par l'agriculteur était subventionnée à 65 %, elle passe à 70 % de prise en charge publique. En complément, la franchise de l'assurance a été abaissée de 30 % à 20 % de pertes. Cette mesure étend considérablement la prise en charge publique des pertes agricoles par l'assurance, car la subvention s'applique désormais aussi aux contrats avec une franchise de 20 %, ce qui n'était pas le cas avant la réforme. L'assurance couvre ainsi les pertes beaucoup plus probables entre 20 % et 30 %

61. L'intervention de l'État couvre les pertes de récolte qui sont désignées comme des « coups durs » à partir de 30 % de pertes (pour les prairies et l'arboriculture) et 50 % pour les grandes cultures et la viticulture.

de la production. La prise en charge par l'État des « coups durs » permet par ailleurs de soulager les assureurs, afin qu'ils puissent proposer un tarif pour l'assurance à 20 % de franchise abordable pour les agriculteurs. Le renforcement de l'intervention publique permet ainsi de couvrir les pertes de production agricole à partir de 20 %, pour un coût de la prime similaire à celui que coûtait l'assurance des pertes de production à partir de 30 % de franchise. En cela, le renforcement de l'intervention publique correspond à une incitation conséquente pour les agriculteurs à s'assurer avec, pour conséquence, une contribution estimée du gouvernement passant de 300 à 600 millions d'euros par an après la réforme de 2023 (Bonvillain *et al.*, 2024).

L'innovation porte donc plutôt sur le processus de mise en place de la politique publique d'accompagnement du secteur agricole et sur des propositions relatives à la transparence du dispositif (partage de données de la part des assureurs, en particulier). Pour le reste, il s'agit d'une évolution du système de protection qui porte sur la dimension de l'adaptation au changement climatique en repartant d'outils préexistants, mobilisés de façon déjà ancienne par plusieurs pays industriels (États-Unis, Espagne, etc.). Toutefois, pour ce qui est de l'impact, le recours à l'assurance peut générer de la maladaptation. Celle-ci survient quand les mesures prises pour réduire la vulnérabilité des groupes sociaux au changement climatique n'incitent pas à s'adapter (Barnett et O'Neil, 2010). O'Hare *et al.* (2016) ont montré que l'assurance tend à augmenter la vulnérabilité des agriculteurs en permettant des comportements rendus de plus en plus risqués par le changement climatique. L'assurance aide les agriculteurs à absorber les effets à court terme du changement climatique, mais n'incite pas à une forme d'adaptation transformationnelle (Kates *et al.*, 2012), dans la mesure où elle ne s'accompagne pas d'une transition vers des cultures plus adaptées au climat. Il est cependant trop tôt pour évaluer l'effet de la réforme de l'assurance récolte sur les choix de production et sur le taux de couverture de l'assurance.

Ainsi, le recyclage instrumental peut se limiter à un changement d'objectif qui ne se traduit pas par une adaptation transformationnelle, comme dans le cas de l'assurance récolte. Au contraire, l'assurance peut encourager des pratiques qui ne sont pas adaptées à l'évolution projetée du climat⁶². Une autre catégorie d'instruments concerne l'atténuation du changement climatique et apporte une dimension plus novatrice, au moins dans la contribution de stratégies de paiement pour services environnementaux ou d'affichage environnemental appliquées au cas du climat (les mesures de la Pac 2023-2027 et les labels bas-carbone).

De nouvelles Maec ont été proposées par le PSN de la France en application de la Pac 2023-2027, pour contribuer à l'atténuation du changement climatique. Il s'agit de Maec ciblant les sols (techniques avancées de travail du sol, couverture permanente, intégration de cultures de légumineuses, semis direct) et de Maec concernant les élevages (maintien des surfaces en herbe) et les pratiques agricoles (semis direct et techniques culturales simplifiées, pour maintenir le niveau de matière organique des sols). L'indemnité compensatoire pour handicap naturel (ICHN) fait également partie de cette catégorie, car elle favorise le maintien des surfaces toujours en herbe, ainsi que

62. Voir par exemple Koenig et Brunette (2024), qui montrent que certains agriculteurs s'adaptent, mais sont tributaires des modes de valorisation de leurs produits (AOP, filières avales territorialisées), certains encore diversifiant leur revenu hors de l'agriculture.

le soutien aux investissements agricoles non productifs (soutien aux systèmes agro-forestiers). Mentionnons enfin les aides couplées aux légumineuses (premier pilier de la Pac, au titre de leur service de régulation climatique), l'aide couplée à l'unité gros bétail (UGB) de plus de seize mois (qui favorise l'élevage à l'herbe) et les investissements productifs (amélioration de la performance énergétique des exploitations). Ces mesures existaient déjà dans la programmation précédente de la Pac.

Les labels bas-carbone (LBC), créés dans le cadre de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2015, actualisée en 2019), introduisent pour leur part des innovations dans un mécanisme général déjà existant (celui de la certification environnementale des entreprises et des collectivités), mais produisent des effets climatiques encore largement incertains. Du fait de leur apparition récente, ces labels ne sont pas *a priori* protégés d'un effet d'aubaine participant d'une stratégie de certains producteurs visant notamment à sécuriser une partie de leur revenu, leur part de marché ou leur position de négociation au sein d'une filière, etc. Ces instruments ne sont pas, cependant, entièrement nouveaux, mais peuvent être considérés comme recyclés à partir d'autres expériences de secteurs plus ou moins comparables (énergie, transports, bâtiment, etc.). Leur caractère réellement innovant réside dans leur inscription dans un marché de compensation volontaire permettant aux entreprises, aux associations, aux organisations de producteurs ou aux collectivités locales de financer des projets d'atténuation. Leur objectif est d'aller au-delà de leur niveau incompressible de baisse de GES, en achetant des crédits carbone à d'autres secteurs (dont l'agriculture), à un prix non imposé (qui dépend donc du consentement à recevoir des porteurs de projets) et avec une transparence garantie sur les projets (méthodes de comptabilisation validées scientifiquement).

L'obtention d'un LBC permet aux exploitations agricoles de certifier leurs projets de réduction d'émissions de GES, et d'avoir accès à un paiement proportionnel aux tonnes de CO₂ non émises ou séquestrées. Deux diagnostics sont prévus : initial et terminal (cinq ans après le lancement du projet), notamment pour examiner l'additionnalité⁶³, le suivi des émissions et de la séquestration (traçabilité), et l'existence de cobénéfices (biodiversité, eau, etc.).

Le premier opérateur français ayant décroché un LBC est l'institut de l'Élevage (Idele) en 2019, avec la méthode d'évaluation Carbon Agri en bovins lait et viande et l'outil de diagnostic Cap'2ER. L'interface avec les acheteurs de crédits carbone était réalisée par l'association France Carbon Agri (Idele, Centre national interprofessionnel de l'économie laitière [Cniel], etc.). L'objectif a été considéré comme atteint, avec la commercialisation de 20% des 70 000 tonnes de carbone (achat par la Caisse des dépôts et consignations et par des entreprises du secteur de la tannerie)⁶⁴. Le prix initial était de 30 €/tonne, un prix considéré comme un minimum *a priori* selon France Carbon Agri lors de son lancement. La méthode Carbon Agri est depuis en

63. Les réductions d'émissions d'un projet sont additionnelles si elles ne se sont pas produites dans le cadre du scénario de référence. Un projet est appelé additionnel s'il n'avait pas eu lieu sans la labellisation du projet.

64. En comparaison, l'élevage bovin en France représentait en 2021 38 millions de tonnes de CO₂, avec des pratiques d'atténuation incluant une optimisation de la performance laitière des troupeaux, une amélioration de la qualité des fourrages et un raisonnement de la fertilisation (Pellerin *et al.*, 2017). Ce niveau de 70 000 tonnes correspondrait donc à moins de 1% de la cible de réduction «Fit for 55» pour l'élevage bovin en France.

déploiement sur d'autres secteurs (porc, volaille, petit ruminant). Concernant les méthodes de diagnostics récentes utilisées par le LBC, on peut mentionner Ecométhane (bovins laitiers), Sobac'Eco-TMM (gestion des intrants) et Grandes Cultures (secteur de la grande culture).

Grâce à l'analyse des instruments climatiques dans le secteur agricole en France et aux exemples étudiés, on comprend dès lors que les politiques d'AACC manquent d'instruments innovants. Parmi les instruments d'adaptation en France, on identifie certes nombre d'instruments incitatifs (et très peu d'instruments réglementaires), dont les effets à court terme sont plus prévisibles, mais l'urgence climatique ne peut se satisfaire du processus de recyclage observé. Les instruments d'adaptation se limitent, pour une part importante, à des instruments communicationnels, dont les effets sont sans doute réels sur le plan cognitif à moyen et long terme, mais plus incertains à court terme (Henstra, 2016). En outre, les instruments d'AACC s'inscrivent dans une gouvernance et une architecture institutionnelle qui complexifient leur mise en œuvre.

► **La marqueterie institutionnelle complexe de la gouvernance de la transition agricole française**

Les politiques climatiques sont mises en œuvre de façon complexe, ce qui est un frein à la réponse urgente au changement climatique. Comme les deux précédentes parties ont déjà commencé à le montrer, la conséquence directe du changement climatique sur le monde agricole et rural est la complexification de l'architecture institutionnelle et de la gouvernance des politiques.

Trois logiques, parallèles ou articulées selon les dispositifs, gouvernent cette transition climatique, dévoilant ainsi une architecture multiniveau baroque : des aides européennes conditionnées; des planifications imbriquées qui cherchent à intégrer, c'est-à-dire désectoriser, la gestion de la question climatique; et *a contrario* des aides en silos sectoriels, voire « filiarisées » et souvent négociées, selon la logique prégnante dans l'agriculture française de la coproduction néocorporatiste (Muller, 1985). À cette complexité, il faut ajouter le délicat ajustement temporel entre les niveaux d'action et les initiatives : l'année 2023 par exemple a été charnière dans la mesure où débutaient à la fois la nouvelle Pac et la nouvelle planification environnementale et climatique européenne (la SNBC date, elle, de 2015), alors que la Pac avait été négociée (2017-2018) avant même ses traducteurs nationaux que sont les Plans stratégiques nationaux (validé en août 2022 en ce qui concerne le plan de la France). Écheveau et maquis organisationnels caractérisent bien cette architecture institutionnelle de la transition de l'agriculture française qui, pour finir, remet en question la cohérence de cette rencontre entre européanisations de politiques de transition climatique, incitations sectorielles et planifications nationales ambitieuses.

Les conditionalités climatiques européennes : entre multiniveau, subsidiarité, planification nationale et secteur agricole

La gouvernance des velléités climatiques de la Pac est extrêmement complexe. Les logiques de leur mise en œuvre sont à la fois multiniveaux, subsidiaires, territorialisées et sectorielles. Premièrement, si la Pac repose sur l'architecture de la subsidiarité (MAA, 2020), la définition de ses objectifs est multiniveau (Pac et PSN), dans la

mesure où elle s'encastre dans la planification nationale — pour les deux piliers de la Pac —, ce qui est d'ailleurs nouveau pour le premier pilier. Le principe de subsidiarité oblige cependant à la mettre en œuvre à travers la mobilisation des acteurs locaux autour de projets de développement climatisés par les objectifs (notamment pour le deuxième pilier de la Pac) : les financements sont croisés entre le Feader européen et ceux des niveaux subsidiaires des planifications de développement rurales locales. Les politiques d'adaptation de l'agriculture en France dépendent fortement des financements européens. La planification climatique française compte en effet ardemment sur les financements de la Pac. En ce qui concerne l'agriculture, la SNBC par exemple repose explicitement sur une architecture multiveau d'action et de financement pour amplifier une agroécologie soucieuse du climat. Dans ce cadre, le ministère de l'Agriculture a planifié l'effort climatique de l'agriculture sous la forme de six grandes priorités d'atténuation (dont réduire les émissions directes et indirectes de protoxyde d'azote, N_2O , et de méthane, CH_4 , en s'appuyant sur l'agroécologie et sur l'agriculture de précision) et d'adaptation (stopper le déstockage actuel de carbone des sols agricoles et inverser la tendance, en lien avec l'initiative « 4 pour 1 000 », les sols pour la sécurité alimentaire et le climat). Leur mise en œuvre est basée sur une logique de projets construits et articulés par les acteurs locaux, et cofinancés par les Maec européennes en premier lieu, ainsi que par les acteurs déconcentrés de l'État (MTES, 2020). Deuxièmement, la Pac repose sur une logique sectorielle : elle vise d'abord des objectifs agroiles et des acteurs économiques et administratifs agricoles (Bodiguel, 2014; Montouroy *et al.*, 2022). Si bien que ces conditionnalités européennes peuvent être contrariées par des dispositifs aux registres et aux objectifs très différents, voire opposés, lorsqu'elles s'encastrent localement dans les logiques propres au secteur agricole et aux filières, qui mettent en œuvre les Maec au plus près de leurs propres demandes (voir l'exemple des assurances agricoles, section « Entre recyclage et innovation incrémentale : les exemples des assurances climatiques, des mesures de la Pac et du label bas-carbone » de ce chapitre, p. 374), jusqu'à effacer le C des Maec (voir par exemple la filière Banane, Montouroy *et al.*, 2022).

La volonté d'intégration horizontale par le jeu complexe de planifications diverses

Une autre logique de mise en œuvre est celle de l'intégration des objectifs et des politiques grâce à une juxtaposition de planifications et de dispositifs. Par intégration il faut entendre la volonté de gérer les problèmes de façon horizontale, c'est-à-dire coordonnée et désectorisée, en évitant les « silos » (bureaucratiques notamment). De fait, la problématique climatique dans l'agriculture jouxte des domaines de politiques publiques connexes : notamment le foncier, l'énergie, la gestion quantitative de l'eau, la pollution des eaux et de l'air, la souveraineté alimentaire, la santé, la biodiversité, etc.

Les exemples du foncier agricole et de l'agrivoltaïsme sont caractéristiques de cet enchevêtement des enjeux et de la volonté de les gérer de manière intégrée. La rencontre entre le foncier, l'agriculture et le climat pose en effet des enjeux de taille : au-delà de celui de la préservation des terres au profit des usages agricoles, il y a l'enjeu de la préservation de la qualité des sols propices à la production agricole. La politique « zéro artificialisation nette » (ZAN) des sols d'ici 2050, initiée par la loi climat et résilience, tente de les gérer de manière horizontale : pour préserver quantitativement les terres et qualitativement

les sols ainsi que les ressources naturelles indispensables à l'activité agricole (sans risques de pollution, d'inondation, d'érosion ou de baisse de la biodiversité, qui entament les usages agricoles), l'objectif de la politique ZAN est d'intégrer la gestion du foncier agricole avec celle des autres secteurs en planifiant, densifiant et contraignant les autres usages du foncier (urbains, industriels, commerciaux), de façon à réduire drastiquement son artificialisation. La loi a établi un premier pas intermédiaire de réduction de moitié du rythme de la consommation d'espaces dans les dix prochaines années (2021-2031). Les objectifs ZAN ont été traduits dans le plan Biodiversité et doivent également être intégrés dans le schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet, document de planification régionale globale) dans un délai de deux ans et être rendus compatibles avec les plans locaux d'urbanisme communaux ou intercommunaux (PLUi), les schémas de cohérence territoriale (SCoT), et les schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE).

Cette logique d'intégration horizontale est identique pour l'agrivoltaïsme qui est intégré dans les planifications énergétiques renouvelables et foncières locales qui sont censées réguler les implantations d'installations agrivoltaïques : un comité régional de l'énergie, composé de représentants d'administrations et de représentants des secteurs concernés, fixe (notamment le nombre de projets à installer et le montant du complément de rémunération des agriculteurs, leurs caractéristiques techniques, etc.), suit et évalue la mise en œuvre des objectifs de développement des énergies renouvelables selon les orientations établies par le Sraddet. Le déploiement des installations photovoltaïques en zone agricole dépend cependant des appels d'offres de ce comité régional de l'énergie dont la régulation contrarie cette volonté de gestion horizontale de l'agrivoltaïsme en redonnant aux acteurs du secteur agricole la possibilité de reprioriser les logiques du secteur au détriment de la volonté initiale de déssectoriser. Ainsi, d'un territoire à l'autre, les acteurs agricoles (FDSEA, JA, Confédération paysanne, organisations de filières, etc.) ne partagent pas de position unifiée sur la question, de même que les pouvoirs publics locaux (préfet, CDPENAF, collectivités locales, entreprises coopératives, etc.), qui assurent pourtant la régulation de ces projets sur les territoires, laissent apparaître des logiques d'attributions et de rémunérations des agriculteurs très disparates. Des projets agrivoltaïques particulièrement hétérogènes émergent dans les territoires (Hrabanski *et al.*, 2024), formant un «système énergétique agriterritorial» (Tritz, 2012) local, porté par des coalitions hétéroclites d'acteurs locaux et dont les retombées contribuent au développement du territoire (Cointe, 2016).

L'emprise du néocorporatisme agricole et des différents secteurs sur la définition et sur la mise en œuvre des dispositifs climatiques

Ainsi, parallèlement à la montée en puissance de la logique d'intégration horizontale de la gestion du climat, les logiques néocorporatistes et sectorielles demeurent. Cette contradiction traverse les politiques d'adaptation.

Le meilleur exemple est celui du plan Gel de 2021, déployé à la suite des épisodes de gel de 2021 qui ont massivement touché l'agriculture française. Ce plan, composite, assemblait à la fois un fonds d'urgence (20 millions d'euros), une prise en charge des cotisations sociales (170 millions d'euros), des prêts garantis et d'intégration des entreprises agricoles dans le régime d'activité partielle durant la Covid-19, qui donnaient accès à des dégrèvements de taxes foncières sur le non-bâti et à des aides, à une indemnisation selon

les calamités agricoles (500 millions d'euros), à une compensation des pertes subies pour les entreprises des filières touchées et au doublement de l'enveloppe en faveur des équipements de protection des cultures contre l'aléa gel (200 millions d'euros). Sur le fond, les objectifs répondent bien aux demandes de compensations financières des aléas climatiques. Sur la forme, la gouvernance de ces aides a donné lieu à des tractations, filière par filière, très classiques dans le néocorporatisme agricole français : les cadrages et les ajustements techniques et financiers de ce plan Gel (celui-ci purement sectoriel) étaient l'apanage des négociations directes entre le ministère de l'Agriculture et les représentants des filières, au niveau national, et étaient mis en œuvre sans laisser aucune marge de manœuvre par les administrations déconcentrées de l'État (DDT et France Agrimer). Des mesures équivalentes des collectivités territoriales ont complété ces aides, négociées selon la même logique néocorporatiste. Cette logique néocorporatiste persistante semble donc prioriser des réponses aux vulnérabilités et aux variabilités climatiques à court terme ajustées essentiellement aux demandes du secteur, plus particulièrement des filières, et par là même marginaliser les réponses aux adaptations et aux impacts de long terme du changement climatique (Dupuis et Knoepfel, 2013 et 2015).

Ainsi, ces exemples montrent que les politiques climatiques touchant l'avenir de l'agriculture sont multiples, à la fois dans leur provenance, dans leur mode de gestion et dans leurs objectifs. Cette complexité remet bel et bien en question la cohérence de ces politiques et de leur mise en œuvre. Cet éclatement conduit soit à des tentatives complexes d'emboîtement vertical (financements multiniveaux) ou horizontal (planification qui désectorise), soit à la juxtaposition de logiques différentes : sectorielles, néocorporatistes, planificatrices. L'analyse plaide pour un tournant en faveur d'une sobriété institutionnelle et instrumentale, plutôt que d'alimenter la tendance à l'inflation de nouveaux dispositifs, qui plus est à coûts constants. Les voies identifiables vers cette sobriété peuvent paraître contradictoires. Premièrement, celle de l'Union européenne qui prône une meilleure planification multiniveau couplée à une subsidiarité renforcée. Le risque d'incohérence avait parfaitement été identifié par l'Union européenne lors de la dernière réforme de la Pac à la fin des années 2010, d'où l'actuel article 97 de la Pac cherchant à renforcer la subsidiarité et la flexibilité des États pour décliner les objectifs européens, notamment en matière de durabilité et de climat, en comprimant leurs efforts dans le PSN censé assurer la cohérence entre les objectifs européens et étatiques. Toutefois, ce PSN ne répond qu'à la partie multiniveau de la complexité de la gouvernance. Deuxièmement, c'est par les territoires que cette sobriété peut aussi être atteinte. Un point commun unit en effet les trois entrées de la complexité de la marque-terre institutionnelle identifiées dans cette troisième partie : le rôle important joué par les acteurs locaux pour la mise en œuvre des politiques climatiques (Berriet-Sollic et Trouvé, 2010). Un renforcement de la territorialisation serait-il la clé de réussite de la transition agricole qui permettrait de mettre en cohérence les logiques dispersées et complexes européennes, sectorielles et de planification intégrative (Caron *et al.*, 2017) ? Troisièmement, faut-il au contraire focaliser la gouvernance sur les organisations sectorielles publiques qui portent la mise en œuvre des instruments existants (conseil agricole pour l'innovation, chambres d'agriculture, etc.) et sur leurs capacités à coproduire les politiques avec les acteurs du secteur ? Une telle réponse demanderait alors d'orienter bien davantage ces instruments vers une adaptation transformationnelle, afin d'éviter qu'ils ne soient principalement orientés, comme cela est le cas aujourd'hui, vers la gestion à court terme des vulnérabilités et des variabilités.

► Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord démontré que la thématique de l'atténuation et de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique a été mise à l'agenda politique tardivement, à la fois à l'échelle des négociations internationales du climat, à l'échelle de l'Union européenne, notamment de la Pac, et dans les politiques agricoles mises en place en France. L'analyse a ensuite mis en avant le développement progressif d'innovations institutionnelles en faveur de l'atténuation et de l'adaptation de l'agriculture dans les politiques agricoles et au-delà, tout en montrant que ces nouveaux instruments sont majoritairement recyclés, limitant ainsi leur caractère innovant ainsi que leur portée. Enfin, la complexité de l'architecture institutionnelle et de la gouvernance des politiques agricoles révèle également que le risque climatique n'est pas seulement physique : il existe bel et bien un risque de mauvaise gouvernance de la réponse adéquate à l'urgence climatique. Dans le même temps, le chapitre a mis en évidence plusieurs chantiers institutionnels proposant des clés de résolution pour les enjeux associés au changement climatique. Le premier chantier porte sur la mise en place d'une planification territorialisée cohérente, avec un objectif de sobriété institutionnelle et instrumentale, tout en assurant une cohérence entre les politiques mises en œuvre, notamment, au niveau sectoriel, y compris pour le secteur agricole. Le second chantier concerne la conception de politiques climatiques mobilisant des approches participatives au niveau territorial et sur un périmètre d'action multisectoriel. Ces politiques visent à favoriser l'engagement citoyen sur des actions concrètes d'atténuation et d'adaptation au changement climatique au sein des territoires. Cet engagement passe principalement par la mobilisation d'acteurs privés (agriculteurs, banques, organisation de filières, agro-industrie, etc.) dans une logique climatique, de façon à financer prioritairement des politiques agricoles focalisées sur ces objectifs climatiques.

Le décryptage des chantiers institutionnels ci-dessus permet par exemple de lire deux enjeux majeurs pour l'agriculture, mais qui dépassent ce seul secteur, pour interroger ses interactions avec d'autres activités. Le premier concerne le lien eau-agriculture-climat, à savoir la manière dont les politiques et l'action publique, au niveau d'un territoire donné, coordonnent et accompagnent un mode d'accès équilibré et un partage négocié de la ressource en eau. La recherche d'une trajectoire d'utilisation durable de la ressource satisfaisant les multiples usages locaux (de plus en plus concurrents), et ce, dans une perspective la plus circulaire possible, pousse à s'interroger de façon plus générale sur la place de l'eau dans les territoires au-delà du secteur agricole, avec l'exemple emblématique des mégabassines. Ces dispositifs de retenues de substitution jouent sur un transfert des ressources souterraines en eau d'une période de plus grande disponibilité (hiver) vers le printemps et l'été, saisons de tension sur la ressource aggravée par le changement climatique. Les conditions d'accès à ces ressources par les irrigants sur le périmètre hydrologique de la retenue, la rentabilité et l'efficacité de ces systèmes, ainsi que l'impact sur l'écosystème du pompage vers les bassins en surface sont autant de paramètres qui sont des sources de conflits et que les institutions en charge du climat doivent intégrer dans les solutions à apporter.

Le second enjeu porte sur la contribution du secteur agricole à la décarbonation de l'économie française et, au-delà, à l'atténuation du changement climatique en général (et à l'adaptation à celui-ci). La contribution de l'agriculture à l'atténuation du changement climatique passe ainsi par la réduction de l'utilisation d'énergies fossiles dans la

production agricole (carburant, intrants chimiques) et par la substitution partielle des énergies fossiles par la production d'énergies renouvelables (biocarburants, biogaz et agrivoltaïsme) (Hrabanski *et al.*, 2024). Une autre voie concerne le stockage du carbone dans les sols et dans les végétaux (couverts agricoles, prairies et forêts), favorisé par des systèmes agricoles gérant de façon adaptée le cycle du carbone dans les agroécosystèmes.

De la même manière que le lien eau-agriculture-climat évoqué plus haut, le lien agriculture-énergie nous pousse à nous interroger sur la place de l'agriculture dans les territoires ainsi que sur la cohérence entre les politiques agricoles et climatiques. Ces deux exemples illustrent les enjeux portés par la nécessaire transformation de la place de l'agriculteur au sein de nos sociétés affectées par le changement climatique. Plus précisément, au-delà des chantiers institutionnels précités, il existe des enjeux politiques majeurs, au niveau international, européen et national, afin de rendre compatible les politiques agricoles actuelles avec le changement climatique. Ces enjeux posent 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.

► Références

- Aykut S.C., Foyer J., Morena E., 2017. *Globalising the Climate: COP21 and the Climatisation of Global Debates*, Routledge, Taylor & Francis Group, 214 p, <https://doi.org/10.4324/9781315560595>.
- Barnett J., O'Neill S., 2010. Maladaptation, *Global Environmental Change*, 20(2), 211-213, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004>.
- Bemelmans-Videc M.-L., Rist R.C., Vedung E.O., 2011. *Carrots, Sticks, and Sermons: Policy Instruments and Their Evaluation*, Transaction Publishers.
- Berriet-Sollicec M., Trouvé A., 2010. Chapitre 13 : La politique agricole commune est-elle territoriale ?, in *Les Mondes agricoles en politique*, Presses de Sciences Po, 397-413, <https://doi.org/10.3917/scpo.hervi.2010.01.397>.
- Bodiguel L., 2014. Lutter contre le changement climatique : Le nouveau leitmotiv de la politique agricole commune, *Revue de l'Union européenne*, 580, 414-426.
- Bodiguel L., 2017. La politique agricole commune face à la question climatique : L'Accord de Paris change-t-il la donne ?, *Revue juridique de l'environnement*, hors-série, 17, 169-185.
- Bonvillain T., Rogissart L., Féret S., 2024. Estimation des dépenses publiques liées aux crises agricoles en France entre 2013 et 2022, rapport pour IC4E (Institute for Climate Economics), Paris, 36 p.
- Caron P., Treyer S., 2016. Climate-smart agriculture and international climate change negotiation forums, in E. Torquebiau (Ed.), *Climate Change and Agriculture Worldwide*, Springer Pays-Bas, 325-336, https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_25.
- Caron P., Valette É., Wassenaar T., Coppens d'Eeckenbrugge G., Papazian V., 2017. *Des territoires vivants pour transformer le monde*, Versailles, éditions Quæ, 280 p.
- Cointe B., 2016. Le tarif d'achat photovoltaïque comme outil d'innovation territoriale : L'exemple des Fermes de Figeac, *VertigO*, 16(1), 20 p., <https://doi.org/10.4000/vertigo.17040>.
- Dantec R., Roux J.-Y., 2019. *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : Urgence déclarée*, rapport d'information Sénat n° 511, p. 190, <https://www.senat.fr/rap/r18-511/r18-511.html>.
- Dupuis J., Knoepfel P., 2013. The adaptation policy paradox: The implementation deficit of policies framed as climate change adaptation, *Ecology and Society*, 18(4), 31, <https://www.jstor.org/stable/26269408>.
- Dupuis J., Knoepfel P., 2015. *The Politics of Contaminated Sites Management: Institutional Regime Change and Actors' Mode of Participation in the Environmental Management of the Bonfol Chemical Waste Landfill in Switzerland*, Springer, 159 p.

- Foyer J., 2016. Dans les coulisses de la COP21, *La Vie des idées*, <https://laviedesidees.fr/Dans-les-coulisses-de-la-COP21.html>.
- Halpern C., Le Galès P., 2011. Pas d'action publique autonome sans instruments propres : Analyse comparée et longitudinale des politiques environnementales et urbaines de l'Union européenne, *Revue française de science politique*, 61(1), 51, <https://doi.org/10.3917/rfsp.611.0051>.
- Henstra D., 2016. The tools of climate adaptation policy: Analysing instruments and instrument selection, *Climate Policy*, 16(4), 496-521, <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1015946>.
- Hood C., 1983. 2. Advice, Information, Persuasion, in C. Hood (Ed.), *The Tools of Government*, Macmillan Education, Royaume-Uni, 21-39, https://doi.org/10.1007/978-1-349-17169-9_2.
- 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., Montouroy Y., 2022. Les «climatisations» différenciées de l'action publique. Normaliser l'étude du problème « changement climatique », *Gouvernement et action publique*, 11(3), 9-31, <https://doi.org/10.3917/gap.223.0009>.
- 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*, 105, 45-71, <https://doi.org/10.1007/s41130-024-00204-1>.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Genève, Suisse.
- Kates R.W., Travis W.R., Wilbanks T.J., 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 109(19), 7156-161, <https://doi.org/10.1073/pnas.1115521109>.
- Koenig R., Brunette M., 2024. Climate change perception, impact and adaptation: Implications for crop insurance development, *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, <https://doi.org/10.1007/s41130-024-00218-9>.
- MAA, 2020. PAC et subsidiarité : Vers une nouvelle gouvernance agricole européenne ?, analyse n° 148, Centre d'études et de prospective, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, <https://agriculture.gouv.fr/pac-et-subsidiarite-vers-une-nouvelle-gouvernance-agricole-europeenne-analyse-ndeg148>.
- 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*, 11(3), 127-152, <https://doi.org/10.3917/gap.223.0127>.
- MTES, 2020. La stratégie bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, synthèse, ministère de la Transition écologique et solidaire, 32 p., <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>.
- Muller P., 1985. Un schéma d'analyse des politiques sectorielles. *Revue française de science politique*, 35(2), 165-189.
- O'Hare P., White I., Connelly A., 2016. Insurance as maladaptation: Resilience and the 'business as usual' paradox, *Environment and Planning C: Government and Policy*, 34(6), 1175-1193, <https://doi.org/10.1177/0263774X15602022>.
- 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, <https://doi.org/10.1080/1523908X.2020.1792862>.
- Padioleau J.-G., 1982. *L'État au concret*, Presses universitaires de France.
- Panda A., 2018. Transformational adaptation of agricultural systems to climate change, *WIREs Climate Change*, 9(4), e520, <https://doi.org/10.1002/wcc.520>.

- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.-P. *et al.*, 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture, *Environmental Science and Policy*, 77, 130-139, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.003>.
- Termeer C.J.A.M., Dewulf A., Biesbroek G.R., 2016. Transformational change: Governance interventions for climate change adaptation from a continuous change perspective, *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(4), 558-576, <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1168288>.
- Tritz Y., 2012. Le Système énergétique agri-territorial : Les bioénergies comme outil de développement local, *Géographie, économie, société*, 14(1), 31-52.
- Vespa M., 2002. Climate Change 2001: Kyoto at Bonn and Marrakech, *Ecology Law Quarterly*, 29(2), 395-420.

Conclusion et perspectives

*Philippe Debaeke, Nina Graveline, Barbara Lacor, Sylvain Pellerin,
David Renaudeau, Éric Sauquet*

Au terme de cet ouvrage, le lecteur aura, nous l'espérons, mieux perçu les relations entre l'agriculture et le changement climatique, qu'il s'agisse en particulier des impacts positifs ou négatifs sur la production agricole et sur la santé des agrosystèmes, mais aussi des stratégies d'adaptation et d'atténuation pouvant être déployées à court ou plus long terme.

► Un contexte de travail complexe

Il apparaît en premier lieu que le contexte de travail (climatique, socio-économique, réglementaire, etc.) est devenu beaucoup plus complexe et incertain pour les acteurs agricoles, mais aussi pour les chercheurs. En effet, si l'on se limite au seul enjeu climatique, il faut pouvoir prendre en compte à la fois les tendances d'évolution sur le moyen et le long terme, la variabilité interannuelle, mais aussi les événements extrêmes, plus difficiles encore à envisager.

Par ailleurs, la prise en compte des nombreuses sources d'incertitudes liées aux évolutions climatiques (tant pour les modèles globaux que pour les modèles régionaux) et à ses impacts (en raison du domaine de validité des modèles de culture, par exemple) est indispensable mais complexe à intégrer. Dans le même temps, les conditions météorologiques occultent parfois les évolutions à plus long terme (certaines années, dans certaines régions) et peuvent masquer temporairement l'ampleur des processus en cours et freiner les adaptations à réaliser.

Les climatologues nous montrent pourtant que ces évolutions vont se poursuivre et se renforcer dans les prochaines décennies en lien avec les niveaux de réchauffement qui seront atteints. De plus, malgré des incertitudes encore fortes sur le sens d'évolution de certaines variables atmosphériques comme les précipitations, les simulations convergent pour prédire un renforcement des contrastes saisonniers et géographiques. De même, des changements dans les régimes hydrologiques ont pu être constatés. Ils seront suivis de changements de plus grande ampleur concernant l'eau bleue et sa disponibilité, dont les usages sont souvent conflictuels.

L'évolution de la dynamique des bioagresseurs et de leurs impacts sur les cultures et les animaux est plus complexe encore à anticiper, en raison de la multitude de bioagresseurs, de leurs caractéristiques biologiques et écologiques, et des facteurs

agronomiques et environnementaux qui jouent sur leur dynamique. Une incertitude demeure notamment sur le cortège de bioagresseurs et d'auxiliaires qui seront présents, en particulier parce qu'il est difficile de prévoir dans le temps les introductions et les disparitions d'espèces sur le territoire.

Même si nous l'avons peu évoqué dans cet ouvrage, les impacts sur le rendement des cultures et sur le changement des aires de production auront des conséquences importantes pour l'économie, pour l'aménagement de l'espace et pour la structuration des filières agricoles. La plus forte incertitude attendue sur les volumes récoltés (en particulier du fait d'aléas et de situations climatiques extrêmes) risque d'engendrer des aléas sur les marchés et des problèmes financiers pour les agriculteurs. Cela appelle à renforcer les mécanismes individuels et collectifs de gestion du risque (stockage, assurance, etc.) et prévenir la spéculation.

Cette incertitude invite à renouveler les méthodes et les stratégies à promouvoir. Il faut donc favoriser des systèmes plus robustes (capables de faire face à des environnements variables) et plus résilients (capables de rebondir et de s'adapter après un choc), tout en évitant la maladaptation qui provoque un accroissement de la vulnérabilité au changement climatique et une altération des capacités actuelles et futures d'adaptation.

L'une de ces voies d'adaptation est le développement des pratiques agroécologiques qui se traduisent en particulier par l'introduction d'une plus forte biodiversité cultivée dans le temps et dans l'espace (rotations longues, couverts intermédiaires, associations d'espèces, agroforesterie, valorisation de la diversité génétique des animaux, etc.) et pour lesquelles il a été montré un renforcement de la résilience au changement climatique et de multiples cobénéfices. Il faudra cependant mieux évaluer la productivité que les systèmes agroécologiques pourraient atteindre dans la perspective d'un déploiement à large échelle.

Enfin, quelles que soient les filières et les options choisies, la mise en application et l'évaluation de solutions d'adaptation et d'atténuation nécessiteront un fort besoin d'ingénierie mais aussi d'accompagnement et de formation des acteurs.

► Face aux demandes sociétales, comment la recherche s'organise-t-elle ?

Historiquement, le système national de recherche et de développement dans le domaine de l'agriculture s'est organisé par grandes filières de production (végétale, animale) et par grands domaines disciplinaires (génétique, nutrition, santé des plantes et des animaux, transformation des produits, etc.), avec une recherche majoritairement monodisciplinaire et analytique. Ce mode d'organisation s'est révélé efficace pour accompagner l'augmentation de la production et l'optimisation de l'utilisation des intrants jusque dans les années 1980, en permettant d'identifier et d'actionner différents leviers (sélection de variétés ou races plus productives, raisonnement de la fertilisation, optimisation de l'alimentation animale, maîtrise des bioagresseurs par des produits phytosanitaires, etc.). L'émergence des enjeux liés à l'environnement et à la santé, comme ceux liés à la contamination des eaux par les nitrates ou à l'usage excessif de produits phytosanitaires et d'antibiotiques, a révélé plusieurs limites à ce système. La mise en place de grands programmes transversaux (pour la lutte contre les algues vertes ou pour la réduction de l'usage des produits phytosanitaires), motivée par un

besoin d'appui aux politiques publiques, a permis de prendre en charge ces enjeux de manière intersectorielle. La publication des rapports successifs du Giec, la confirmation d'un changement climatique en cours et à venir, ses impacts prévisibles sur le secteur agricole et la contribution de ce secteur aux émissions ont conduit le système de recherche agronomique français à s'emparer de ce sujet dès les années 1990.

Les recherches ont d'abord visé à caractériser l'impact du changement climatique sur les processus impliqués dans la production (effet sur la phénologie des plantes, sur la photosynthèse, sur les rendements, sur les performances des animaux d'élevage, etc.), puis à identifier des leviers d'adaptation (variétés adaptées, modification des dates de semis, etc.) ainsi que des leviers d'atténuation des émissions (réduction des émissions de méthane par les ruminants, mise en place de pratiques pour le stockage de carbone, etc.), et ce, par grandes filières de production et en traitant les questions d'adaptation et d'atténuation plutôt séparément. Le changement climatique, parce qu'il affecte la plupart des étapes et des processus conduisant à la production de notre alimentation (disponibilité en eau, croissance et développement des plantes et des animaux, cycle des bioagresseurs, qualité des produits, etc.) ainsi que leurs interactions au sein des systèmes de production et des filières (production fourragère et alimentation des animaux par exemple), nécessite, plus encore que les autres enjeux environnementaux, une approche systémique et globale pour appréhender la complexité de ses impacts et pour proposer des solutions adaptées sur le court et le long terme. L'existence d'effets directs et indirects à différentes échelles spatiales et temporelles (au sein des territoires ou *via* les marchés notamment), l'objectif conjoint d'adaptation et d'atténuation et l'accent mis sur la recherche de résilience plutôt que sur la maximisation de la productivité renforcent encore le besoin d'identifier des solutions de nature systémique, mobilisant des leviers issus de plusieurs disciplines scientifiques. Le maintien d'une « fragmentation » disciplinaire des communautés scientifiques (par exemple entre les communautés travaillant sur l'adaptation et celles travaillant sur l'atténuation) ou des approches à des échelles spatiales, temporelles ou organisationnelles très différentes risqueraient soit de produire une recherche inutile ou d'accroître le risque de maladaptation. Cela n'exclut pas l'intérêt de solutions techniques monosectorielles (par exemple un génotype adapté à une moindre disponibilité en eau, des additifs alimentaires pour réduire les émissions de méthane des ruminants), mais les résultats actuellement disponibles montrent que ces solutions techniques monodisciplinaires risquent de ne pas suffire à long terme et qu'elles doivent donc être envisagées et évaluées conjointement avec des méthodes interdisciplinaires qui peuvent intégrer une diversité d'actions relevant de disciplines et de niveaux d'interventions différents. En plus de maintenir un effort de recherche disciplinaire visant l'identification et la mise en œuvre de leviers d'adaptation et d'atténuation par filière ou par processus, la recherche a donc mis en place des programmes ambitieux et interdisciplinaires, comme les métaprogrammes Accaf et plus récemment CLIMAE à INRAE.

Au-delà de l'interdisciplinarité nécessaire, la recherche doit faire évoluer ses méthodes et ses métiers, en particulier pour garder une proximité avec le terrain et pour être en mesure d'éclairer les politiques publiques. Historiquement, la recherche en agriculture s'est fortement basée sur l'expérimentation et le test de solutions en vraie grandeur, en stations expérimentales, avant leur diffusion. Très vite, la complexité des systèmes étudiés et la nécessité de se projeter vers le futur a conduit à compléter

l'observation et l'expérimentation par la modélisation. La multiplication des enjeux (eau, pesticides), la diversification des acteurs concernés (agriculteurs, transformateurs, consommateurs, décideurs) et les progrès des connaissances sur les processus d'innovation ont contribué à développer de nouvelles façons de faire de la recherche, à des niveaux d'organisation plus englobants (exploitation, filière, territoire), impliquant davantage les acteurs (approches participatives, coconstruction et évaluation multicritère de scénarios), avec une montée en puissance de l'échelle territoriale et un besoin croissant d'implication des sciences humaines et sociales. Les enjeux d'adaptation de l'agriculture au climat futur, et de réduction de ses émissions, du fait de leur complexité et de leurs implications techniques, économiques et sociales, renforcent encore le besoin d'une recherche associant les acteurs. Il s'agit en effet d'identifier des trajectoires d'évolution assurant la résilience des systèmes agricoles et des territoires sous différents scénarios climatiques, réduisant leurs émissions tout en étant acceptables économiquement et socialement. La complexification des attentes de la société vis-à-vis de l'agriculture, comme la contribution à la production d'énergie renouvelable, vient encore renforcer ce besoin d'interaction avec d'autres secteurs et acteurs, au-delà du périmètre agricole.

Enfin, une question importante que se pose la recherche est celle de l'horizon temporel dans lequel s'inscrire en priorité, tout en tenant compte de la nécessité de travailler aux différentes échelles. L'existence de leviers d'adaptation facilement mobilisables à court terme (choix des variétés, des dates de semis, etc.) et la perspective d'une maîtrise des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial avec une limitation du réchauffement en deçà de + 1,5 °C (Accord de Paris de 2015) auraient pu conduire à l'idée que la recherche devait se concentrer sur l'atténuation et sur les stratégies d'adaptation à mobiliser à plus long terme. Les manifestations récentes du changement climatique, avec une multiplication d'événements extrêmes affectant les récoltes (gels, sécheresses, canicules, pluies intenses, etc.), ont renforcé le besoin d'identification de solutions et de stratégies d'adaptation à la variabilité climatique actuelle favorisant une plus grande résilience des systèmes. Pour autant, l'effort de réflexion sur les stratégies d'adaptation à plus long terme ne doit pas être relâché, car certaines de ces stratégies doivent être examinées et mises en œuvre dès maintenant (sélection de nouvelles variétés pour les espèces pérennes, réorientation de schémas génétiques actuels, par exemple). L'effort d'atténuation des émissions du secteur agricole et le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse supposent l'identification de trajectoires d'évolution des systèmes à moyen et long terme, avec des objectifs désormais encadrés par les politiques publiques climatiques (neutralité carbone en 2050). En fait, c'est une trajectoire d'évolution des systèmes et des territoires qu'il faut identifier; trajectoire qui ferait se succéder des adaptations efficaces sur un court terme permettant, voire facilitant des évolutions à plus long terme, et combinant adaptation, atténuation et recherche de résilience dans un contexte climatique en constante évolution.

Cela conduit également à renforcer le partenariat international, notamment avec les pays qui doivent s'adapter aujourd'hui aux conditions climatiques que nos territoires rencontreront demain.

Enfin, il est attendu de la recherche qu'elle joue un rôle de sensibilisation et de vulgarisation auprès du grand public par des communications accessibles, des prises de parole lors de débats citoyens ou au travers des médias par exemple.

► Les chantiers futurs de la recherche

L'enjeu principal que constitue le changement climatique pour l'agriculture impose au monde de la recherche de mobiliser (1) la recherche académique (par exemple en génétique ou en économie), (2) la recherche-action en partenariat avec les acteurs de terrain et (3) l'appui aux politiques publiques pour fournir les connaissances *ad hoc* pour l'aide à la décision. Établir des liens dynamiques et vivants entre ces différentes postures est un enjeu fort, exigé par l'urgence de la question climatique.

De manière analogue, la recherche ne doit pas privilégier l'un ou l'autre des types de gradients et de stratégies associés : court *versus* long terme, incrémental *versus* transformatif ou en rupture. Elle doit s'organiser pour travailler sur ces différents objets de manière complémentaire, en mobilisant des profils d'acteurs variés issus du terrain, des filières et des politiques publiques. Cette complémentarité n'est pas évidente, comme cela a été soulevé dans cet ouvrage, notamment en ce qui concerne l'articulation entre le court et le long terme et l'implication des acteurs de terrain sur la prise en compte d'enjeux de long terme.

La considération du temps long dans cette problématique climatique invite la recherche à réinvestir dans le champ de la prospective exploratoire et stratégique. En effet, celle-ci permet d'adopter une vision systémique où peuvent cohabiter les systèmes alimentaires, agricoles et écologiques, soit l'ensemble des chaînes de valeur agricoles situées dans un territoire et dans un environnement, et leurs différents enjeux, dont le climat. La prospective doit être vue comme une façon d'expérimenter des mondes alternatifs avec des modèles économiques agricoles différents, qui peuvent interagir avec des exercices de modélisation.

Poursuivre la production, la mise à disposition et l'analyse des données par le biais de services climatiques

Les mutations qui affectent l'agriculture ne pourront être engagées sans données objectives et sans accompagnement dans la prise en main de ces données. Les données requises sont en premier lieu celles du climat : elles contextualisent le climat futur à différentes échéances, sur la base de projections numériques avec, en entrée, les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les politiques de sciences ouvertes incitent les chercheurs, notamment les climatologues, à mettre à disposition leurs données de manière ouverte. Mais cet accès facilité n'est pas suffisant : les retours d'utilisateurs de ces données sur de précédents exercices montrent la difficulté de leur prise en main devant un ensemble foisonnant de projections. Ainsi, une interrogation classique est la suivante : faute de pouvoir traiter toutes les données, comment extraire un ensemble réduit rendant compte à la fois d'une cohérence et d'une représentativité de futurs possibles, mais également des incertitudes associées ? Les chercheurs et les parties prenantes doivent dialoguer et s'associer pour améliorer et accélérer l'appropriation et l'utilisation des résultats à l'avenir. Cette coconstruction, qui vise l'élaboration de services agro-hydroclimatiques, nécessite un regard croisé : quelles exigences en matière de variables, de résolution spatio-temporelle des parties prenantes ? Quelle disponibilité de données ? Quelles bonnes pratiques conseiller ? Comment mieux articuler les offres de services actuelles ? Elle s'inscrit nécessairement dans un processus itératif mobilisant des approches participatives et pluridisciplinaires, si l'on souhaite une audience large en amont de la mise à disposition de ces données.

Mettre en place des observatoires de l'adaptation

Il subsiste également un enjeu d'acquisition et d'analyse de données afin de documenter les territoires et les filières agricoles, et d'améliorer les connaissances sur les risques et les vulnérabilités liés au changement climatique, sur les processus d'adaptation et sur l'efficacité de certaines pratiques, actions ou politiques publiques. On pourrait imaginer construire des observatoires de filières ou de territoires, notamment pour appréhender les changements sur le temps long et pour suivre des indicateurs clés, en soutien aux politiques publiques ou de filières et aux groupes régionaux d'experts sur le climat (Grec). Ceux-ci pourraient être mis à profit pour la sensibilisation des acteurs de la filière, intégrés dans des outils d'évaluation, tout en servant de données primaires pour la recherche.

Mesures et stratégies phares : agroécologie et gestion de l'eau

Promesse d'une approche de reconception des systèmes agricoles qui s'appuie sur les écosystèmes et le sol, l'agroécologie répond à l'exigence à la fois de réduction des pesticides et d'accroissement de la résilience des exploitations. Elle est largement promue par une partie de la recherche agricole, mais l'effort de recherche doit être poursuivi afin de démontrer dans quelle condition celle-ci peut effectivement se substituer et à quelle échelle au système dominant conventionnel peu diversifié. Si les effets sur les écosystèmes sont démontrés, la généralisation de ces pratiques en modèle économique et social pouvant supplanter le précédent modèle est encore à démontrer. Les sciences humaines et sociales ainsi que la pratique de l'interdisciplinarité entre sciences biophysiques et humaines jouent ici un rôle clé incontestable. La gestion de l'eau bleue et de l'eau verte (stock d'eau du sol) doit également faire l'objet de recherches renouvelées en interaction avec la recherche agronomique et les sciences sociales, pour faire face au défi d'une gestion durable et équilibrée de ce bien commun.

Poursuivre la recherche pour approfondir les connaissances sur certains processus biologiques et réduire les incertitudes

Ainsi, la compréhension de processus clés du développement chez certaines espèces végétales, comme la dormance des espèces ligneuses (arbres fruitiers ou vigne) ou la résistance des plantes à des stress biotiques et abiotiques (thermique, hydrique), mais aussi la compréhension des mécanismes d'adaptation à la chaleur chez les animaux, etc., demeurent des questions cruciales qui restent à approfondir. L'exploration de nouvelles combinaisons de facteurs climatiques, agronomiques, mais aussi biologiques à travers les interactions entre bioagresseurs, ou entre bioagresseurs et ennemis naturels, s'avère déterminante pour accompagner la transition des agrosystèmes.

Les études prospectives et leurs conclusions aux différentes échelles spatio-temporelles présentent encore aujourd'hui des incertitudes, parfois jugées trop fortes par les parties prenantes pour un passage à l'action et pour la mise en place de stratégies d'adaptation. Des progrès sont attendus sur les modèles d'impact par un apport de connaissances *via* des données actualisées et par une amélioration des représentations des processus biophysiques qu'ils décrivent, mais toute l'incertitude ne pourra être réduite et les méthodes d'interprétation et la façon de construire des trajectoires et des stratégies doivent l'intégrer.

Les recherches futures devront concerner la modélisation (1) du cycle de l'eau (comme les échanges entre les nappes et les rivières en période d'étiage), (2) des usages de l'eau (pour une représentation des pratiques agricoles et des comportements, par exemple), (3) des impacts sur la production agricole (entre autres, les processus de mise en réserve et de développement racinaire pour la vigne et les fruitiers). Ces modélisations améliorées devront s'appuyer sur des couplages de modèles (hydrologique, économique, agronomique) et intégrer les emboîtements d'échelles comme les effets cumulés de pratiques de conservation des sols ou des impacts des retenues collinaires sur la ressource en eau à l'échelle d'un territoire ou d'un grand bassin-versant. La plupart de ces modèles ont aujourd'hui une capacité limitée à représenter l'impact de contextes éloignés de la situation de référence ou calibrée, ce qui explique pour certains l'absence de robustesse ou de confiance des conclusions. Ces limites et enjeux associés constituent également des défis pour la recherche au cours des années à venir.

Synergies, antagonismes et compromis dans la conception et l'évaluation

Souvent participatifs, les travaux de la recherche pour l'accompagnement du monde agricole doivent se développer et englober des échelles ou des objectifs plus larges pour répondre aux différents enjeux. Il faut abandonner les analyses qui raisonnent en silo pour appréhender les synergies et les antagonismes avec d'autres objectifs que ceux de l'adaptation ou de l'atténuation au changement climatique. Si sur le terrain les acteurs font émerger spontanément des problématiques multi-enjeux, c'est moins le cas dans les modèles nécessairement simplificateurs. La question de l'évaluation des stratégies et des mesures d'adaptation et d'atténuation doit être au cœur des programmes de recherche sur le changement climatique et sur l'agriculture pour pouvoir contribuer à l'aide à la décision collective et publique. Là encore, les approches d'évaluations multicritères et multihorizons doivent se développer pour mettre en évidence les synergies ou les compromis envisageables. C'est ainsi que la recherche pourra contribuer davantage au débat sur les adaptations robustes ou sur les maladaptations éventuelles, en s'appuyant sur des données factuelles d'observation ou de modélisation. L'irrigation est à ce titre un bel exemple : comme les autres actions ou interventions, sa contribution à l'adaptation doit être explicitée et quantifiée, ainsi que les risques et les conditions dans lesquels elle pourrait devenir une maladaptation.

Tous ces objectifs sont clairement inscrits dans la feuille de route INRAE2030 qui va guider les travaux de l'institut sur l'agriculture et le changement climatique au cours des prochaines années.

Liste des auteurs

Maël Aubry, US AgroClim, INRAE,
228, route de l'Aérodrome,
84914 Avignon Cedex 9

Jean-Christophe Bambou, UR ASSET, INRAE,
domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg

Marie-Odile Bancal, UMR ECOSYS,
AgroParisTech, INRAE,
campus Agro Paris-Saclay,
22, place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

Annette Berard, UMR EMMAH, INRAE,
domaine Saint-Paul, site Agroparc,
84914 Avignon Cedex 9

Gabrielle Bouleau, UMR LISIS, INRAE,
université Paris-Est Marne-la-Vallée
Cité Descartes, 5 boulevard Descartes,
Champs-sur-Marne,
77454 Marne-la-Vallée Cedex 02

Bétina Boutroue, UMR ARTDEV, Cirad,
73, rue Jean-François-Breton,
34398 Montpellier Cedex 5

Thierry Caquet, direction collégiale, INRAE,
147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

Éric Ceschia, UMR CESBIO, INRAE,
campus OMP, 18, avenue Édouard-Belin,
31401 Toulouse Cedex 9

Isabelle Chuine, UMR CEFE, CNRS,
1919, route de Mende,
34293 Montpellier cedex 05

Nathalie Colbach, UMR Agroécologie, INRAE,
17, rue Sully, 21065 Dijon Cedex

Anne Collin, UMR BOA, INRAE,
37380 Nouzilly

Lola Corre, Météo-France,
42, avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse

Dominique Courault, UMR EMMAH, INRAE,
domaine Saint-Paul, site Agroparc,
84914 Avignon Cedex 9

Philippe Debaeke, UMR AGIR, INRAE,
24, chemin de Borde-Rouge,
31326 Castanet-Tolosan Cedex

Luc Delaby, UMR PEGASE, INRAE,
16, Le Clos, 35590 Saint-Gilles

Claude Doussan, UMR EMMAH, INRAE,
domaine Saint-Paul, site Agroparc,
84914 Avignon Cedex 9

Brigitte Dubuisson, Météo-France,
42, avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse

Jean-Louis Durand, UR P3F, INRAE,
150, route Le-Chêne, 86600 Lusignan

Carina Furusho-Percot, US AgroClim,
INRAE, 228, route de l'Aérodrome,
84914 Avignon Cedex 9

Iñaki García de Cortázar-Atauri,
US AgroClim, INRAE,
228, route de l'Aérodrome,
84914 Avignon Cedex 9

Hélène Gilbert, UMR GenPhySE, INRAE,
chemin de Borde-Rouge,
31326 Castanet-Tolosan Cedex

Jean-Luc Gourdine, UR ASSET, INRAE,
domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg

Nina Graveline, UMR Innovation, INRAE,
2, place Viala, 34060 Montpellier

Nicolas Guilpart, UMR Agronomie,
AgroParisTech, INRAE,
campus Agro Paris-Saclay,
22, place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

Loïc Henry, UMR LEDA,
université Paris Dauphine,
place du Maréchal-de-Lattre-de-Tassigny,
75775 Paris Cedex 16

Laure Hossard, UMR Innovation, INRAE,
2, place Viala, 34060 Montpellier

Marie Hrabanski, UMR ARTDEV, Cirad,
73, rue Jean-François-Breton,
34398 Montpellier Cedex 5

Barbara Lacor, UAR ECODIV, INRAE,
route d'Amance, 54280 Champenoux

Marie Launay, US AgroClim, INRAE,
228, route de l'Aérodrome,
84914 Avignon Cedex 9

Renan Le Roux, US AgroClim, INRAE,
228, route de l'Aérodrome,
84914 Avignon Cedex 9

Sylvie Lecollinet, UMR ASTRE, Cirad,
INRAE, domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg

David Makowski, UMR MIA, INRAE,
campus Agro Paris-Saclay,
22, place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

Gilles Massardier, UMR ARTDEV, Cirad,
73, rue Jean-François-Breton,
34398 Montpellier Cedex 5

Sandra Novak, UE Ferlus, INRAE,
150, route Le-Chêne, 86600 Lusignan

Nathalie Ollat, UMR EGFV, université
de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE,
ISVV, 33140 Villenave-d'Ornon

Sylvain Pellerin, UMR ISPA, INRAE,
campus de la Grande Ferrade,
71, avenue Édouard-Bourlaux,
33883 Villenave-d'Ornon Cedex

Erwan Personne, UMR ECOSYS,
AgroParisTech, INRAE,
campus Agro Paris-Saclay,
22, place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

Sylvain Pincebourde, UMR IRBI, CNRS,
université de Tours, avenue Monge,
parc Grandmont, 37200 Tours

Jouanel Poulmarch, chambre d'agriculture
de l'Hérault, Mas de Saporta,
Maison des agriculteurs,
CS 10010, 34875 Lattes Cedex

Bénédicte Quilot, UR GAFL, INRAE,
domaine Saint-Maurice, 67, allée des Chênes,
84143 Montfavet Cedex

Mathieu Regimbeau, Météo-France,
42, avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse

David Renaudeau, UMR PEGASE, INRAE,
16, Le Clos, 35590 Saint-Gilles

Fabienne Rousset, Météo-France,
42, avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse

Éric Sauquet, UR RIVERLY, INRAE,
5, rue de la Doua, 69625 Villeurbanne Cedex

Jean-Michel Soubeyroux, Météo-France,
42, avenue Gaspard-Coriolis, 31057 Toulouse

Jean-François Soussana, direction collégiale,
INRAE, 147, rue de l'Université,
75338 Paris Cedex 07

Alban Thomas, direction collégiale, INRAE,
147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

Jean-Marc Touzard, UMR Innovation, INRAE,
2, place Viala, 34060 Montpellier

Yves Tramblay, UMR Espace-dev, IRD,
500, rue Jean-François-Breton,
34393 Montpellier cedex 05

Cornelis Van Leeuwen, UMR EGFV,
université de Bordeaux, Bordeaux Sciences
Agro, INRAE, ISVV,
210, chemin de Leysotte,
33140 Villenave-d'Ornon

Tiphaine Vidal, UR BIOGER, INRAE,
campus Agro Paris-Saclay,
22, place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau

Aurélie Vinet, UMR GABI, INRAE,
domaine de Vilvert, 78352 Jouy-en-Josas Cedex

Benédicte Wenden, UMR BFP, INRAE,
campus de la Grande Ferrade,
71, avenue Édouard-Bourlaux,
33883 Villenave-d'Ornon Cedex

Stephan Zientara, Anses, laboratoire de Santé
animale, 14, rue Pierre-et-Marie-Curie,
94701 Maisons-Alfort Cedex

Photographie de couverture : © INRAE

Édition : Sophie De Decker

Mise en pages et infographie : Hélène Bonnet, Studio9

Achevé d'imprimer en février 2025 par

IsiPrint

139 rue Rateau
93120 La Courneuve

Dépôt légal : février 2025

Imprimé en France

L'agriculture doit faire face à de nombreux défis. Parmi eux, le changement climatique constitue une préoccupation majeure pour le devenir de l'humanité, avec des enjeux pour la sécurité alimentaire, l'environnement, la biodiversité et la santé. L'élevage et les pratiques culturelles sont fortement affectés par l'évolution du climat et contribuent de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre. L'urgence est donc d'adapter les systèmes de culture et d'élevage pour les rendre plus résilients face aux évolutions tendancielles du climat et aux événements extrêmes. Dans le même temps, il est nécessaire de réduire les émissions du secteur agricole et d'augmenter la séquestration du carbone pour atténuer les effets sur le climat à plus long terme.

Cet ouvrage dresse un état des lieux des connaissances sur le changement climatique et ses impacts sur l'eau et les sols dans les régions tempérées. Il expose ensuite les méthodes pour analyser et anticiper les conséquences sur la production et le fonctionnement des filières. Il décrit et quantifie les impacts observés ou prévisibles pour les principales filières animales et végétales (grandes cultures, prairies, vigne, arbres fruitiers). Il présente l'accompagnement des acteurs en vue de concevoir, d'évaluer puis de mettre en œuvre des solutions pour l'adaptation. Enfin, il éclaire les politiques publiques déployées autour de l'enjeu climatique.

Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux chercheurs et aux enseignants-chercheurs qu'aux étudiants de l'enseignement supérieur. Il constitue une référence actualisée pour tous les acteurs du secteur agricole et pour les décideurs publics.

Philippe Debaeke est agronome et chercheur à INRAE (UMR AGIR). Il a été codirecteur du métaprogramme Accaf (Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt, 2010-2019).

Nina Graveline est économiste et chercheuse à INRAE (UMR Innovation). Elle travaille sur l'adaptation de l'agriculture face au changement climatique, et notamment sur l'usage de l'eau.

Barbara Lacor est ingénierie à INRAE. Elle est cheffe de projet du métaprogramme CLIMAE (Agriculture et forêt face au changement climatique : adaptation et atténuation).

Sylvain Pellerin est agronome et chercheur à INRAE (UMR ISPA). Il est codirecteur du métaprogramme CLIMAE.

David Renaudeau est zootechnicien et chercheur à INRAE (UMR PEGASE). Il est membre du comité de pilotage du métaprogramme CLIMAE.

Éric Sauquet est hydrologue et chercheur à INRAE (UR Riverly). Il est directeur du métaprogramme CLIMAE.

49 €

ISBN : 978-2-7592-4011-1

Quæ
éditions

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

9 782759 240111

ISSN : 1777-4624
Réf. : 02986