

Aurélie Wilfart et Jonathan Vayssières, coord.



Futurs de l'élevage dans les systèmes agri-alimentaires

Prospectives et évaluation
multicritère de scénarios

Aurélie Wilfart et Jonathan Vayssières,
coordinateurs

Éditions Quæ

Collection Update Sciences & Technologies

*Le genre en recherche :
évaluation et production des savoirs*

L. Guyard, M. Lesueur-Jannoyer,
A. Zeller, coord., 2024, 184 p.

*Méthodes d'investigation
de l'alimentation et des mangeurs*

O. Lepiller, T. Fournier, N. Bricas,
M. Figuié, coord., 2021, 244 p.

*Téledétection et modélisation spatiale.
Applications à la surveillance et au contrôle
des maladies liées aux moustiques*
A. Tran, É. Daudé, T. Catry, coord.,
2022, 148 p.

Pour citer cet ouvrage

Wilfart A., Vayssières J. (coord.), 2025. *Futurs de l'élevage dans les systèmes agri-alimentaires. Prospectives et évaluation multicritère de scénarios*, Versailles, éd. Quæ, 220 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4066-1>

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

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism
(<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

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

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

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la direction générale
de l'Enseignement et de la Recherche au titre du financement du réseau mixte
technologique MACro-ÉLevages-Environnement (RMT MAELE).

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

© Éditions Quæ, 2025

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-4065-4
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4067-8

ISBN (pdf) : 978-2-7592-4066-1
ISSN : 1773-7923

Sommaire

Préface	7
Remerciements	10
Introduction générale	11
<i>Aurélié Wilfart, Sandrine Espagnol, Mathieu Vigne, Olivier Mora et Jonathan Vayssières</i>	

PARTIE 1

LES PROSPECTIVES ET L'ÉVOLUTION DE L'ÉLEVAGE DANS LES TERRITOIRES

Chapitre 1. La prospective et les questionnements autour de l'élevage	19
<i>Olivier Mora et Audrey Béthinger</i>	
Une introduction aux approches de prospective.....	19
Le rôle de la prospective et des scénarios dans le traitement de l'incertitude et de la complexité.....	23
L'enjeu de l'élevage dans les prospectives globales.....	29
Différentes manières d'appréhender les futurs de l'élevage.....	30
Chapitre 2. Agricultures bretonnes 2040 : une étude prospective exploratoire à l'échelle de la région Bretagne	35
<i>Maud Marguet</i>	
La genèse du projet.....	35
États des lieux préalables à la construction du système prospectif.....	39
La construction du système prospectif.....	43
Conclusion.....	46
Chapitre 3. Vers une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso ? Approche territoriale et anticipatrice	48
<i>Jean-Michel Sourisseau et Véronique Ancey</i>	
Contexte et objectifs de l'étude.....	48
Approche générale.....	49
Résultats et enseignements	54
Perspectives	61
Conclusions	63
Chapitre 4. Transition(s) 2050, modélisation prospective des secteurs agricoles et alimentaires français	65
<i>Antoine Pierart</i>	
Introduction	65
Méthodologie	66

Limites et perspectives.....	73
Couplages « prospective et évaluation »	74
Conclusion.....	76

Chapitre 5. La place de l'élevage et des produits animaux dans la prospective Agrimonde-Terra sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire mondiale en 2050..... 78

Olivier Mora et Chantal Le Mouél

La méthode Agrimonde-Terra : le couplage d'une méthode de scénarios et d'une démarche de simulation numérique	79
Les scénarios d'usage des terres et de sécurité alimentaire mondiale et leurs impacts quantifiés.....	83
Les enjeux futurs des productions animales pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle	87
Les limites de la quantification de l'élevage dans les scénarios d'Agrimonde-Terra.....	87
Conclusion.....	89

PARTIE 2

INSCRIRE LES TRAVAUX DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION DE SCÉNARIOS DANS LES DÉMARCHES DE PROSPECTIVE

Chapitre 6. Introduction à la modélisation et à l'évaluation de scénarios..... 93

Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne et Aurélie Wilfart

Nécessité de modéliser et d'évaluer les scénarios issus de prospectives	93
Une introduction aux approches de modélisation et d'évaluation.....	94
Quatre travaux illustrant la diversité des méthodes de modélisation-évaluation et leur utilisation dans le cadre de prospectives.....	100

Chapitre 7. Modélisation et évaluation intégrées des systèmes et territoires agricoles avec la plateforme Maelia pour outiller des démarches de prospective..... 104

Olivier Therond

Des enjeux de durabilité aux approches intégrées.....	104
Intégration, oui mais de quoi?.....	105
Modélisation intégrée des territoires.....	106
Maelia, plateforme de modélisation et évaluation intégrées des systèmes et territoire agricoles.....	107
Maelia, support d'une dynamique aux nombreux domaines d'application	111
Maelia, fédérer la recherche et accompagner les acteurs de l'agriculture et de la bioéconomie.....	115
Spécificités de la plateforme Maelia.....	115
Maelia pour accompagner des démarches de prospective territoriale.....	116

Chapitre 8. Évaluer la multifonctionnalité des élevages au pâturage au sein des territoires : exemples du Sahel et de l'Asie du Sud-Est..... 117

Alexandre Ickowicz, Mélanie Blanchard, Vincent Blanfort, Jean-Daniel Cesaro, Christian Corniaux, Arona Diaw, Bernard Hubert, Jacques Lasseur, Huyen Le Thi Thanh, Jean-Pierre Müller, Liz Wedderburn

Introduction	117
Pourquoi appliquer le concept de multifonctionnalité aux systèmes d'élevage pâturants?	118

Construction d'un modèle conceptuel de multifonctionnalité pour soutenir la dynamique des systèmes d'élevage pâturants locaux	119
Illustration de l'application de l'approche multifonctionnalité de l'élevage à deux études de cas au Vietnam et au Sénégal.....	121
Analyse transversale de la multifonctionnalité	125
Conclusion.....	127
Chapitre 9. Afterres 2050 : de la fabrique de scénarios à leur évaluation	130
<i>Christian Couturier</i>	
Historique et objectifs du scénario Afterres 2050	130
Fondements de l'approche.....	131
Exploration du scénario Afterres 2050.....	133
Cibles	140
Chapitre 10. Une Europe agroécologique en 2050, scénario « Ten Years For Agroecology » (Tyfa).....	141
<i>Pierre-Marie Aubert et Xavier Poux</i>	
Introduction	141
Hypothèses du scénario Tyfa	143
Résultats	145
Discussion.....	149
Conclusion : révision du rôle des prairies permanentes et des ruminants dans l'agenda de la durabilité	156
 PARTIE 3 ANALYSE TRANSVERSALE DES TRAVAUX DE PROSPECTIVE ET DE MODÉLISATION-ÉVALUATION DE SCÉNARIOS 	
Chapitre 11. Une grille d'analyse des approches de couplage pour mieux associer prospective et évaluation	161
<i>Mathieu Vigne et Jonathan Vayssières</i>	
Pourquoi une grille d'aide au choix de types de couplage?	161
Diverses places de l'évaluation dans la démarche de couplage	164
La disponibilité des données au cœur du choix du type de couplage.....	165
D'une grille d'analyse à une typologie des cadres de couplage	166
Conclusion et perspectives.....	168
Chapitre 12. Composantes des systèmes agri-alimentaires et variables des scénarios prospectifs	170
<i>Aurélié Wilfart, Olivier Mora et Sandrine Espagnol</i>	
Hypothèses et données d'arrière-plan des scénarios prospectifs.....	171
Méthodes d'évaluation des scénarios prospectifs	183
Chapitre 13. Devenirs possibles de l'élevage et appropriation par les décideurs politiques.....	187
<i>Aurélié Wilfart, Olivier Mora et Sandrine Espagnol</i>	
Introduction : place des prospectives dans le cycle des politiques publiques	187
L'élevage au cœur d'une pluralité des services de l'État français.....	188

Les principales actions politiques concernant l'élevage en France..... 189

Quelle(s) utilisation(s) des perspectives par les politiques publiques françaises?..... 191

Qu'en est-il dans d'autres contextes ailleurs dans le monde? 194

Conclusion générale. Points clés à retenir..... 197

Jonathan Vayssières et Aurélie Wilfart

Synthèse thématique 197

Synthèse méthodologique 198

Synthèse opérationnelle..... 199

Références bibliographiques 200

Abréviations et unités..... 216

Liste des auteurs..... 218

Préface

«Que voulons-nous manger?» Une question essentielle qui pourrait bien devenir «Que pouvons-nous manger?». À moins que nous ayons les moyens de rendre ces deux questions compatibles, sachant que le verbe «pouvoir» se réfère à différents enjeux que sont le climat, la biodiversité, les sols, l'eau, l'atmosphère, le pouvoir d'achat, sans oublier la santé et même la paix dans le monde.

Par son empreinte territoriale souvent marquée, l'élevage est un élément clé des choix à opérer pour les systèmes alimentaires de demain. Sans que cela fasse l'unanimité, il est communément admis dans la sphère scientifique qu'il constitue un levier majeur pour réussir les nécessaires transitions qui s'imposent à nous. Globalement, aucun scénario ni aucune prospective ne permettent d'envisager une agriculture durable (favorisant le bouclage des cycles) sans élevage. La première qualité de cet ouvrage est ainsi de rappeler au lecteur l'importance de ce secteur, par des données synoptiques et récentes, illustrées par des études de cas diverses et très bien documentées.

Parmi ses atouts principaux, l'élevage constitue une source majeure de revenus, de sécurité alimentaire et de stabilité sociale pour des millions d'agriculteurs et d'éleveurs dans le monde. L'élevage contribue au maintien de la fertilité des sols, grâce à la production de fumure organique, qui a vocation à se substituer davantage à la fumure minérale (engrais de synthèse). Il permet de bénéficier de la traction animale pour les travaux au champ, ainsi que pour le transport; il permet de renforcer la productivité agricole dans les systèmes qui associent l'élevage aux cultures (transferts de biomasse). Au-delà des enjeux de production et d'emplois, il est également à l'origine de différents services, dont les services écosystémiques qui sont décrits dans l'ouvrage, avec l'intérêt majeur de couvrir différentes zones géographiques dans le monde. L'ouvrage rappelle aussi bien sûr que, malgré ses nombreux atouts, l'élevage demeure confronté à de grands défis qui entravent sa contribution à la transition agroécologique des systèmes alimentaires et qui ne lui permettent pas toujours d'exprimer son plein potentiel en tant que levier de développement territorial.

L'élevage est ainsi souvent à la fois le problème et la solution, en quelque sorte le coupable et la victime, dans la mesure où il constitue un acteur incontournable des solutions à déployer pour remédier aux changements climatiques et une source fréquente de dégradations environnementales : il contribue ainsi aux émissions de gaz à effet de serre par les animaux, mais permet en même temps la fixation du carbone dans les prairies et les sols pastoraux; il peut être à l'origine de la dégradation des sols à cause du surpâturage et de la déforestation, mais il permet dans d'autres situations une gestion durable des mêmes parcours et pâturages selon les pratiques associées (degré d'intensification); il est un utilisateur important des ressources en eau, mais peut contribuer en même temps à leur protection quand il est à caractère herbager et d'autant plus lorsqu'il s'agit de systèmes à base de prairies permanentes.

Une autre menace qui nous inquiète de plus en plus concerne la santé, celle des animaux, des humains et des écosystèmes. Dans ce cadre, des approches globales sont requises, qualifiées d'approches « One Health » (« une seule santé ») et l'élevage en constitue une composante essentielle, au regard de l'émergence inquiétante d'épidémies zoonotiques. Ainsi, d'après l'Organisation mondiale de la santé animale, 60 % des maladies infectieuses humaines sont zoonotiques (FAO *et al.*, 2023).

L'objectif central de l'ouvrage est de dépasser ce constat général et d'embrasser cet ensemble de facteurs comme autant d'entrées possibles pour envisager les questions suivantes : quelles pistes futures pour un développement de l'élevage qui permettent d'accroître ses contributions au développement durable en général et à la transition des systèmes alimentaires en particulier ? Quels sont les niveaux d'échelle les plus pertinents pour traiter ce sujet ? Quels développements méthodologiques la recherche peut-elle et doit-elle mettre en œuvre pour proposer des solutions en concertation avec les porteurs d'enjeux ?

Les auteurs s'attachent dès lors à montrer que la recherche et ses outils méthodologiques peuvent jouer un rôle clé en éclairant les trajectoires possibles pour l'élevage et son intégration dans les territoires. Le lecteur pourra ainsi mieux comprendre comment l'association de la prospective territoriale, de la modélisation et la simulation de scénarios et de l'évaluation multicritère permet d'analyser l'évolution des systèmes d'élevage en prenant en compte simultanément les facteurs économiques, sociaux et environnementaux.

Certains chapitres, parmi les plus originaux, sont constitués d'études de cas très diverses par les thématiques, par les méthodes et par les échelles considérées, depuis des territoires jusqu'à des espaces nationaux et supranationaux. Différentes approches qualitatives et quantitatives sont présentées afin d'être en mesure d'anticiper les impacts du changement climatique, de transitions agroécologiques ou de recompositions territoriales ; des méthodes sont également décrites pour identifier des solutions aux conflits liés à la mobilité des troupeaux, sur le rôle des filières dans les transitions sectorielles et territoriales, sur l'usage durable des ressources, sur les dynamiques de marché et des politiques publiques. Sans constituer des guides méthodologiques exhaustifs ou détaillés, chaque étude de cas offre toutefois au lecteur non spécialiste de précieuses illustrations et orientations relatives aux approches mobilisées, en particulier sur la manière d'articuler les démarches de conception de solutions et d'évaluation de leurs impacts.

L'ouvrage s'empare finalement de la question essentielle du destin sociétal des futurs dessinés par les approches de prospective et de modélisation, en particulier de leur appropriation par les sphères politiques et décisionnelles. Au vu du panorama des enjeux, il apparaît évident que l'élevage, en tant que levier de développement territorial et de durabilité, doit faire l'objet de politiques publiques ambitieuses. Le défi que la recherche doit relever sur ce sujet consiste à proposer des outils capables de mobiliser les décideurs politiques au service de politiques publiques qui permettent à l'élevage d'assurer pleinement son rôle dans l'amélioration des conditions de vie des populations, dans la transition vers des systèmes alimentaires plus durables et dans la préservation des ressources naturelles.

Cet ouvrage, s'appuyant sur des approches scientifiques et participatives, associant chercheurs, décideurs et acteurs locaux, apporte un éclairage précieux sur les méthodes et les outils qui permettront d'illustrer les futurs et d'accompagner dès aujourd'hui les nécessaires transitions.

*Sylvain Perret,
Cirad, ancien chef du département Environnement et Société,
directeur exécutif d'Agrinatura.*

*Stéphane Ingrand,
INRAE, chef adjoint du département Physiologie animale et systèmes d'élevage.*

Remerciements

La publication de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier de la direction générale de l'Enseignement et de la Recherche au titre du financement du réseau mixte technologique MAcro-ÉLevages-Environnement (RMT MAELE).

Les coordinateurs et le comité éditorial tiennent à remercier très chaleureusement les intervenants et les participants de l'école chercheurs intitulée « Associer prospective territoriale et évaluation multicritère pour renseigner l'évolution des élevages dans les territoires » qui s'est déroulée à Rennes du 10 au 12 mai 2022. Cet ouvrage en présente les principaux acquis. L'école a été organisée dans le cadre des activités de l'axe méthodologique du RMT MAELE et a reçu le soutien financier du département Physiologie animale et systèmes d'élevage (Phase) et du service de la formation tout au long de la vie de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) et du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad).

Introduction générale

*Aurélie Wilfart, Sandrine Espagnol, Mathieu Vigne,
Olivier Mora et Jonathan Vayssières*

Le système alimentaire mondial doit relever trois principaux défis relatifs à l'environnement, à la sécurité alimentaire et à la santé humaine (Mottet *et al.*, 2020). Les élevages y jouent un rôle clé et sont, de fait, interrogés sur différents aspects pouvant varier selon les régions du monde.

La question des impacts environnementaux des activités d'élevage, soulignée dès 2006 par le rapport « Livestock's long shadow » (Steinfeld *et al.*, 2006), est un élément central du débat actuel autour du secteur. Sa contribution aux impacts environnementaux à l'échelle mondiale est diverse, depuis la consommation de ressources non renouvelables jusqu'à la compétition pour l'usage des sols, sans oublier les émissions de gaz à effet de serre (GES). En effet, les différents rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) soulignent l'urgence climatique et mettent en évidence la nécessité de réduire au niveau mondial les émissions de GES d'origine anthropique. Le système alimentaire mondial y contribue à hauteur de 71 % (Crippa *et al.*, 2021). Les productions animales, qui génèrent 60 % des protéines ingérées dans le monde (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture FAO, 2022), représenteraient 12 % des GES des activités humaines selon les dernières estimations (FAO, 2023).

Au-delà de la question climatique, les activités anthropiques conduisent au dépassement de cinq autres limites planétaires : l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols, l'utilisation de l'eau douce et l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère telles que le plastique (figure i.1).

L'utilisation d'azote et de phosphore par les systèmes d'élevage est à l'origine d'importants échanges internationaux qui perturbent les cycles biogéochimiques. Ainsi, Dourmad *et al.* (2019) rapportent que 70 % des matières azotées des cultures agricoles mondiales sont destinées à l'alimentation animale (ce pourcentage atteint 80 % en Europe).

De plus, le cheptel mondial utilise directement ou indirectement 75 % des terres agricoles, principalement pour l'alimentation des animaux (Foley *et al.*, 2011) ; une utilisation équivalente est estimée pour l'échelle européenne. Toutefois, une large partie des biomasses issues de ces surfaces n'entre pas en compétition avec l'alimentation humaine. Selon Mottet *et al.* (2017) et Sandström *et al.* (2022) par exemple, l'élevage à travers le monde consommerait près de 6 milliards de tonnes de matière sèche (MS) d'aliments dont 86 % n'entreraient pas en compétition avec l'alimentation humaine. Une large part de ces aliments (60 %) est représentée par de l'herbe et des ressources arbustives valorisées par

les ruminants sur des surfaces marginales non appropriées aux cultures en protéines digestibles par les êtres humains (Van Zanten *et al.*, 2015). En France par exemple, Dourmad *et al.* (2019) estiment que si le cheptel utilise directement (pâturages et fourrages récoltés) ou indirectement (concentrés) plus de la moitié de la surface agricole utile (SAU), celle-ci est principalement représentée par des prairies (3,2 millions d'hectares – Mha – de prairies temporaires et 9,3 Mha de prairies permanentes) et dans des proportions plus faibles par des fourrages cultivés (1,5 Mha) et des céréales (1,5 Mha). Enfin, ces dernières années, la question de la ressource en eau devient un enjeu d'importance. En effet, l'agriculture représente environ 90 % de l'utilisation mondiale d'eau douce et est à l'origine de près de 70 % des prélèvements d'eau dans le monde (Govoni *et al.*, 2024). Ainsi, 30 à 40 % de la production alimentaire mondiale se fait sur des sols irrigués (Boulay *et al.*, 2021). L'élevage, quant à lui, représenterait environ 30 à 40 % de ces besoins globaux en eau (Mekonnen, Hoekstra, 2012; Govoni *et al.*, 2024). La production des matières premières destinées à l'alimentation du bétail représenterait 98 % de l'empreinte eau du secteur de l'élevage (Mekonnen, Hoekstra, 2012). Quarante-vingt-quatorze pour cent de cette empreinte correspondent à de l'eau de pluie.

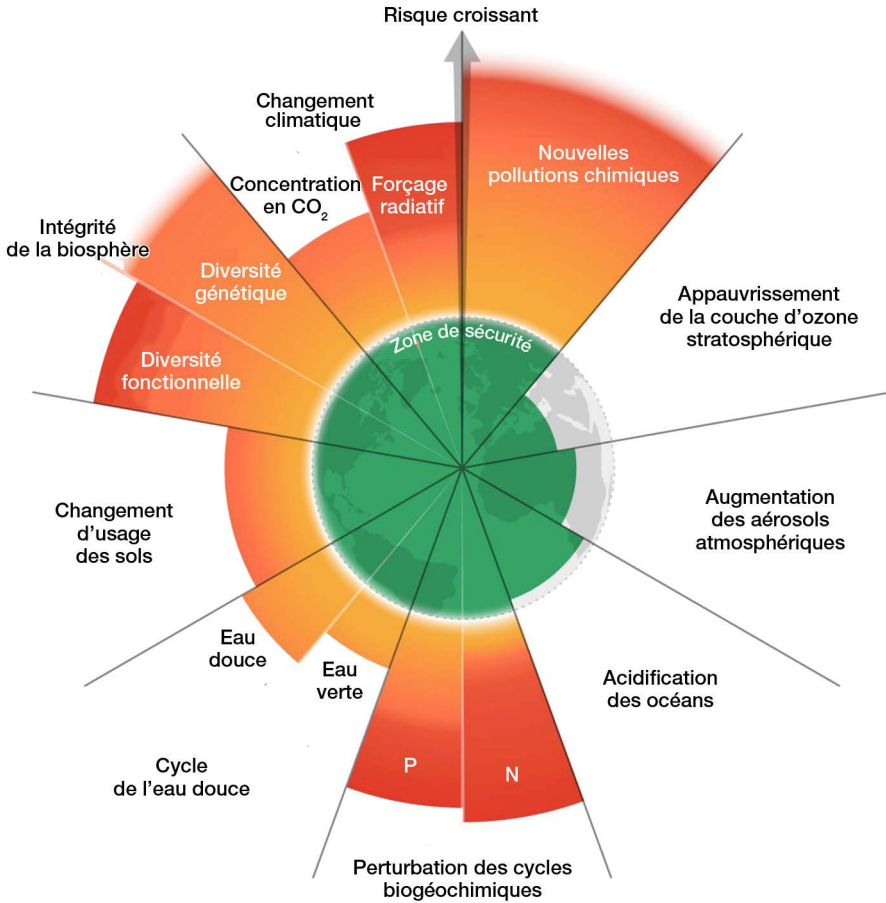


Figure i.1. Limites planétaires (source : Richardson *et al.*, 2023 d'après Steffen *et al.*, 2015).

Or, l'urgence environnementale se renforce dans un contexte d'accroissement de la population et d'augmentation de la demande alimentaire à l'échelle mondiale. Selon Miller *et al.* (2022), entre 1990 et 2018, la consommation de lait a doublé au niveau mondial (+99%), celle de fromage a augmenté de 56%, alors que la consommation de yaourt n'a pas évolué. Sur la même période, à titre indicatif, la consommation moyenne de viande rouge non transformée par personne a presque doublé (+88%) au niveau mondial. Cette tendance mondiale est toutefois due à une augmentation de la consommation dans seulement trois régions : l'Asie du Sud-Est et de l'Est (+266%), l'Amérique latine et les Caraïbes (+58%) et l'Afrique subsaharienne (+26%). Dans les pays à revenu élevé, cette consommation est en forte chute mais est substituée par de la viande utilisée dans des produits transformés. Au-delà d'une prise de conscience environnementale, la baisse de la consommation de viande dans les pays à revenu élevé, notamment en Europe, est également motivée par d'autres questions relatives au bien-être animal (Delanoue, Roguet, 2015), aux modèles de production (modèles hors-sol et industriels fortement critiqués) et plus récemment à la place des élevages dans les territoires et les systèmes alimentaires.

En Europe, il en découle des politiques publiques avec des objectifs à atteindre et des échéances, qui nécessitent notamment des évolutions et changements de systèmes agricoles dont les élevages font partie. Sur le plan climatique, la loi européenne sur le climat et son paquet neutralité carbone par exemple visent la neutralité pour l'Europe en 2050. En France, les stratégies nationales bas carbone (SNBC) imposent des objectifs de réduction des émissions de GES d'ici 2050 et des objectifs intermédiaires à court (−18% en 2030) et à moyen terme (−46% en 2050 en prenant 2015 comme référence). Ces objectifs s'ajoutent à ceux de la loi fixant les orientations de la politique énergétique (Pope, 13 juillet 2005), visant une division par quatre des émissions de GES entre 1990 et 2050 (Martin *et al.*, 2015).

Les dynamiques dans les pays en développement, en Afrique sub-saharienne notamment, sont tout autres. La forte croissance démographique s'accompagne d'une transition nutritionnelle en faveur des produits animaux (Popkin, 2006). Cette transition alimentaire s'explique par l'urbanisation des populations et par l'augmentation des niveaux de revenu (Delgado, 2003). Dans ce contexte, les politiques publiques visent avant tout l'augmentation de la productivité des élevages et de la production aux échelles nationales avec des interventions à tous les niveaux : amélioration de la génétique animale, organisation de filières de collecte et de transformation, introduction de nouvelles espèces fourragères et plus largement évolution des systèmes fourragers (Pica-Ciamarra *et al.*, 2013).

Ce contexte questionne le devenir de l'agriculture et particulièrement des élevages dans le monde. Une évolution est nécessaire ; les leviers sont nombreux et se situent à plusieurs échelles depuis le niveau des exploitations et des ménages agricoles (choix de pratiques et de systèmes d'élevage) jusqu'au niveau des territoires (choix de la répartition spatiale des élevages, choix des sources d'approvisionnement en ressources alimentaires locales ou importées, etc.). Au niveau des systèmes agricoles, le développement de pratiques et de systèmes agroécologiques permet de répondre en partie à ces enjeux. À l'échelle des filières, la réduction des pertes et gaspillages tout au long des chaînes de valeur de produits animaux est un levier important. Un tiers de la production agricole serait ainsi perdu à l'échelle mondiale (FAO, 2011). Néanmoins, ces pertes ne se font pas au même niveau de la chaîne alimentaire entre régions du monde. Dans les pays du

Sud, les pertes ont lieu principalement en amont du fait de problèmes de collecte et de conservation des produits. Dans les pays du Nord, le gaspillage alimentaire se situe plus en aval lors des étapes de transformation et en raison du comportement des ménages. Au niveau des consommateurs, au-delà de la réduction du gaspillage alimentaire, un autre levier se situe au niveau du régime alimentaire lui-même (choix des modes de production en privilégiant les filières locales, saines, équitables et durables d'un point de vue environnemental, par exemple). La réduction de la part des protéines animales dans l'alimentation humaine est également un enjeu autant de santé publique qu'environnemental pour les pays à revenu élevé (les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques – OCDE – notamment). Les recommandations concernant l'apport protéique alimentaire sont de 0,6 à 2,2 g/kg de poids corporel par jour avec un consensus moyen autour de 0,83 g/kg de poids corporel par jour pour une personne adulte en bonne santé (Agence française de sécurité sanitaire des aliments – Afssa –, 2007 ; World Health Organisation [WHO], 2007). En France, la consommation moyenne de protéines est de 1,4 g protéines/kg de poids corporel par jour, ce qui est supérieur à la moyenne préconisée. La répartition actuelle entre protéines d'origine animale et protéines d'origine végétale est de 60/40 à l'échelle mondiale (FAO, 2022) et de 65/35 pour la France. Selon les estimations, les systèmes agri-alimentaires¹ actuels (figure i.2) représenteraient entre un quart (Barbier *et al.*, 2019) et plus d'un tiers (Crippa *et al.*, 2021) des émissions de GES d'origine anthropique, respectivement en France et dans le monde. L'impact carbone au kilogramme de produits animaux étant plus élevé que pour les produits végétaux. Toutefois, ces transformations doivent être soutenues à des échelles supérieures par les politiques publiques, en adéquation avec les attentes sociétales vis-à-vis de la reterritorialisation des activités agricoles et plus largement de la place de l'élevage dans le système agricole global.

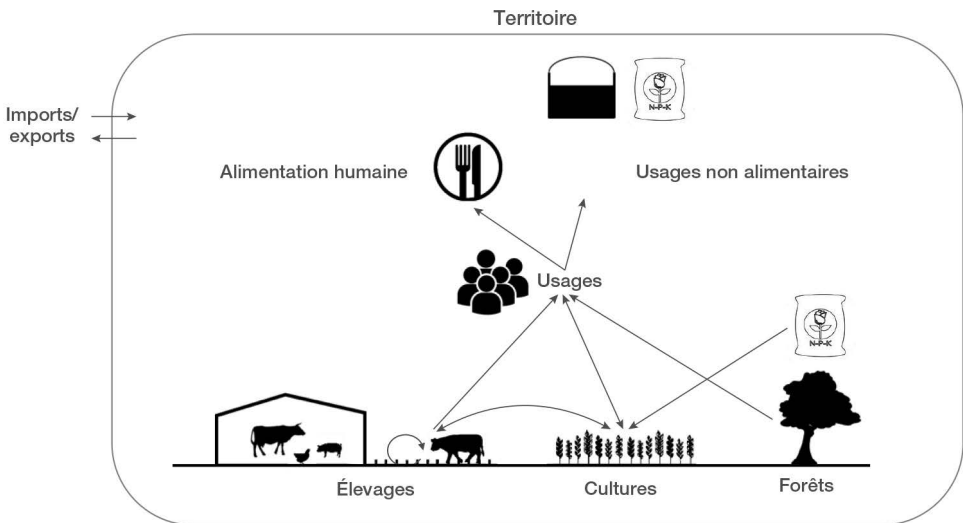


Figure i.2. Représentation simplifiée du système agri-alimentaire.

1. On entend par « système agri-alimentaire » la façon dont les êtres humains s'organisent socialement dans l'espace et dans le temps, pour obtenir et consommer leur nourriture (Lamine, 2012) en considérant les ressources locales et importées, la valorisation et le traitement des co-produits et des déchets, ainsi que la consommation et l'éventuelle production locale d'énergie nécessaire au bon fonctionnement de ce système.

Par sa production de savoirs d'anticipation pour la recherche et l'action, la prospective vise à fournir des éléments de réflexion pour éclairer le débat public et les décideurs sans aboutir à des recommandations précises et opérationnelles. Elle éclaire le débat en explicitant les conséquences possibles des actions actuelles et futures. Ainsi, plusieurs études prospectives ont vu le jour pour éclairer des options d'évolution des systèmes agri-alimentaires. Chacune d'entre elles s'appuie sur tout ou partie des enjeux préalablement cités, soit pour qualifier des scénarios qui explorent des futurs possibles (scénarios exploratoires construits sur la base d'éléments tendanciels ou de ruptures), soit pour construire des scénarios qui cherchent à atteindre des futurs souhaitables répondant à des objectifs prédéfinis comme la neutralité carbone (scénarios normatifs). Les prospectives ont une relation complexe avec les politiques publiques et peuvent participer aux différents stades du cycle de la politique publique (Jacquot, 2019). Ainsi, des scénarios normatifs se développent en amont des politiques de transition afin d'explorer les conditions de réalisation. Les principaux objectifs relevés sont d'apporter des réponses à l'urgence climatique et à la demande alimentaire (avec de plus en plus un objectif de souveraineté alimentaire des territoires), et plus spécifiquement en Europe, d'aller vers une agriculture agro-écologique, de proximité et qui répond aux attentes sociétales. Dans plusieurs États européens (France, Danemark, Pays-Bas, etc.), l'enjeu des nitrates et des effluents d'élevage est aussi fortement considéré. À l'avenir, la prise en compte d'autres enjeux pourrait être ajoutée comme ceux relatifs aux questions énergétiques ou sanitaires. Ces multiples objectifs peuvent s'avérer difficilement conciliables. De ce fait, leur prise en compte, et leur priorisation, lorsque les objectifs sont multiples, conditionnent fortement la construction des scénarios.

Cet ouvrage s'appuie sur les acquis d'une école chercheurs organisée dans le cadre du RMT MAELE². Il traite de la prospective et de l'évaluation de scénarios d'évolution des élevages à l'échelle de systèmes agri-alimentaires (figure i.2) dans diverses régions du monde. La grande diversité des enjeux, des contextes, des systèmes agri-alimentaires en place et des dynamiques d'élevage en cours demandent la réalisation de prospectives, de modélisation et d'évaluations spécifiques dans les différentes régions du monde. Dans ce sens, cet ouvrage pose les bases méthodologiques de la définition et de l'évaluation de scénarios d'évolution des élevages à l'échelle de systèmes agri-alimentaires, avec une visée générique, c'est-à-dire en prenant autant que possible en compte les enjeux et les caractéristiques des systèmes agri-alimentaires des pays industrialisés et des pays en développement.

Une première partie introduit la démarche de prospective et l'illustre avec quatre cas d'étude en Bretagne, en Afrique de l'Ouest, en France et à l'échelle mondiale. Les différentes étapes suivies y sont présentées, de la définition du système, de ses composantes et des variables, jusqu'à la construction d'un ou de plusieurs scénarios. Une deuxième partie aborde la question de la modélisation et de l'évaluation des scénarios à l'échelle territoriale, le territoire étant défini comme un espace géographique donné où sont considérées une partie ou l'ensemble des activités s'y déroulant et les diverses parties

2. Le RMT MAELE a pour objectif d'évaluer les incidences environnementales de systèmes d'élevage, en lien avec leur territoire et connecté à des systèmes alimentaires. Sa finalité est de produire des bases scientifiques et techniques génériques et robustes pour alimenter la réflexion sur la place des élevages dans le système agri-alimentaire de demain. Il vise à connecter les systèmes d'élevage, les territoires et les systèmes alimentaires autour de la question environnementale.

prenantes y évoluant (voir encadré 6.1). Les flux à prendre en compte sont présentés, ainsi que la construction de grilles d'évaluation multicritère. Cette partie montre également tout l'intérêt du couplage des travaux de prospective et d'évaluation de scénarios avec l'illustration de deux cas d'étude, un en France et un en Europe. La troisième et dernière partie capitalise de façon transversale sur les enseignements tirés du partage d'expériences. D'un point de vue méthodologique, elle formalise un cadre de couplage entre construction de scénarios et évaluation, définit la matrice de données d'arrière-plan nécessaires à la réalisation des prospectives et à la modélisation et l'évaluation des scénarios qui en découlent. D'un point de vue thématique, cette dernière partie dresse les pistes d'évolution sur le devenir des élevages dans les territoires et les systèmes agri-alimentaires telles qu'abordées par les décideurs politiques, et mène une première réflexion sur l'appropriation des prospectives par les décideurs politiques.

Ainsi, dans cet ouvrage, seront traitées des questions méthodologiques relatives à la construction de scénarios et à leur modélisation-évaluation :

- Quels sont les objectifs poursuivis ?
- Quels acteurs sont associés et à quelle(s) étape(s) ?
- Quelles sont les échelles considérées ?
- Quelles sont les données nécessaires à la fois pour la réalisation des prospectives et pour la modélisation et l'évaluation des scénarios ?
- Quelles sont les outils mobilisés aussi bien concernant les modèles de simulation et les méthodes d'évaluation ?
- Comment mieux articuler les travaux de prospectives, permettant notamment la co-construction de scénarios, et la modélisation et l'évaluation de ces scénarios ?

Partie 1

Les perspectives et l'évolution de l'élevage dans les territoires

Chapitre 1

La prospective et les questionnements autour de l'élevage

Olivier Mora et Audrey Béthinger

Ce premier chapitre présente quelques éléments de définition et de méthode de l'approche prospective, explore la place de l'élevage et des produits animaux dans les prospectives et, enfin, introduit quatre études prospectives récentes qui traitent des futurs de l'élevage. Elles sont présentées en détail dans les chapitres suivants (2, 3, 4 et 5).

» Une introduction aux approches de prospective

La prospective consiste, en mettant en œuvre des méthodes explicites, à élaborer des conjectures sur l'évolution future d'un système sociotechnique, économique ou écologique, et à les mettre en discussion de manière structurée (Barré, 2005 ; Mermet, 2005). Elle s'appuie sur un agencement méthodique de connaissances et de savoirs relatifs au devenir de la société et des milieux. Elle s'appuie également sur des méthodes allant de la construction de scénarios désirables à celle de scénarios exploratoires, en passant par l'élaboration de trajectoires d'évolution, et sur des données de natures variées tant quantitatives que qualitatives. Son objectif est d'anticiper les enjeux futurs et d'envisager des leviers d'action pour y répondre dès aujourd'hui. La prospective vise à accroître la capacité des acteurs à se préparer et à donner forme à leur avenir en équipant leur décision d'une anticipation des futurs possibles. Ainsi, la prospective possède à la fois une fonction heuristique dont l'enjeu est de mieux comprendre les dynamiques contemporaines dans leurs potentialités et leurs risques (Jouvenel, 1999) et une fonction de renforcement des capacités d'anticipation et d'aide à la décision face aux possibles enjeux futurs (Godet, 2000 ; Miller, 2007).

L'approche de prospective est particulièrement pertinente dans le cas de systèmes complexes et face à des situations de forte incertitude. Ainsi, la prospective, qui vise à anticiper les enjeux de long terme, est mobilisée dans des situations de controverses sociales et scientifiques, ou bien dans des situations de crises environnementales, climatiques, sociales, économiques, politiques, à des échelles mondiales, continentales, nationales ou régionales.

La prospective et l'approche des scénarios doivent être distinguées. La prospective (*foresight* en anglais) est un concept plus général qui renvoie à tout travail portant sur la manière dont l'avenir pourrait advenir, afin d'informer et d'éclairer l'action présente. De manière plus précise et plus focalisée, Miles et Keenan (2022) définissent la prospective comme « la mise en œuvre d'un processus systémique et participatif de collecte d'informations sur l'avenir et de construction d'une vision à moyen et long terme pour éclairer les décisions actuelles et mobiliser en vue d'actions communes ».

L'approche des scénarios correspond à un sous-ensemble de perspectives où il s'agit de construire des futurs contrastés concernant les évolutions à venir d'une situation ou d'un système particulier (voir Cordova-Pozo, Rouwette [2023] pour une revue de la littérature sur les types d'approche des scénarios). L'approche des scénarios permet de construire un débat argumenté sur le futur sous la forme d'un jeu de scénarios, en explorant les incertitudes sur les évolutions à venir (*ibid.*). Les scénarios sont parfois quantitatifs – par exemple : les scénarios de changement climatique –, parfois qualitatif – par exemple : les scénarios des trajectoires socio-économiques partagés (en anglais *shared socio-economic pathways*) qui interagissent avec le changement climatique. Mais de nombreux processus d'élaboration de scénarios combinent des dimensions qualitatives et quantitatives (Wiebe *et al.*, 2018). L'implication des acteurs parties prenantes dans les démarches participatives d'approche des scénarios permet de mieux saisir la complexité des systèmes étudiés, d'améliorer la pertinence des scénarios en intégrant les savoirs tacites et d'expérience, et de faciliter l'intégration des scénarios aux processus de prise de décision (Galang *et al.*, 2025). Enfin l'approche des scénarios constitue une vision particulière du futur où il s'agit d'explorer une vision non déterministe en construisant un jeu de scénarios. Tandis que les travaux à court terme peuvent généralement mobiliser une vision déterministe du futur, les horizons de long terme nécessitent de développer une vision non déterministe, où les dynamiques passées sont utilisées uniquement pour déterminer la distribution possible de scénarios futurs (Magruk, 2020). Il existe cependant des approches de prospective qui produisent non pas un jeu de scénarios mais un seul scénario, par exemple : le scénario Tyfa pour une agroécologie en Europe ou le scénario Afterres pour un usage durable de la biomasse (tous deux présentés dans la partie 2 de l'ouvrage). Les scénarios permettent alors d'enquêter sur les conditions de réalisation d'un futur souhaitable. Ces approches de prospective s'apparentent à la construction d'une vision et de son évaluation quantifiée (voir ci-dessous le « *visioning* »).

Il existe une grande diversité de méthodes de prospective. Nous présentons ici une liste non exhaustive de méthodes de prospective existantes, en distinguant les méthodes qui s'appuient sur la construction de scénarios et les méthodes qui n'y font pas appel. Parmi celles-ci, on peut citer les suivantes :

- les méthodes d'« *horizon scanning* », qui visent à examiner de manière systématique les problèmes potentiels (futurs), les menaces et les opportunités en identifiant les signaux faibles et les ruptures possibles susceptibles d'affecter les tendances en cours (Amanatidou *et al.*, 2012);
- la méthode d'identification des points de bascule, ou « *tipping points* », qui vise à repérer des ruptures possibles dans des trajectoires non linéaires d'évolution d'un système. Il s'agit d'identifier les effets de seuil dans les trajectoires qui marquent un point de bascule dans la dynamique d'un système, c'est-à-dire le point où une petite perturbation peut provoquer un changement qualitatif dans l'état futur d'un système (Lenton, 2013);
- la méthode Delphi est une méthode fondée sur la consultation d'experts, visant la recherche d'un consensus pour définir les tendances d'évolution, les enjeux futurs, ou une vision future commune à un horizon donné (Kauko, Palmroos, 2014);
- la méthode des cartes cognitives floues (en anglais *fuzzy cognitive maps*) permet de construire des graphes d'influence qui se composent de nœuds, appelés « concepts », reliés par des flèches qui indiquent la direction de l'influence entre les concepts.

En prospective, cette méthode est utilisée pour représenter des systèmes complexes avec des interactions non linéaires et multidirectionnelles, et également afin de rendre explicites des hypothèses implicites (Jetter, Kok, 2014).

Les méthodes fondées sur la construction de scénarios sont de natures différentes selon les objectifs recherchés. Cette section présente trois principales méthodes : les méthodes des scénarios correspondant au « *scenario planning* », le « *visioning* » et la prospective des territoires. Cependant, avant de présenter ces méthodes, il est important de revenir sur le terme « scénario », qui nécessite une clarification. Il recouvre, en effet, une grande diversité de significations qui ne sont pas toutes reliées à une pensée du futur, et qui traversent aussi bien les domaines académiques que les conversations quotidiennes. Dans le domaine de la prospective, le terme « scénario » décrit des récits construits pour explorer des futurs et pour tester ou développer la logique qui sous-tend chaque situation future (Cork *et al.*, 2023). Cherchant des critères communs à la notion de scénario à travers la diversité des publications de prospective, Spaniol et Rowland (2019) définissent les scénarios comme des récits ou des descriptions possibles et plausibles ancrés dans le futur, qui existent dans des ensembles – c'est-à-dire des jeux de scénarios – où ils sont systématiquement préparés à coexister en tant qu'alternatives signifiantes les uns par rapport aux autres. Ainsi, dans la littérature de prospective, c'est l'ensemble des scénarios construits, et non pas un scénario pris isolément, qui a un sens et qui permet l'anticipation. Quatre critères définissent la qualité d'un scénario : la pertinence (au regard de la question posée), la transparence (de la construction du scénario et des hypothèses qui le composent), la cohérence (des hypothèses composant le scénario entre elles) et la plausibilité du scénario (au regard de ce qui est connu et anticipé).

De manière générale, la nature des scénarios qui sont construits dans les prospectives varie selon les objectifs poursuivis. On distingue les scénarios *exploratifs* et *normatifs*. Les scénarios *exploratifs* envisagent la multiplicité des futurs possibles que l'on peut imaginer à partir des tendances passées, des signaux faibles et des ruptures possibles, et visent avant tout à dessiner le champ des futurs possibles auxquels il convient de se préparer dans des situations de forte incertitude. Les scénarios *normatifs* décrivent un futur prédéfini, le plus souvent souhaitable, que l'on cherche à atteindre, et visent à définir ses conditions de réalisation. Il s'agit de déterminer les conditions de plausibilité d'un scénario, voire de réfléchir à un cheminement pour l'atteindre.

Les méthodes des scénarios. Les différentes méthodes des scénarios, dites de « *scenario planning* » dans la littérature anglo-saxonne, ont généralement pour fonction l'exploration du champ des futurs possibles. Ces méthodes insistent sur la *pluralité* des futurs possibles en mettant l'accent sur l'indétermination radicale du futur : le futur étant indéterminé, il s'agit d'imaginer les différentes directions qu'il pourrait prendre. On distingue généralement deux grandes méthodes d'élaboration des scénarios dans la littérature : l'une mobilisant une matrice 2 x 2, l'autre fondée sur l'analyse morphologique.

Dans la méthode de la matrice 2 x 2, deux variables contextuelles, causalement indépendantes l'une de l'autre, sont utilisées pour structurer quatre futurs possibles. Les variables sont classées en fonction de leur degré d'incertitude et d'impact potentiel sur l'objet étudié à l'horizon temporel choisi. Les deux premières variables indépendantes à fort impact potentiel et à forte incertitude sont combinées pour créer une

matrice de scénarios 2 x 2 (Ramirez, Wilkinson, 2014). Cependant, cette méthode présente le défaut de réduire l'ensemble de la dynamique d'évolution d'un système à deux variables pour lesquelles seuls deux états contrastés sont considérés.

La méthode des scénarios fondée sur l'analyse morphologique vise à travailler sur des matrices à n dimensions, et à prendre en compte la complexité, les interdépendances et les dynamiques non linéaires des systèmes. L'analyse morphologique est « une méthode pour structurer et étudier l'ensemble des relations contenues dans des problèmes multidimensionnels, non quantifiables et complexes » (Ritchey, 2011 ; Mora *et al.*, 2020). À la différence de l'approche matrice 2 x 2, cette méthode d'élaboration des scénarios envisage ce qui peut ou pourrait arriver, sans réduire *a priori* la complexité du système, ni dans ses dimensions structurelles, ni dans sa dynamique temporelle (Börjeson *et al.*, 2006 ; Maier *et al.*, 2016). Elle permet de répondre aux critères de transparence, de cohérence et de plausibilité des scénarios évoqués précédemment. Appliquée à la prospective, l'analyse morphologique permet « de considérer l'ensemble du champ des possibles et de construire des scénarios » (Durance, Godet, 2010 ; Amer *et al.*, 2013). Tout d'abord, le système étudié et ses principales composantes et variables sont définis. Ensuite, en s'appuyant sur une analyse rétrospective du système, des hypothèses d'évolution possible sont élaborées pour chaque composante à un horizon temporel choisi. Le tableau morphologique rassemble ces hypothèses alternatives d'évolution, permettant ainsi d'en visualiser et d'en explorer les combinaisons. L'ensemble des combinaisons possibles décrivent *in abstracto* les évolutions possibles du système à l'horizon temporel défini. Cependant, la cohérence interne et la plausibilité des combinaisons doivent être évaluées afin d'« éliminer les combinaisons incompatibles... et créer des combinaisons plausibles » qui font sens (*ibid.*). Cette méthode systémique permet d'étudier, dans de multiples configurations plausibles, les liens de causalité et les interactions possibles entre les différentes composantes d'un système. L'ensemble du processus s'appuie sur la mise en œuvre à différentes phases de la prospective de différents forums d'experts pour discuter des hypothèses d'évolution des composantes ainsi que de leurs combinaisons plausibles au sein de scénarios (Mermet, 2009). De plus, le recours à l'analyse morphologique permet de travailler la cohérence et la plausibilité de chaque scénario et de les comparer de manière systématique. La construction de scénarios constitue un exercice de réflexion collective, qui n'est pas contraint par la recherche de consensus. Cette approche de prospective, quand elle est mobilisée dans sa dimension exploratoire, permet de décrire la pluralité des évolutions possibles, autrement dit de définir un champ des futurs possibles auxquels il convient de se préparer. La diversité des scénarios possibles garantit l'intérêt et la pertinence de la prospective pour les différents acteurs qui chercheront à s'en saisir. Le jeu des scénarios contrastés permet de mieux cerner les enjeux posés par les évolutions de long terme du système étudié. En mettant en lumière les tendances lourdes, les zones d'incertitudes majeures, les voies d'évolution souhaitables et les risques principaux de ruptures, les scénarios fournissent des éléments qui peuvent aider les décideurs publics et les acteurs privés à formuler des stratégies de long terme. De façon similaire, les scénarios visent à éclairer les domaines de recherche qui devraient être renforcés ou développés au regard des enjeux futurs et des objectifs poursuivis.

Le « visioning ». Il s'agit d'un processus de création systématique de visions d'un état futur souhaitable. Ce processus qui fait appel à la participation des acteurs parties prenantes vise à construire collectivement des futurs normatifs. L'objectif du « *visioning* » peut être, d'une part, de construire des futurs souhaitables pour se donner

collectivement une représentation de là où l'on souhaite aller, de construire une vision pour ensuite l'évaluer grâce à un outil de simulation, mais le « *visioning* » peut aussi constituer la première étape d'un travail de « *backcasting* » (Wiek, Iwaniec, 2014).

Le « *backcasting* » (ou raisonnement rétro-projectif). Cette méthode vise à élaborer un chemin ou une trajectoire pour arriver à un état futur normatif. La démarche de « *backcasting* » consiste à travailler à rebours en partant d'un futur souhaitable et en cheminant vers le présent pour déterminer les éléments de réalisation d'un état futur et notamment les actions et les politiques publiques nécessaires pour y parvenir. Bien que n'étant pas mobilisée dans les études de prospective présentées dans cet ouvrage, l'approche de *backcasting* connaît un intérêt croissant ces dernières décennies pour répondre aux problèmes de durabilité rencontrés par les systèmes sociotechniques (Kok *et al.*, 2011 ; Mora *et al.*, 2023).

La *prospective territoriale* consiste à élaborer des visions d'avenir à moyen ou à long terme qui sont de nature à aider les acteurs territoriaux à définir des choix de stratégie d'action (Spohr, 2009). La prospective territoriale est une démarche stratégique, systémique et participative. Elle s'organise fréquemment autour de l'élaboration d'un projet de territoire. Dans ce cadre, elle est généralement conçue comme un outil d'aide à la décision stratégique, afin de conduire les projets territoriaux (*ibid.*). Elle est une démarche systémique qui cherche à appréhender les dynamiques d'un territoire dans ses multiples dimensions, en prenant en compte sa complexité et les interdépendances entre les composantes du territoire. Elle vise à produire une vision partagée du territoire futur, en s'appuyant sur des démarches participatives qui permettent de construire une vision commune à une multiplicité d'acteurs d'un territoire (Heurgon, 2006). Démarche d'intelligence collective pour l'action, elle s'efforce de dépasser les tensions pour ouvrir le champ des possibles et accroître les marges de manœuvre des acteurs afin d'imaginer des futurs souhaitables (Bailly, 2005). En France et en Europe, les prospectives territoriales sont fréquemment mobilisées dans l'élaboration des politiques publiques dans les domaines de la planification territoriale, des politiques d'innovation ou encore de l'anticipation des risques naturels, politiques ou économiques sur les territoires (Le Berre, 2013).

» Le rôle de la prospective et des scénarios dans le traitement de l'incertitude et de la complexité

Les approches fondées sur des scénarios sont particulièrement utiles pour faire face à l'incertitude considérable concernant les trajectoires futures des systèmes complexes (figure 1.1). La complexité des systèmes rend difficile l'anticipation de leurs évolutions futures. Au fur et à mesure que la complexité d'un système s'accroît, les interdépendances au sein du système s'accroissent et rendent le devenir du système difficilement prévisible. À l'inverse, les systèmes peu complexes sont plus facilement prévisibles, car ils restent généralement stables dans le temps.

C'est pourquoi il faut d'abord bien différencier les scénarios de la *prévision* : celle-ci concerne des situations où l'on considère des évolutions *toutes choses étant égales par ailleurs*, c'est-à-dire des évolutions où les situations futures restent dans les frontières de ce que nous connaissons déjà aujourd'hui. On mobilise les scénarios dans toutes les autres situations, et notamment dans les situations de changements multiples et

interdépendants. Dans les situations de faible incertitude, les scénarios permettent de se *projeter* dans le futur. Il s'agit alors de prolonger en les extrapolant les évolutions tendanciellles de plusieurs composantes du système et de réfléchir à leurs implications. C'est ainsi que l'on construit les scénarios dits « de référence », « *business as usual* » (en français, « au fil de l'eau »), ou tendanciels. Lorsque l'incertitude et la complexité des systèmes s'accroissent, les scénarios permettent de décrire différents devenir possibles du système, qui procèdent d'évolutions non linéaires et de bifurcations à partir du système initial. En ce cas, les scénarios assurent une fonction d'*exploration* du futur; en effet, ils permettent d'explorer les implications d'un éventail de futurs possibles à travers l'élaboration d'un jeu de scénarios contrastés. Ces scénarios sont utiles pour penser les processus de transformation et la diversité des séquences causales qui affecteront le futur. Ils permettent de réfléchir aux conséquences des actions et des décisions prises aujourd'hui sur les dynamiques futures.

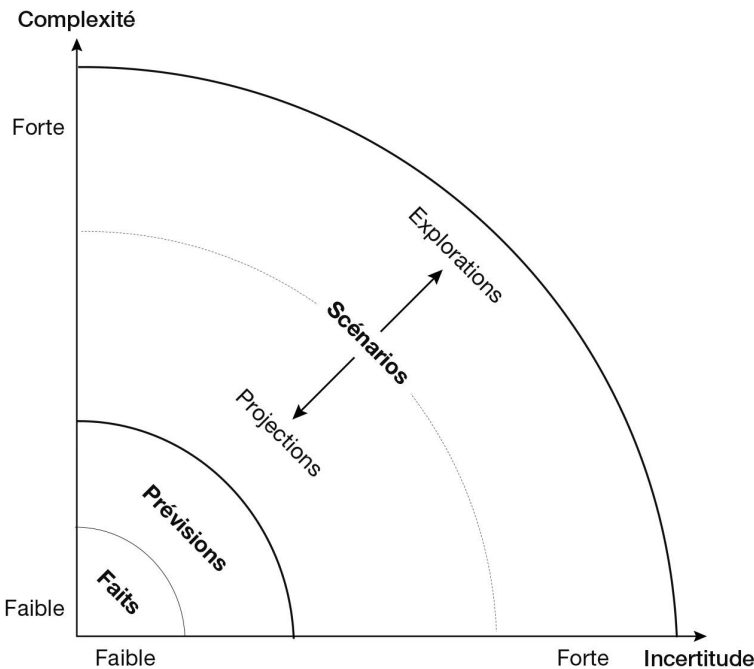


Figure 1.1. Le rôle des scénarios pour le traitement de l'incertitude dans les systèmes complexes (d'après Zurek et Henrichs, 2007).

Les étapes d'une démarche de prospective

Les étapes présentées ici à titre d'exemple correspondent à une approche des scénarios basée sur l'analyse morphologique et ayant une visée exploratoire.

La définition du périmètre et de l'horizon temporel de la prospective

La première étape d'une prospective consiste à problématiser la question posée de manière à en faire l'objet d'une prospective. La problématisation consiste d'abord à préciser en quoi les dynamiques temporelles, les incertitudes multiples, la complexité

Encadré 1.1. Quelques définitions simples pour caractériser les dynamiques temporelles et les futurs en prospective

Quelques éléments simples sont utilisés en prospective pour penser les dynamiques temporelles des systèmes et caractériser les scénarios. Trois termes permettent de caractériser les dynamiques temporelles :

- les *tendances lourdes* sont les évolutions observées sur une longue période, qui indiquent des processus stables de transformation, souvent documentées par des séries statistiques. Elles décrivent le phénomène qui, majoritairement, se développe et auquel il convient de se préparer, même si l'on n'en maîtrise pas les rythmes (appelées « *major trends* » ou « *megatrends* »). C'est à partir de l'extrapolation des tendances lourdes que l'on construit les scénarios « *business as usual* » ;
- les *signaux faibles* (ou germes de futur) sont les facteurs d'évolution peu perceptibles dans le présent mais potentiellement porteurs de transformation dans l'avenir (appelés « *weak signals* »). Ce sont des émergences, ou germes de futur, difficiles à percevoir mais porteuses d'avenir, en ce sens qu'elles peuvent constituer potentiellement des tendances dominantes dans le futur ;
- les *ruptures* sont des facteurs d'évolution qui vont à l'encontre des tendances lourdes. Elles sont parfois décrites sous le nom de « *black swan* », ou de points de bascule (« *tipping points* »). L'avènement d'une rupture met fin à une tendance lourde et engendre une nouvelle forme du système.

du sujet obligent un recours à une méthode prospective. Il s'agit également de définir la problématique, le périmètre spatial et l'horizon temporel de la prospective. Celui-ci est défini par rapport aux enjeux susceptibles d'affecter l'objet étudié (par exemple : les effets attendus du changement climatique, le cycle de la gestion sylvicole, etc.), à la temporalité de l'action des acteurs à l'origine de la prospective, et aux enjeux contextuels susceptibles de transformer le système étudié (par exemple : le changement des générations). Les travaux de prospective visent à explorer les systèmes complexes (où les interdépendances entre les dynamiques des composantes sont fortes) et privilégient les horizons sur lesquels les incertitudes sur le devenir des systèmes sont fortes, qui sont généralement des horizons de long terme (de 20 à 50 ans).

La construction du système prospectif

La deuxième étape vise à définir le système étudié. Sont d'abord identifiées aussi précisément que possible les variables qui exercent ou sont susceptibles d'exercer une influence sur l'évolution future de l'objet étudié. Les variables sont ensuite regroupées en quatre à sept composantes qui structurent le système. Ainsi le système se caractérise par un certain nombre de composantes qui sont en interaction.

L'analyse rétrospective du système

L'analyse rétrospective du système constitue une phase cruciale du travail de prospective, qui prépare la construction des hypothèses d'évolution. L'analyse rétrospective consiste à caractériser les tendances passées d'évolution des différentes composantes du système. Ce travail est effectué à travers des revues bibliographiques (articles scientifiques et littérature grise) et des réunions d'experts. Il s'agit d'identifier les *tendances lourdes* sur les dernières décennies, les *signaux faibles* d'évolution décelables aujourd'hui et les *ruptures possibles* qui pourraient advenir à l'horizon de la prospective

(voir encadré 1.1). Cette analyse des tendances passées constitue la base indispensable à la formulation des hypothèses d'évolution future. Cette phase est garante de la robustesse du travail de prospective.

La formulation d'hypothèses d'évolution pour chacune des variables et des composantes

La formulation d'hypothèses d'évolution implique, à partir de l'analyse rétrospective menée précédemment, de construire des hypothèses d'évolution possible à l'horizon temporel défini. Pour chaque variable (puis pour chaque composante), des hypothèses contrastées d'évolution sont formulées : certaines prolongent les tendances lourdes observées par le passé par extrapolation, d'autres sont construites sur l'expansion de signaux faibles repérés aujourd'hui en tendances lourdes ou sur les conséquences des ruptures possibles. C'est une phase créative de la prospective, conduite par l'équipe projet et s'appuyant pleinement sur les contributions d'un groupe d'experts.

La construction des scénarios

La construction du tableau morphologique

Le tableau morphologique regroupe l'ensemble des hypothèses d'évolution pour chacune des variables de chaque composante, ou bien pour chacune des composantes du système. Ce tableau constitue l'outil formel qui est le support des discussions au sein du comité d'experts. Il permet de visualiser l'ensemble des combinaisons possibles d'hypothèses à l'échelle du système et ainsi de générer une multiplicité de scénarios d'évolution du système par un processus combinatoire.

L'élaboration de scénarios

Les scénarios sont bâtis à dire d'experts (au sein du groupe d'experts) en sélectionnant dans le tableau morphologique des hypothèses pour chacune des variables et des composantes et en les associant de manière plausible et cohérente pour construire un état futur du système à l'horizon considéré. Dans le cas de scénarios exploratoires, on cherche à construire des scénarios contrastés entre eux, afin que le jeu des scénarios recouvre le champ des futurs possibles. Le jeu de scénarios élaboré, qui représentent souvent des futurs divergents, doit être accepté par l'ensemble des experts impliqués.

La finalisation des scénarios

Un récit décrivant les liens de causalités entre les variables et donnant des éléments sur les dynamiques d'évolution est associé à chaque scénario. Afin de faciliter la représentation et la compréhension du jeu de scénarios, une représentation visuelle des scénarios est élaborée : des diagrammes combinant les hypothèses d'évolution (figure 5.1 dans cet ouvrage; Mora *et al.*, 2020), des pseudo-chorèmes (Mora *et al.*, 2012), des schémas illustratifs (Barlagne *et al.*, 2016; Mora *et al.*, 2023), un schéma synthétique présentant l'ensemble des scénarios (Lacroix *et al.*, 2021) ou des animations vidéo (Julhia *et al.*, 2018).

L'analyse des enjeux posés par les scénarios en regard de la question initiale

Le jeu des scénarios contrastés permet de mieux cerner les enjeux posés par les évolutions de long terme du système étudié. À ce titre, le jeu de scénarios permet d'éclairer les débats publics et la décision publique, en montrant les voies praticables pour aller

dans le sens d'un (ou des) futur(s) souhaitable(s), ainsi que pour éviter des futurs redoutés, les conséquences possibles à long terme d'actions ou de l'absence d'action, afin d'éclairer la diversité des options se présentant aux décideurs publics. Il s'agit de montrer les avantages et les inconvénients respectifs des scénarios élaborés, dont l'interprétation sera différente en fonction des intérêts spécifiques et des identités des acteurs. En mettant en lumière les tendances lourdes, les zones d'incertitude majeures, les voies d'évolution souhaitables et les risques principaux de rupture, les scénarios fournissent des éléments qui peuvent aider les décideurs publics et les acteurs privés à formuler des stratégies de long terme. De façon similaire, les scénarios visent à éclairer les domaines de recherche qui devraient être renforcés ou développés au regard des enjeux futurs et des objectifs poursuivis.

La mise en débat des scénarios

La restitution et la mise en débat publiques des scénarios constituent l'occasion pour la prospective de mettre en discussion ses résultats auprès des décideurs et plus largement de la société en élargissant leur champ d'attention à une meilleure prise en compte de l'ensemble des futurs possibles. Ce débat sera d'autant plus riche que la démarche prospective sera transparente, que la prospective aura été menée en impliquant les acteurs eux-mêmes dans la réflexion et que les scénarios permettront de questionner les orientations actuelles des actions et de proposer des voies d'évolution.

La mise en débat des scénarios est une phase cruciale de la prospective. Les scénarios, par leur pertinence et par les questions qu'ils soulèvent, doivent permettre d'ouvrir une *conversation stratégique* sur les futurs possibles et souhaitables avec les acteurs concernés. Ainsi, en plus des livrables décrits précédemment, il s'agit alors d'exposer et de discuter les scénarios de la prospective au sein des différents cercles de personnes intéressées : décideurs, acteurs de la société civile, chercheurs, professionnels agricoles, forums territoriaux, acteurs publics, acteurs parties prenantes des chaînes de valeur, etc. Les scénarios ont vocation à changer le regard que l'on porte sur le présent pour permettre aux acteurs d'anticiper des futurs possibles. De ce fait, leur fonction est de produire un déplacement du débat sur les futurs par un processus de décadage et de recadrage des problèmes, remettant en cause certaines représentations du futur, en validant d'autres, en faisant apparaître de nouvelles, tout en montrant leurs conséquences à long terme.

Afin d'illustrer ou de montrer par l'exemple comment des acteurs peuvent se saisir des scénarios élaborés pour réfléchir à leur devenir, on complète fréquemment les travaux de prospective par des illustrations territoriales, régionales, ou par filière des scénarios. La territorialisation (ou la régionalisation) des scénarios consiste à imaginer avec les acteurs des traductions de scénarios génériques dans des territoires, dans des régions ou dans des filières spécifiques (Mora, Banos, 2014; Lacroix *et al.*, 2021; Mora *et al.*, 2023). Ces illustrations territoriales des scénarios sont l'occasion de construire avec les acteurs des visions partagées d'un futur souhaitable et ainsi d'accroître leurs capacités d'anticipation. Il s'agit alors de passer de scénarios génériques à des scénarios qui prennent en compte des dynamiques concrètes et situées. Le tableau morphologique permet d'effectuer des changements d'échelle en aidant à traduire une hypothèse particulière d'évolution en une hypothèse d'évolution d'un territoire concret en tenant compte de ses dynamiques propres. Le passage par la territorialisation permet aussi d'exemplifier les dynamiques générales présentées dans les scénarios dans des dynamiques situées.

Les scénarios visent à développer les capacités des acteurs à imaginer les futurs possibles et à renforcer leur capacité d'imaginer les futurs (les «*Futures Literacy*» de Riel Miller, 2007). Cependant, l'usage des scénarios dépend directement des intérêts stratégiques d'un acteur et des projets qu'il conduit ; un scénario vu comme favorable par un acteur ne le sera pas forcément pour un autre. En effet, les représentations du futur restent l'objet de débats et de controverses permanentes entre les acteurs concernés. Aussi la pluralité des scénarios reste un élément central de la mise en débat des modèles des futurs et des processus de délibération publique. La démarche de prospective, comme le souligne Chateauraynaud (2013), envisage, « en jouant de la distanciation, une pluralité de futurs, de façon à contraindre le raisonnement et la délibération, et à rendre visibles les attendus cognitifs et normatifs qui font de certains futurs des directions plus plausibles et plus souhaitables que d'autres ».

Coupler les méthodes de prospective qualitative et les méthodes de simulation numérique : la quantification des scénarios

Avec l'ampleur géographique croissante des sujets (européen, mondial), la modélisation numérique est de plus en plus fréquemment mobilisée dans le cadre des prospectives afin d'évaluer l'impact quantitatif des différents scénarios à différentes échelles (voir par exemple la prospective sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire globale Agrimonde-Terra, ou encore la prospective Afterres 2050). Il s'agit à la fois de pouvoir comparer les impacts de différents scénarios, mais aussi d'évaluer la capacité des scénarios à répondre à des objectifs normatifs (par exemple : non-extension des terres cultivées, réduction des émissions de GES, augmentation de la sécurité alimentaire, mise en place d'une agriculture sans pesticides chimiques).

Une méthode mobilisée dans certaines prospectives (Mora *et al.*, 2020 ; Mora *et al.*, 2023) et recommandée dans la littérature de prospective (Wiebe *et al.*, 2018) consiste à *coupler* une approche des scénarios fondée sur l'analyse morphologique avec des simulations quantitatives. D'un côté, le processus de construction des scénarios, fondé sur l'analyse morphologique, assure la cohérence et la plausibilité de chaque scénario et permet d'explorer un large champ de futurs possibles, tandis que, de l'autre, les simulations quantitatives permettent de mesurer l'étendue des changements décrits dans les scénarios et fournissent des éléments quantifiés de comparaison des scénarios entre eux (voir par exemple la prospective Agrimonde-Terra en chapitre 5). Le modèle doit avoir certaines caractéristiques pour être couplé à une approche de prospective : il doit être souple, aisément manipulable et transparent dans son fonctionnement. La souplesse d'un modèle peut se traduire par la capacité d'un modèle numérique à simuler des états et des dynamiques fortement contrastés d'un système. Le couplage entre scénarios et simulations quantitatives s'appuie sur le tableau morphologique et des règles de traduction des hypothèses qualitative en hypothèses quantitatives d'entrée du modèle qui constituent ainsi une interface entre la construction de scénarios qualitatifs et la réalisation de simulations quantitatives (Mora *et al.*, 2020).

Il est important de remarquer qu'il existe des scénarios qui, du fait même des caractéristiques du modèle numérique utilisé, ne peuvent pas être simulés, soit que l'état des variables caractérisant le scénario excède le domaine de validité du modèle, soit que les variables caractérisant le scénario ne sont pas prises en compte par le modèle. Il n'en reste pas moins qu'un tel scénario qualitatif demeure possible et plausible et que, à ce titre, il fait partie des futurs auxquels il convient de se préparer.

► L'enjeu de l'élevage dans les prospectives globales

Face à une population mondiale croissante, aux effets du changement climatique et à des ressources naturelles limitées, l'élevage et la consommation de produits animaux sont au cœur des débats sur l'avenir des systèmes alimentaires à l'échelle globale.

D'une part, les régimes alimentaires évoluent rapidement sous l'effet de multiples facteurs tels que l'urbanisation, l'augmentation des revenus, les changements de style de vie et les habitudes alimentaires, les chaînes d'approvisionnement alimentaire, l'agriculture et les politiques nutritionnelles (Swinburn *et al.*, 2011). Les régimes alimentaires de demain pourraient avoir des répercussions considérables sur l'utilisation des terres, sur l'environnement, sur le changement climatique et sur la santé (Paillard *et al.*, 2010; Bajzelj *et al.*, 2014; Tilman, Clark, 2014). Par conséquent, la manière dont sont élaborées les hypothèses sur les régimes alimentaires futurs est d'une importance capitale pour améliorer l'anticipation des problèmes à venir. L'augmentation de la consommation d'aliments d'origine animale et la réduction de la consommation de céréales constituent un changement historique majeur de ces régimes, qui s'est produit au cours du siècle dernier principalement dans les pays à revenu élevé (Popkin, 1993), et désormais dans les pays à revenu intermédiaire. Actuellement, les processus d'urbanisation et les changements de revenu et de mode de vie qui en résultent encouragent la consommation d'aliments d'origine animale. La consommation de ces produits s'insère dans une transformation plus générale des modes de consommation alimentaire en zone urbaine caractérisée par un développement de la consommation hors domicile, de produits prêts à consommer et de plats préparés, ainsi que d'une réduction des repas pris à domicile (Mendez, Popkin, 2004; voir également Zhai *et al.*, 2014, pour le cas spécifique de la Chine).

D'autre part, l'élevage est une source d'impacts négatifs significatifs sur l'environnement et d'émissions de GES (Steinfeld *et al.*, 2006; Godfray *et al.*, 2010; Tilman, Clark, 2014).

Depuis une vingtaine d'années, un débat de prospective s'est engagé sur la direction à donner aux changements des systèmes agricoles et alimentaires (Béné *et al.*, 2019). Au début des années 2010, plusieurs études prospectives ont encouragé l'intensification durable de l'agriculture afin d'augmenter les disponibilités alimentaires pour nourrir une population croissante sans étendre la superficie des terres agricoles (et donc en arrêtant la déforestation), afin de limiter les émissions de GES et l'érosion de la biodiversité (par exemple : Godfray *et al.*, 2010; Foley *et al.*, 2011; Tilman *et al.*, 2011; Alexandratos, Bruinsma, 2012). Ensuite, d'autres travaux ont souligné la nécessité d'une modification de la consommation alimentaire et d'une réduction du gaspillage alimentaire afin d'atténuer l'augmentation de la demande alimentaire et de limiter l'impact négatif du système alimentaire mondial sur les ressources naturelles et sur l'environnement. Ces travaux, provenant en partie de la communauté des chercheurs sur le changement climatique, ont mis en évidence le rôle majeur de l'élevage comme source d'effets environnementaux négatifs et ont donc encouragé une réduction significative de la consommation d'aliments d'origine animale (par exemple, parmi beaucoup d'autres, Stehfest *et al.*, 2009; Wirsenijs *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2013; Bajzelj *et al.*, 2014; Searchinger *et al.*, 2018).

Il en résulte que la limitation de la croissance de la consommation de produits animaux, en particulier de viande et plus spécifiquement de viande de ruminant, fait toujours partie des actions invoquées dans les travaux de prospective qui s'interrogent sur les

leviers qui permettraient de réduire à long terme les impacts négatifs des systèmes alimentaires mondiaux sur l'environnement ou la santé (Stehfest *et al.*, 2009; Bajželj *et al.*, 2014; Rööß *et al.*, 2016; Springmann *et al.*, 2016; Popp *et al.*, 2017; Wirsenius *et al.*, 2017; Springmann *et al.*, 2018). On retrouve le même consensus dans les travaux de prospective qui s'intéressent à la sécurité alimentaire mondiale : ils proposent des scénarios globaux d'évolution des systèmes alimentaires mondiaux intégrant une transition vers des régimes alimentaires moins riches en énergie et en produits d'origine animale. Ces scénarios font partie des options avancées pour nourrir une population mondiale croissante de manière durable (pour une revue de la littérature, voir par exemple : Le Mouél, Forslund, 2017).

Ces dernières années, le basculement vers une approche en termes de système alimentaire s'est confirmé dans les prospectives globales. Cependant, plusieurs points émergent des travaux récents de prospective selon une revue de la littérature des prospectives globales des systèmes alimentaires conduite par Zurek *et al.* (2021). Tout d'abord, les prospectives soulignent le besoin d'innovation pour la durabilité des systèmes agricoles notamment en coordonnant mieux les innovations à l'intérieur du système alimentaire, et en prenant mieux en compte les dynamiques de marché et les politiques qui gouvernent les processus d'innovation (*ibid.*). Deuxièmement, les prospectives convergent sur la nécessité de faire basculer les régimes alimentaires vers une alimentation saine et durable incluant plus de produits végétaux dont des fruits et légumes et des légumineuses, et réduisant la consommation de produits animaux. Cependant, l'atteinte conjointe des deux objectifs d'un bon état nutritionnel de la population et d'une durabilité environnementale à l'échelle globale ne va pas de soi ; aussi, ces travaux de prospective ne convergent pas autour de scénarios similaires mais conduisent à des trajectoires de changement relativement différentes (*ibid.*). Troisièmement, au regard des transformations nécessaires des systèmes alimentaires, la constatation s'impose que les trajectoires de changement vont produire des gagnants et des perdants, ce qui appelle à une meilleure gouvernance des processus de transition pour les rendre plus justes et équitables. À ce titre, l'équité devient un élément crucial de la durabilité des systèmes alimentaire (*ibid.*). Enfin, il semble nécessaire de mieux prendre en compte les incertitudes croissantes concernant les conflits géopolitiques, l'impact du changement climatique, les enjeux sanitaires, les crises économiques et les transformations politiques (Gupta *et al.*, 2025). Pour faire face à une situation plus complexe et volatile, les prospectivistes recommandent de sortir des cadres habituels de réflexion, avec un recours accru à la créativité, et d'avoir une plus grande ouverture à des futurs radicalement différents (*ibid.*).

► Différentes manières d'appréhender les futurs de l'élevage

Quatre études de prospective traitant de la question de l'élevage sont présentées dans la suite de cette partie. Elles posent la question des futurs de l'élevage à différentes échelles : régionales, nationale et mondiale. Les deux premières études concernent les dynamiques territoriales liées aux systèmes d'élevage, à leurs usages de l'espace, à leurs filières et aux pratiques associées. L'approche territoriale permet d'envisager à la fois la question de la coexistence spatiale de différents usages au sein d'un même territoire, ainsi que les questions plus sectorielles de l'inscription spatiale des systèmes d'élevage et de leurs impacts sociaux, économiques, politiques et environnementaux.

La première étude prospective «Agricultures bretonnes 2040», conduite par la chambre régionale d'agriculture de Bretagne et présentée par Maud Marguet, est consacrée au devenir à l'horizon 2040 des systèmes productifs (agriculture et agro-alimentaire) en Bretagne, marqués par la dominance des systèmes d'élevage bovin (lait et viande) et porcin. Du fait de la spécialisation et de la concentration des activités, le système productif régional fait face à de fortes tensions environnementales concernant la dégradation de la qualité de l'eau et des sols et l'érosion de la biodiversité, à des enjeux de réduction des émissions de GES, et à une transformation de la demande des consommateurs. Ainsi, alors que des objectifs importants de réduction de l'élevage en Bretagne sont posés par les trajectoires bas carbone afin de réduire les émissions de GES, l'étude prospective vise à réfléchir sur les modalités d'articulation de l'objectif climatique avec des objectifs environnementaux et socio-économiques, et à explorer le champ des devenirs possibles de l'agriculture et du tissu agroalimentaire bretons en 2040. Au final, cinq scénarios exploratoires insistent respectivement sur (1) les effets à long terme du non-renouvellement des actifs et du déclin de l'élevage, (2) la transformation de l'agriculture pour atteindre la neutralité carbone, (3) la reterritorialisation de l'agriculture bretonne dans un contexte de renouveau de la décentralisation, (4) le rôle des technologies dans la transformation des systèmes d'élevage et (5) la végétalisation de l'agriculture bretonne avec un recul de l'élevage remplacé par des productions végétales. Cette prospective vise dans un contexte d'incertitude sectorielle et institutionnelle à éclairer de manière exploratoire les devenirs possibles de l'élevage dans la région Bretagne.

La deuxième prospective «Vers une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso» conduite par Jean-Michel Sourisseau et Véronique Ancey, chercheurs au Cirad, s'intéresse aux devenirs de l'inscription territoriale de pratiques transfrontalières de pastoralisme dans un contexte de fortes tensions politiques et de conflits frontaliers en Afrique de l'Ouest. À travers un détour par les futurs de ces territoires et grâce à la constitution d'espaces de concertation, cette étude prospective territoriale rouvre la question de la place future des pratiques d'élevage et des systèmes pastoraux dans les dynamiques de développement d'un territoire situé sur le Togo et le Burkina Faso, avec l'objectif de construire des visions partagées des interactions entre pastoralisme et territoire. Elle s'appuie sur une démarche participative pour ouvrir un espace de débat dans une situation de conflit, et engager les acteurs dans une co-construction de futurs normatifs et désirables de ces territoires.

Une troisième étude de prospective «Transition(s) 2050», conduite par l'Ademe et présentée par Antoine Piérart, est d'une nature plus normative. Elle aborde la question de l'élevage incidemment en se focalisant sur la contribution de l'agriculture et du secteur agroalimentaire aux objectifs nationaux de «neutralité carbone» en 2050. La prospective Transition(s) 2050 élabore quatre scénarios multisectoriels pour aboutir à une «neutralité carbone» en 2050. Les scénarios intègrent trois leviers interdépendants : la réduction des émissions de GES, le stockage naturel de carbone et la mobilisation de biomasse renouvelable substituable aux ressources fossiles. Dans les hypothèses d'évolution concernant le secteur agricole et agroalimentaire, les systèmes d'élevage et la consommation de produits animaux sont des leviers majeurs pour réduire les émissions. Conformément à ce qui est établi dans les perspectives globales, le principal levier pour une contribution des régimes alimentaires à la réduction des émissions de GES est dans trois scénarios sur quatre une réduction

de 30 à 70 % (scénario S1) de la consommation de produits animaux ; cette mesure seule a pour conséquence une réduction de 40 % des émissions de GES du secteur agricole (dans le scénario S1). Parmi les autres leviers d'action pour le secteur agricole, trois concernent directement les systèmes d'élevage : la réduction des cheptels et le passage à des systèmes plus extensifs, l'agroécologie et la production de biomasse à vocation énergétique (avec notamment la production de biogaz). L'étude montre que l'intensification des systèmes d'élevage, si elle n'est pas couplée à une transformation de la consommation alimentaire, ne permet pas de réduire de plus de 6 % les émissions de GES du secteur agricole (dans le scénario S4). En ce qui concerne la réduction des émissions de GES, c'est, d'une part, la contribution limitée des évolutions technologiques à l'atteinte de cet objectif et, d'autre part, le rôle prépondérant de la part de produits animaux dans la consommation alimentaire qui sont démontrés par cette étude prospective à l'échelle française.

L'étude prospective Agrimonde-Terra sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire mondiale en 2050, conduite par INRAE et le Cirad, et présentée par Olivier Mora et Chantal Le Mouél, offre l'opportunité de réexaminer les termes du débat sur la place des productions animales dans l'usage des terres et la sécurité alimentaire, et par suite sur leur rôle au regard de l'avenir des systèmes alimentaires globaux. Cette prospective couple une approche des scénarios et une démarche de simulation quantitative permettant d'évaluer l'impact des scénarios en termes de production, d'usages des terres et de commerce international à l'échelle mondiale. Quatre scénarios exploratoires (« Métropolisation », « Régionalisation », « Régimes sains », « Communautés ») décrivent le champ des futurs possibles des usages des terres et de la sécurité alimentaire en 2050 dans sa plus grande diversité. Le scénario *Métropolisation* prolonge les tendances d'urbanisation observées à l'échelle mondiale. *Communautés* s'appuie sur des signaux faibles de crises multiples et imbriquées (environnementale, économique, géopolitique) pour en explorer les conséquences sur les territoires. Deux scénarios présentent des futurs plus souhaitables : *Régimes sains* explore les effets d'une montée en puissance des politiques nutritionnelles à l'échelle globale et d'une bascule vers l'agroécologie, tandis que *Régionalisation* envisage les conséquences d'une régionalisation des systèmes alimentaires incluant une relocalisation des systèmes de production. La place de l'élevage diffère fortement dans les scénarios : développement des monogastriques et de l'alimentation animale dans « Métropolisation », autonomie des systèmes d'élevage et relations d'échanges avec les systèmes de culture à l'échelle régionale dans « Régionalisation », réduction de la consommation de produits animaux dans les pays à haut revenu et accroissement dans les pays à bas revenu liés à une transition des systèmes vers l'agroécologie dans « Régimes sains », intensification de l'élevage sur de petites surfaces et dégradation accélérée de l'environnement dans le scénario « Communautés » (déterminé par l'enchevêtrement de crises climatiques, environnementales et économiques). Dans ce jeu de scénarios, seuls les scénarios « Régimes sains » et, dans une moindre mesure, « Régionalisation » permettent de répondre à la fois aux objectifs de durabilité des systèmes agricole et de santé humaine.

La comparaison des méthodes de prospective qui caractérisent ces quatre études permet de dégager des choix de positionnement stratégique de ces travaux dans un débat sur les futurs.

La prospective Agricultures bretonnes 2040 développe des scénarios exploratoires, afin de répondre à un objectif de stratégie bas carbone à l'horizon 2040 en région

Bretagne considéré trop monocentré. Il s'agit alors de rouvrir le champ des futurs possibles du secteur agricole et agroalimentaire en incluant une diversité de critères dont des objectifs socio-économiques, et en produisant des scénarios contrastés d'évolution. Cette prospective mobilise pour cela une méthode des scénarios fondée sur une analyse morphologique qui regroupe les variables en huit composantes, produit des analyses rétrospectives, construit des hypothèses alternatives d'évolution, et les combine pour élaborer cinq scénarios et mettre en récit chaque scénario.

La prospective sur les systèmes pastoraux en Afrique de l'Ouest a un objectif normatif; il s'agit ici d'aller «vers une transhumance transfrontalière apaisée» tout en cherchant à ouvrir le champ des possibles sur le devenir des territoires transfrontaliers. La méthode mobilisée propose un détour par l'élaboration de scénarios sur le devenir des territoires transfrontaliers à partir desquels les acteurs imaginent des devenirs du pastoralisme. C'est ici un choix méthodologique fort de faire primer les dynamiques territoriales sur les dynamiques sectorielles de l'élevage et de la mobilité des animaux, qui est justifié par le contexte politique et les conflits transfrontaliers.

La prospective Transition(s) 2050 menée par l'Ademe a été élaborée à l'échelle de la France métropolitaine pour nourrir les débats nationaux sur la «neutralité carbone» en amont des délibérations collectives sur la future Stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC), avec l'objectif non pas de construire une trajectoire de transition mais de proposer au débat une pluralité de scénarios multisectoriels. D'un point de vue méthodologique, cette étude développe quatre scénarios normatifs de neutralité carbone à l'échelle française (P1, P2, P3, P4) qui s'articulent aux scénarios produits à l'échelle globale par le Giec dans le rapport spécial +1,5°C. Ceux-ci ont été retravaillés selon cinq composantes (appelés «axes structurants») qui sont les techniques, l'économie, la société, la gouvernance et les territoires. Puis les scénarios ont été ensuite simulés par des modélisations technico-économiques sectorielles, avec l'objectif d'articuler à une modélisation du système énergétique des transitions de société contrastées.

Enfin, face aux incertitudes croissantes qui affectent les devenirs du système alimentaire (changement climatique, transition des régimes alimentaires, impact des systèmes de production agricole, dynamiques d'urbanisation et transformation des chaînes de valeur), la prospective Agrimonde-Terra développe une approche exploratoire sur les évolutions de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. En s'appuyant sur une analyse rétrospective des composantes de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire, cette prospective imagine une diversité de futurs contrastés de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire en 2050. L'utilisation de l'analyse morphologique dans l'approche des scénarios permet de stimuler la créativité et, à partir d'une base d'analyse commune d'analyse du système, de construire un scénario de crises, un scénario tendanciel et deux scénarios plus souhaitables. Cette prospective élargit le champ des futurs possibles en développant à la fois un scénario désirable fondé sur les régimes alimentaires sains, et un scénario d'impasse des systèmes techniques. Le couplage de l'approche des scénarios et d'une démarche de simulation quantitative permet d'évaluer l'impact mondial des différents scénarios en termes de production, d'usages des terres et de commerce international.

Comme nous le remarquons à travers ces quatre études prospectives, les démarches de prospective s'insèrent dans des *conversations stratégiques* sur les futurs (Van der Heijden, 2005). C'est pourquoi les méthodes développées se doivent de

répondre aux objectifs poursuivis : rouvrir un débat en proposant un large éventail de futurs possibles pour envisager l'articulation des objectifs assignés à l'élevage, dépasser des conflits politiques autour du pastoralisme par une approche de prospective territoriale qui pluralise les devenir des espaces transfrontaliers, répondre aux enjeux climatiques en proposant une pluralité de chemins de transition en amont de la construction d'une stratégie nationale, ou encore imaginer les évolutions possibles de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire à l'échelle globale pour s'y préparer dès aujourd'hui. Il est visible ici que l'élevage est au cœur de nombreuses questions de prospective, qu'elles concernent par exemple la coexistence des usages des terres, les impacts environnementaux négatifs de l'élevage dans les territoires, l'importance de la consommation des produits animaux dans les émissions globales de GES, ou encore l'usage des terres et la sécurité alimentaire.

Chapitre 2

Agricultures bretonnes 2040 : une étude prospective exploratoire à l'échelle de la région Bretagne

Maud Marguet

En 2020, la chambre d'agriculture de Bretagne (Crab) donnait le départ au projet Agricultures bretonnes 2040. Ce projet avait pour objectif d'identifier des scénarios d'évolution de l'agriculture et de l'agroalimentaire bretons à l'horizon 2040 et d'évaluer leurs incidences environnementales et socio-économiques. Un objectif complémentaire assigné à ce projet est de permettre l'appropriation des enjeux d'avenir pour les filières agricoles bretonnes par les collaborateurs et les responsables professionnels de la Crab.

» La genèse du projet

Un contexte de réflexions régionales autour des enjeux climatiques

En mars 2017, la Région Bretagne lançait sa Breizh Cop, démarche participative s'inspirant de la Cop 21 et visant à favoriser l'engagement des acteurs régionaux pour le climat et à formaliser un « projet durable de territoire à l'horizon 2040 ». Cette démarche participative trouva sa concrétisation en décembre 2018, le Conseil régional adoptant alors les trente-huit objectifs qui avaient émergé de la concertation Breizh Cop. En particulier pour l'agriculture, dans le cadre de son ambition « accélérer notre performance économique par les transitions », le onzième objectif Breizh Cop prévoit de « faire de la Bretagne la région par excellence de l'agroécologie et du “bien manger” », lequel est traduit par trois sous-objectifs :

- accélérer l'engagement de l'agriculture dans la baisse de ses émissions de GES à l'horizon 2040 dans une perspective proposée par la trajectoire Transition de la prospective « énergie-climat » ;
- généraliser les pratiques de l'agroécologie dans toutes les exploitations en faveur de la préservation de l'eau, de la biodiversité et des sols ;
- accélérer les mutations du secteur agroalimentaire vers plus de valeur ajoutée, de haute qualité, de sécurité alimentaire et moins d'emballages.

En parallèle, des concertations sont lancées par la Région pour construire un schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires cohérent avec la stratégie bas carbone à l'horizon 2050. Différentes expertises techniques simulant la mise en œuvre en Bretagne d'un scénario « Transition F4³ » de l'Ademe

3. Le scénario « Transition F4 » constitue la transcription à l'échelle bretonne du facteur 4, en phase avec les objectifs de la SNBC 1 (stratégie nationale bas carbone, 2015).

sont menées. Elles sont traduites, lors de la Conférence bretonne de la transition énergétique du 6 décembre 2018, par des chiffres précis d'évolution du cheptel breton à l'horizon 2040 et de leur impact en termes d'émissions non énergétiques : diminution de 29 % des effectifs de vaches laitières, réduction de 26 % des autres bovins, recul de 16 % des effectifs de porcs et de 6 % des effectifs de volailles. Seul le cheptel d'ovins-caprins serait en progression (+ 13 %). Ces évolutions doivent permettre une réduction de 20 % des émissions non énergétiques liées au cheptel.

La prise de décision

Ces objectifs et projections interpellent les bureaux régionaux et départementaux des chambres d'agriculture, qui se positionnent fin 2018-début 2019 en faveur du lancement d'une étude prospective conduite en interne sur l'évolution de l'agriculture bretonne vue par les élus des chambres d'agriculture. Ils considèrent que l'avenir de l'agriculture est exploré dans de nombreuses études, souvent sous un angle environnemental et avec une approche normative, mais que peu de ces études sont portées ou appropriées par le monde agricole, bien qu'elles soulèvent des questionnements et des remises en cause potentielles pour l'agriculture – l'élevage en particulier – et l'agroalimentaire. Leur attente est donc que l'avenir ne soit pas envisagé uniquement à l'aune des enjeux énergétiques et climatiques, mais qu'une réflexion systémique à laquelle ils puissent contribuer soit menée et que celle-ci intègre notamment les enjeux économiques et sociaux.

Les bureaux des chambres d'agriculture de Bretagne confirment que la Crab participera activement aux comités de pilotage des travaux nationaux, régionaux et territoriaux sur la stratégie nationale bas carbone pour les éclairer à la lueur de leurs expertises et expériences de terrain et pour être en mesure de porter des propositions dans le cadre des études nationales et régionales. Dès lors, il est envisagé que les travaux menés en interne puissent alimenter les études réalisées par les autres parties prenantes des débats sur l'avenir de l'agriculture régionale.

Le cadrage du projet

Les objectifs assignés au projet Agricultures bretonnes 2040 sont, pour les chambres d'agriculture de Bretagne, de se saisir des enjeux, de bâtir des scénarios propres à la profession agricole, d'analyser leurs impacts climatiques, économiques, sociaux et environnementaux et enfin de faire de cette étude prospective un thème de fil conducteur d'appropriation et de communication interne autour des transitions.

Les responsables professionnels souhaitent également que ces travaux puissent constituer une base de discussion pour élaborer une vision d'avenir pour l'agriculture bretonne, à décliner et à adapter aux différentes échelles territoriales : Europe (Pac...), région, territoires (PCAET...). L'étude doit également apporter du matériau pour identifier des trajectoires d'évolution pour les exploitations agricoles, pour établir une stratégie professionnelle pour l'agriculture bretonne et la Crab ainsi que pour repositionner l'accompagnement des entreprises agricoles par la Crab et pour identifier les outils nécessaires.

Les réalisations attendues après différents arbitrages sont donc la formalisation d'un audit transversal de l'agriculture et des filières bretonnes, la production de scénarios prospectifs et la conduite d'une analyse d'impact allégée.

Le groupe projet

Un groupe restreint, de onze collaborateurs, est constitué pour réaliser le travail, avec la répartition suivante des expertises :

- élevage : Élodie Dezat (spécialisation monogastrique) et Céline Favé (spécialisation herbivore);
- énergie, GES, nouvelles filières de production : Hervé Gorius et Laurence Ligneau;
- politiques environnementales climat-air-énergie : Charlotte Quénard;
- économie-emploi-tendances de consommation : Nicolas Debéthune, Arnaud Haye et Maud Marguet;
- animation territoriale : Hervé Le Goff;
- conseil des entreprises agricoles : Geneviève Lamour;
- agronomie : Lionel Quéré.

Au fil de l'avancement du projet, cette équipe a été renforcée par des appuis complémentaires, notamment pour la documentation des variables de l'étude et le chiffrage d'un des scénarios.

Le comité de pilotage et le groupe de travail en émanant

Le comité de pilotage constitué de représentants des quatre départements bretons, de ceux des différentes productions ainsi que de ceux du secteur agroalimentaire a été désigné par le bureau de la Crab. Deux co-présidents, Edwige Kerboriou (éleveuse dans les Côtes-d'Armor, membre du bureau de la chambre d'agriculture des Côtes-d'Armor) et Loïc Guines (éleveur en Ille-et-Vilaine et président de la chambre d'agriculture d'Ille-et-Vilaine), sont nommés pour assurer le pilotage politique du projet.

Une participation au comité de pilotage est également proposée à l'Association bretonne des entreprises agroalimentaires (Abea).

Un groupe de onze (en 2020), puis de douze élus (en 2021) émanant de ce comité s'est formé à la prospective aux côtés des collaborateurs pendant trois jours (juin 2020, janvier 2021).

Les phases de l'étude

L'étude s'est déroulée en 3 phases résumées dans le tableau 2.1.

Par la suite, différentes évaluations d'impacts ont été réalisées :

- Évaluation des impacts pour l'agriculture et l'agroalimentaire selon les acteurs de l'agroalimentaire (septembre 2021 à janvier 2022).
 - Trente-neuf dirigeants de l'agroalimentaire audités.
 - Trente-cinq salariés de l'agriculture et de l'agroalimentaire audités collectivement à l'occasion de la journée annuelle des salariés de l'agroalimentaire.
- Élaboration du chiffrage des volumes de production et du bilan carbone d'un scénario (mars 2021 à janvier 2022) à l'aide de l'outil ClimAgri® (Eglin *et al.*, 2016).
- Élaboration d'une évaluation environnementale et socio-économique des scénarios (lancement en février 2022, finalisation 1^{er} trimestre 2024).

Tableau 2.1. Des diagnostics aux scénarios, les différentes phases de l'étude.

Phase de l'étude	Objet	Équipes-groupes de travail mobilisés	Livrables réalisés / modalités	Réunion du comité de pilotage
Élaboration d'un diagnostic avril à novembre 2020	Diagnosics filières avril à juillet 2020	Équipe projet Équipe économie-emploi	90 entretiens 14 états des lieux	Comité de lancement (20/03/20) Comité de restitution des diagnostics filières (06/07/20)
	Entretiens d'approfondissement fin août à novembre 2020	Équipe projet Équipes des chargés d'animation territoriale	7 grands témoins audités 16 collectivités territoriales auditées	Comité de restitution des diagnostics territoriaux et des entretiens d'experts (16/10/20)
Construction du système prospectif juin 2020 à janvier 2021	Identification des variables juin 2020 à janvier 2021	Équipe projet Groupe de travail des élus du Copil (11 élus) Service des membres de l'équipe projet	2 jours de formation action 24 variables sélectionnées	
	Documentation des variables août 2020 à janvier 2021	Équipe projet, complétée des compétences internes <i>ad hoc</i> selon les thématiques	24 dossiers prospectifs	
Construction et test des scénarios Janvier à avril 2021	Identification des hypothèses novembre 2020 à janvier 2021	Équipe projet Membres du comité de pilotage	3 à 4 hypothèses décrites pour chaque variable 1 atelier prospectif collaborateurs sur les variables de contexte (3/11/20) 9 ateliers prospectifs collaborateurs-élus (8/12/20)	Comité de suivi (examen des variables de contexte) (25/11/20)
	Construction et rédaction des scénarios janvier à avril 2021	Équipe projet Groupe de travail des élus du Copil (11 élus)	1 jour de formation action 5 scénarios construits et rédigés	Comité de restitution des scénarios (18/02/21)
	Tests, rédaction et première appropriation interne des scénarios février à avril 2021	Équipe projet	1 présentation des résultats provisoire aux personnes auditées en 2020 1 questionnaire interne destiné aux élus et collaborateurs	Comité de restitution des résultats du questionnaire interne, lancement de l'étude d'impact (23/04/21)

» États des lieux préalables à la construction du système prospectif

Des états des lieux par filière

Quatorze états des lieux ont été élaborés à partir d'une mobilisation des données de référence et d'entretiens réalisés auprès de responsables professionnels et collaborateurs de la Crab, de représentants interprofessionnels ou d'acteurs de l'agroalimentaire ainsi que d'experts des filières. Le nombre d'entretiens a été variable selon les thématiques, en fonction du poids économique de la filière en Bretagne, du nombre d'interlocuteurs potentiels, mais aussi du nombre de sollicitations d'entretiens ayant abouti.

Les filières bretonnes énumérées dans le tableau 2.2 ont été analysées. Quelques spécificités méritent d'être relevées. Dans le cas de la viticulture, l'approche adoptée est essentiellement exploratoire pour cette production dont le développement est encore modeste et qui n'a pas encore de réelle structuration en filière. L'analyse sur les filières énergie s'est portée à la fois sur la méthanisation, sur le bois énergie et sur le photovoltaïque.

Le questionnement a repris une trame classique d'entretiens de diagnostic prospectif, avec une interrogation sur les dix à vingt années passées (changements identifiés, inerties, degré d'anticipation par les acteurs concernés, identification des changements imprévus, analyse de la pertinence des réponses et des actions qu'il aurait été opportun de mettre en œuvre), une projection sur les dix années à venir (changements et inerties exerçant une influence pour l'avenir), une hiérarchisation des enjeux et une analyse des atouts-faiblesses-opportunités et menaces. Pour chaque production ou filière, les entretiens et les éléments de bibliographie ont été restitués selon une trame commune, présentant des éléments de cadrage sur les caractéristiques et évolutions identifiées. Une synthèse de ces états des lieux a été présentée au comité de pilotage pour permettre d'enrichir et de valider les résultats obtenus.

Tableau 2.2. Liste des quatre-vingt-dix entretiens réalisés.

Filière ou production	Réalisateur Crab	Nombre de personnes auditées	Personnalités auditées
Lait	Conseillère et chargée d'études en production laitière Chargée de mission économie-emploi	12 personnes Un groupe Rés'agri 56 d'une dizaine d'éleveurs laitiers spécialisés en prospective	3 collaborateurs de l'interprofession laitière (Cilouest, Fédération nationale de l'industrie laitière (Fnil), Coopération agricole) 1 expert (Idele) 1 groupe d'éleveurs laitiers (6 éleveurs, certains récemment installés, d'autres en milieu de carrière ou proches du départ en retraite) 8 agriculteurs élus Crab (syndicalisme majoritaire et confédération paysanne)

Filière ou production	Réalisateur Crab	Nombre de personnes auditées	Personnalités auditées
Viande bovine – gros bovins	Chargé de mission économie-emploi	7 personnes	2 agriculteurs élus Crab 2 collaborateurs Crab 1 expert (Idele) 1 collaborateur de l'agroalimentaire/coopérative (Bigard) 1 administrateur de l'interprofession (élu Interbev)
Viande bovine – veaux	Chargé de mission économie-emploi	5 personnes	2 agriculteurs (1 élu Jeunes Agriculteurs et 1 responsable de l'organisation de producteurs Coopeva) 2 collaborateurs de l'agroalimentaire/coopérative (Denkavit, Tendriade) 1 collaborateur Crab
Viande porcine	Chargée de mission économie-emploi	6 personnes	4 agriculteurs (2 élus Crab, un administrateur de la coopérative Cooperl, un responsable du groupement Syproporc) 1 expert (Ifip) 1 collaborateur d'organisation professionnelle agricole (UGPVB)
Volaille de chair	Chargée de mission économie-emploi	7 personnes	3 agriculteurs (3 élus Crab) 1 collaborateur Crab 1 expert (Itavi) 1 collaborateur de l'administration (Draaf) 1 collaborateur de l'Interprofession
Œuf	Chargée de mission économie-emploi Chargée d'études et de conseil volailles	5 personnes	1 agriculteur élu Crab 1 expert (Itavi) 1 collaborateur de l'administration (Draaf) 1 collaborateur de l'Interprofession (CNPO) 1 collaborateur d'organisation professionnelle agricole (UGPVB)
Grandes cultures	Chargée de mission économie-emploi	10 personnes (9 entretiens)	4 agriculteurs (2 élus Crab, 1 administrateur de l'association Nutrinoë, 1 administrateur de coopérative Coop Garun-Paysanne) 1 collaborateur Crab 2 collaborateurs de l'agroalimentaire/coopérative (Ufab, Avril) 2 collaborateurs de l'interprofession (Intercéréales) 1 expert (Terres Inovia)

Filière ou production	Réalisateur Crab	Nombre de personnes auditées	Personnalités auditées
Légumes destinés à la transformation	Chargé de mission économie-emploi	8 personnes	2 agriculteurs (2 élus Crab dont 1 administrateur Eureden) 2 collaborateurs Crab (1 animateur Uopli, 1 animateur APILeg) 2 collaborateurs de l'agroalimentaire/coopérative (CLAL Saint-Yvi, Ardo) 1 collaborateur d'organisation de producteurs (Cenaldi) 1 collaborateur de l'interprofession (Unilet)
Légumes destinés au marché du frais	Chargée de mission économie-emploi	9 personnes (8 entretiens)	4 agriculteurs (1 élu Crab, 1 administrateur de coopérative Savéol, 1 administrateur de la station de recherche Cate, 1 administrateur d'association de maraîchers) 2 collaborateurs Crab 1 collaborateur d'organisation de producteurs (Cerafel) 1 collaborateur de l'agroalimentaire/coopérative (UCPT) 1 expert (Cate)
Forêt, bois	Conseiller forêt-bocage et bois énergie	5 personnes	3 collaborateurs CRPF (dont 2 élus Crab) 1 collaborateur d'outil de transformation (scierie SEFSB) 1 administrateur d'organisation de producteurs (Cetef 29)
Horticulture, pépinière	Conseiller en agronomie	2 personnes	1 agriculteur (1 élu Crab) 1 collaborateur d'organisation professionnelle agricole (FNPHP)
Cidriculture et pomme de table	Conseiller en agronomie	2 personnes	1 agriculteur (également administrateur de l'interprofession Maison cidricole de Bretagne) 1 collaborateur Crab
Viticulture	Conseiller en agronomie	3 personnes	2 agriculteurs (1 porteur de projet et 1 administrateur de l'Association pour la Reconnaissance des Vins de Bretagne) 1 expert (université de Rennes 2)
Énergie	Chargée de mission Climat, Air, Énergie, Déchets, Santé-Environnement Chargée de mission climat carbone	10 personnes	5 agriculteurs (4 élus Crab ayant des productions énergétiques ou une implication professionnelle liée, un responsable d'une association de méthaniseurs) 2 collaborateurs Crab 1 collaborateur CRPF (également élu Crab) 1 collaborateur d'association spécialisée (Aile)

Une analyse territoriale et des entretiens d'approfondissement

Des entretiens auprès de collectivités des quatre départements bretons

La phase de diagnostic de l'étude Agricultures bretonnes 2040 ne pouvait se cantonner à la seule étude des filières, qui aurait conduit à une vision trop verticale des enjeux, au risque de mal identifier les problématiques transversales, mais aussi les spécificités territoriales. La conduite d'une analyse davantage territorialisée et le recueil de visions de grands témoins ont eu pour objectif d'enrichir l'analyse systémique souhaitée.

Les entretiens menés ont repris la même trame de questionnement que celle adoptée pour les entretiens par filières, avec un prisme cette fois focalisé sur les enjeux de l'agriculture et de l'agroalimentaire du territoire. Les entretiens auprès des collectivités territoriales ont été réalisés par des collaborateurs du service Territoires de la Crab. Une liste diversifiée de structures a été audité dans l'objectif de recueillir les visions (voir tableau 2.3). Par ailleurs, une attention particulière a été portée sur la représentation des quatre départements bretons dans le choix de ces structures.

Tableau 2.3. Seize personnes auditées au sein de treize structures.

Départements	Structures auditées	Nombre de personnes auditées
Côtes-d'Armor (22)	Saint-Brieuc Armor Agglomération	1 élu
	Conseil départemental	1 collaborateur
		1 élu
Finistère (29)	Conseil départemental	1 collaborateur
	Concarneau Cornouaille Agglomération	1 élu
	Cabinet d'urbanisme Adeupa	1 collaborateur
	Haut-Léon Communauté	1 élu
	Syndicat de bassin versant du Meu	1 collaborateur
Ille-et-Vilaine (35)	Conseil départemental	2 collaborateurs
	Bretagne Porte de Loire Communauté	1 collaborateur
	Conseil départemental	1 élu
Morbihan (56)	Vannes Agglomération	1 élu
	Pontivy Communauté	1 élu
		1 collaborateur
22 – 29 – 56	Conseil de développement du Pays Centre Ouest Bretagne	1 élu

Ces entretiens complémentaires ont été réalisés après la phase de sélection des variables. Ils ont permis d'étayer l'analyse de ces dernières et les hypothèses retenues. Une synthèse a été rédigée selon la même trame que pour les entretiens par filière.

Par la suite, les messages clefs ont été classés selon les huit domaines thématiques du système prospectif d'Agricultures bretonnes 2040 : le changement climatique et les ressources; les politiques publiques; le contexte international; les territoires;

les consommateurs et citoyens; les entreprises agricoles et les ressources humaines; les techniques et productions agricoles ainsi que les marchés et filières.

Des entretiens d'approfondissement

Quelques entretiens complémentaires ont été réalisés auprès de grands témoins, pour apporter des éclairages complémentaires à ceux déjà obtenus, notamment concernant l'économie et les politiques agricoles, les tendances de consommation et de distribution, le développement de la région Bretagne. La liste des auditions figure dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Sept entretiens d'approfondissement.

Thématiques principales abordées	Personnalités auditées
Économie, politique agricole	Chef du service Études, références et prospectives (chambres d'agriculture France)
Consommation, distribution	Fondateur des éditions Dauvers
Bretagne, politiques environnementales	Élu au conseil régional de Bretagne
Agriculture, Bretagne, politiques agricoles	Élu au conseil régional de Bretagne
Agriculture, Bretagne, politiques agricoles, agroécologie, changement climatique	Maire du Mans, ancien ministre de l'Agriculture
Agriculture, Pays Bas, politiques agricoles, Union européenne, politiques climatiques	Ministère de l'Agriculture des Pays-Bas
Consommation, transformation, modes de production, qualité des produits	Fondateur de Valorex, président de Bleu-Blanc-Cœur

Les informations issues des entretiens complémentaires ont été intégrées dans les travaux et restituées de la même manière que les entretiens territoriaux.

» La construction du système prospectif

Une ébauche de système prospectif

En juin 2020, l'équipe du projet (11 collaborateurs) et le groupe de travail des élus (11 élus) ont suivi deux jours de formation à la démarche prospective. Déconstruction des idées reçues et mise en application immédiate des apprentissages ont ponctué les deux jours de travail à l'issue desquels une première ébauche du système prospectif était posée.

Les huit domaines d'analyse identifiés par ce collectif ont été par la suite pratiquement inchangés, à quelques reformulations près. Dans cette première version, ont été sélectionnés les domaines suivants : changement climatique et ressources (7 variables); politiques publiques (5 variables); territoires (7 variables); consommateurs-citoyens (4 variables); contexte international (4 variables); exploitations agricoles et ressources humaines (8 variables); techniques de production agricole (5 variables); filières y compris agroalimentaires et distribution (7 variables).

Les quarante-sept variables retenues dans cette ébauche ont été retravaillées par la suite : des regroupements de variables redondantes ont été opérés et certaines variables semblant moins pertinentes ont été abandonnées, débouchant sur la sélection des

vingt-quatre variables définitives. Une attention particulière a été apportée à la dénomination des variables, avec l'objectif d'aboutir à une formulation simple, suffisamment précise et compréhensible.

Ces étapes successives ont permis de construire le système prospectif définitif tel que présenté dans la figure 2.1.

La documentation des variables

Chacune des variables a été définie selon le même schéma. En premier lieu, une rétrospective des tendances structurantes des décennies précédentes et une identification des dynamiques en cours ont été établies par des binômes de collaborateurs, en valorisant la bibliographie et d'éventuels entretiens complémentaires. Ce travail a conduit à la définition de trois à quatre hypothèses d'évolution d'ici 2040 : tendancielle, alternative et une, voire deux hypothèses de rupture. Les précautions méthodologiques suivantes ont été adoptées. Les hypothèses ont été énoncées de façon à être indépendantes les unes des autres et d'une variable à l'autre et sont destinées autant que possible dans la mesure des connaissances mobilisées à couvrir le champ des possibles. Par ailleurs, pour une même variable, chaque hypothèse devait traiter des mêmes aspects, autrement dit décliner des sous-variables identiques ; ainsi pour la variable temps, la société, l'organisation des activités, la déclinaison territoriale, la déclinaison pour l'agriculture et la dimension réglementaire ont été examinées.

Plus concrètement, les hypothèses ont été construites par des binômes de travail. Ces hypothèses ont ensuite été examinées lors d'ateliers en petit comité prospectifs réunissant trois à six participants pour une durée d'environ deux heures (décembre 2020) et lors du troisième jour de la formation-action (janvier 2021). Chacun des groupes de travail disposait de la rétrospective, de l'identification des dynamiques en cours, d'une proposition d'hypothèse de tendance et d'une série de propositions de voie alternative ou de rupture pour élaborer les hypothèses définitives, souvent plus radicales que les ébauches proposées initialement par le binôme de collaborateurs en charge de chaque variable.

Des variables aux scénarios

L'ensemble des hypothèses posées pour les vingt-quatre variables représente *in fine* soixante-quatorze modalités. Pour les conjuguer de manière cohérente, le collectif de travail a identifié différentes tonalités possibles qui ressortaient de la lecture des tableaux d'hypothèses. Cette mise en scénario s'est déroulée en plusieurs séquences, la première qui s'est déroulée lors de la formation du groupe de collaborateurs et de responsables professionnels a permis de construire quatre scénarios. Une seconde séquence de travail avec les seuls collaborateurs a conduit à diviser un scénario moins cohérent en deux scénarios contrastés : le scénario territorial et le scénario végétalisation. Les séquences suivantes, avec les élus du groupe de travail, puis avec le comité de pilotage de l'étude, ont permis de valider une première version des cinq scénarios.

Ce travail a ensuite été soumis au questionnement critique d'un expert extérieur (Thierry Pouch, économiste au sein de l'organisme Chambre d'agriculture France) dans l'optique de s'assurer de la cohérence des scénarios et d'identifier d'éventuels partis pris dont le groupe n'aurait pas eu conscience.

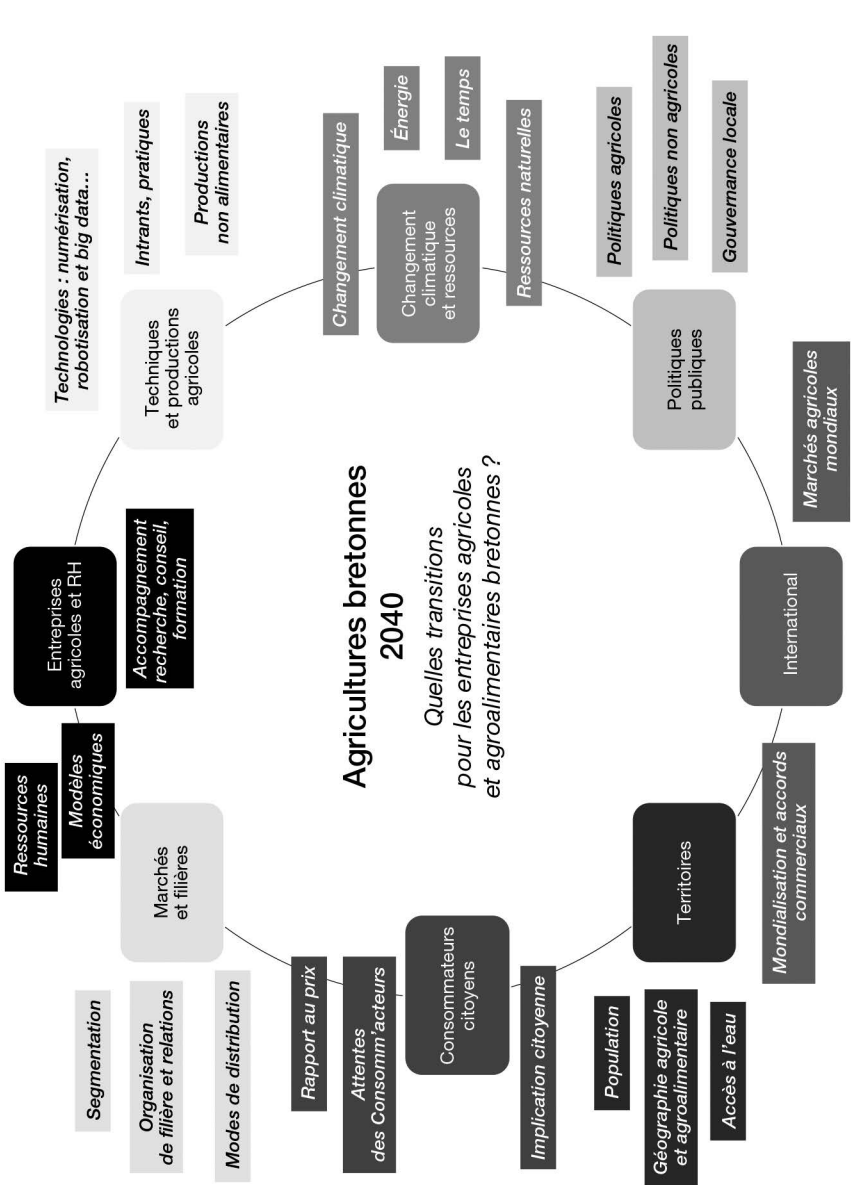


Figure 2.1. Le système prospectif retenu dans Agricultures bretonnes 2040 (source : Chambre d'agriculture de Bretagne).

La mise en récit a été réalisée par un collectif de cinq rédacteurs. Ce collectif s'est fixé un cadre rédactionnel commun et une obligation de relative concision :

- description succincte de la tonalité du scénario;
- présentation des déterminants du scénario (il s'agit là des points clés qui déterminent la réalisation du scénario, autrement dit les moteurs à l'œuvre);
- récit du scénario proprement dit avec le détail des variables qui n'ont pas été présentées dans la partie précédente. Certaines variables qui pouvaient s'avérer moins déterminantes dans certains scénarios ont dans ce cas été moins explorées : les rédacteurs se sont donc attachés à intégrer la description d'un maximum de variables pertinentes mais ont dû réaliser des compromis pour la lisibilité du scénario.
- éventuellement, ajout de quelques éléments de discussion.

Les cinq scénarios rédigés sont les suivants :

- une agriculture bretonne en mode résistance. Où règles environnementales et non-renouvellement des actifs entraînent un déclin de l'élevage. Il s'agit du scénario tendanciel;
- l'agriculture vise la neutralité carbone. Des agriculteurs au service d'un projet de société;
- une agriculture bretonne territorialisée. Où un quatrième acte de décentralisation s'est opéré sans qu'on le sache;
- priorité à l'économie. Les filières font le pari de la technologie;
- une agriculture bretonne plus végétale. L'élevage recule et offre une place croissante aux productions végétales.

Une dernière séquence de validation externe a été organisée auprès des acteurs audités lors de la première phase de l'étude, ce qui a conduit à quelques reformulations à la marge pour consolider les scénarios et en améliorer la compréhension.

► Conclusion

Pour être en mesure d'apporter une contribution au débat, les chambres d'agriculture peuvent s'appuyer sur la démarche prospective. Celle-ci permet de construire des scénarios finement adaptés au territoire et riches de l'expertise de terrain des responsables professionnels agricoles, des collaborateurs des chambres, mais aussi des acteurs des filières locales et du territoire auditionnés ou associés aux travaux.

Cette démarche de réalisation, à l'échelle de la région, d'une étude prospective globale et non centrée sur une seule filière ou thématique était une première pour la Crab. La méthodologie de prospective utilisée a été simplifiée et adaptée aux spécificités des chambres d'agriculture et a visé à permettre une implication forte des responsables professionnels agricoles. De nombreux entretiens ont été réalisés lors de la phase de diagnostic de l'étude afin de réduire certains des biais que pouvaient induire cette simplification et le pilotage par un comité exclusivement composé de membres de la Crab. Néanmoins, une part non négligeable de ces entretiens a été réalisée auprès d'élus de la Crab, de manière, notamment, à les impliquer pour répondre à un des objectifs du projet qui était de permettre une appropriation collective des enjeux par les élus et collaborateurs.

La volonté était également de réussir à construire plusieurs scénarios suffisamment contrastés. Les diverses expériences de diffusion des scénarios depuis 2021 montrent

que les cinq récits imaginés permettent de ne pas enfermer les acteurs dans une vision unique moins propice au dialogue que la Crab souhaitait susciter autour des grands enjeux pour l'agriculture bretonne.

Plusieurs limites ont été identifiées et plusieurs critiques ont pu être apportées sur les scénarios, en voici quelques-unes. Le centrage volontaire sur la région Bretagne, bien que le contexte plus global soit abordé au travers de plusieurs variables, mais de façon limitée compte tenu du nombre de variables sélectionnées, génère parfois une certaine frustration. Les scénarios de la Crab auraient pu être rattachés à des scénarios globaux de contexte agricole mondial existant dans la bibliographie ou construits en partenariat avec d'autres, ce choix méthodologique pourrait être à envisager dans d'autres exercices prospectifs similaires. Les auteurs déplorent ne pas avoir pu davantage associer des futurs et jeunes agriculteurs à leurs travaux, la diffusion permet de recueillir leurs visions mais celles-ci auraient certainement pu enrichir les travaux. Une construction plus fouillée des trajectoires qui amènent l'agriculture à chacun des futurs envisagés pour 2040 aurait également pu être réalisée.

Concernant les compartiments environnementaux, le sol n'a pas été analysé au travers d'une variable spécifique, mais est examiné dans les variables « ressources naturelles », « gouvernance locale » et « géographie agricole et agroalimentaire ». La question de l'eau transparaît peu dans les récits, alors même qu'elle a été abordée au travers des variables « ressources naturelles » et « accès à l'eau », compte tenu du cadre rédactionnel retenu. Par ailleurs, si les scénarios étaient construits aujourd'hui, la problématique de l'énergie (qui fait pourtant l'objet d'une variable) aurait sans doute joué un rôle plus structurant, et des éléments de cohérence complémentaires auraient été apportés aux scénarios pour expliciter leur mise en œuvre, en particulier le scénario « Priorité à l'économie », sans doute plus énergivore. L'analyse environnementale et socio-économique des scénarios permettra de renforcer la compréhension de la manière dont les problématiques eau, énergie et sol sont considérées dans les scénarios.

Un point fort ressort néanmoins en comparaison à d'autres exercices prospectifs davantage normatifs, c'est la considération apportée aux dimensions territoriales et humaines. Les agriculteurs sont souvent considérés comme une variable de résultat (vue sous un angle qualitatif) et non comme des forces motrices, au travers de leurs aspirations, choix de modèle économique, de système ou encore de degré d'implication dans leurs filières et dans leur territoire. C'est sans doute un des éléments à retenir pour une chambre d'agriculture que de ne pas négliger les questions sociologiques dans de tels exercices.

Enfin, chaque présentation suscite systématiquement la question du choix d'un scénario préféré. Par construction, la méthode adoptée ne visait pas à définir un scénario idéal ou un scénario repoussoir mais à la simple exploration. Reste à explorer la traduction de ces scénarios en orientations stratégiques : c'est là une autre histoire !

Chapitre 3

Vers une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso ? Approche territoriale et anticipatrice

Jean-Michel Sourisseau et Véronique Ancey

Ce chapitre s'appuie sur le rapport de la FAO intitulé « Une approche territoriale et anticipatrice pour une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso »⁴.

► Contexte et objectifs de l'étude

En 2018, l'instabilité politique au Sahel (et en particulier dans l'est du Burkina Faso) et la crainte des pays côtiers (et notamment le Togo) d'une contagion sur leur territoire entraînent un contexte extrêmement tendu dans la zone transfrontalière entre Sahel et pays côtiers. Ce contexte accroît alors les contraintes et les risques déjà existants liés à la mobilité pastorale saisonnière (Corniaux *et al.*, 2016; Benjaminsen *et al.*, 2018; Mercandalli, Losch, 2018; Krätli, Toulmin, 2020; Pellerin *et al.*, 2021). En effet, depuis fin 2017, les restrictions au passage des frontières et l'application de règlements limitant la mobilité des pasteurs ont été un facteur de risque supplémentaire, aggravant la situation dans le Sahel (texte de position de la FAO, de l'Unicef et du Programme alimentaire mondial, rencontre de Niamey, 2018). L'absence de mise en œuvre d'une politique inclusive régionale au sujet de la transhumance et des outils de régulation des marchés a eu des conséquences lourdes sur la vie économique et sociale des agriculteurs, des éleveurs et de leur famille (FAO, 2018). Les conflits ont entraîné des dégâts de culture, l'abattage sauvage d'animaux et des morts humaines, notamment au Nigeria, au Bénin et au Ghana (OCDE, 2018).

Des textes communautaires et des négociations locales bilatérales existent. Par exemple, le protocole de la Cedeao sur la libre circulation des personnes, des biens et des services est une pierre angulaire de l'intégration régionale. Par ailleurs, la Cedeao a approuvé en 2003 un règlement (C/REG.3/01/03) sur l'application des règlements de la transhumance entre États membres. Toutefois, malgré des initiatives locales autour de comités transfrontaliers de la transhumance, pour gérer les zones d'accueil et les routes de transhumance, ces règlements ne se traduisent pas par des actions à la hauteur des enjeux. Des programmes régionaux, susceptibles de systématiser le développement des zones pastorales et des infrastructures pour la transhumance, sont manquants.

4. Sourisseau, J.-M., Ancey, V. 2021. *Une approche territoriale et anticipatrice pour une transhumance apaisée à la frontière entre le Togo et le Burkina Faso – Synthèse*. Rome, FAO.

Face à ces constats, et conjointement à la poursuite des initiatives pour le renforcement du dialogue et des soutiens au pastoralisme, hypothèse est faite que le double recours à des approches territoriales et à l'anticipation peut être adapté à certains des défis du pastoralisme transfrontalier. En effet, la prospective territoriale offre, selon nous, deux avantages complémentaires :

- dans sa dimension territoriale, elle permet de replacer les mobilités animales et les questions de gestion durable de ressources à une échelle plus large que celle des seuls acteurs du pastoralisme, en s'intéressant à la place de la transhumance dans le développement des territoires (Corniaux *et al.*, 2012; Gonin, Gautier, 2015), à la durabilité comme interaction dans et entre les écosystèmes (Hubert, Ison, 2011), au cadrage politique des analyses de conflits (Rangé *et al.*, 2020);
- dans sa dimension prospective, elle permet de s'extirper des vives tensions actuelles et de dépassionner les débats; en se projetant dans le futur, en libérant l'imagination, elle ouvre de nouvelles perspectives (Sourisseau *et al.*, 2017).

Cette étude vise donc à compléter et à enrichir les initiatives déjà engagées localement, vers une transhumance transfrontalière apaisée, et au-delà vers des réponses régionales aux défis de la mobilité des animaux et des éleveurs (Corniaux *et al.*, 2012; Gonin, Gautier, 2015). Il a pour objectif de tester la capacité d'approches anticipatrices et territoriales à offrir des espaces de concertation originaux et inédits. Il vise enfin à formuler des recommandations pour un développement territorial – et donc multi-sectoriel – renforçant les place et rôle de la transhumance et sa coexistence apaisée avec les autres secteurs d'activité dans les territoires.

► Approche générale

Zone d'étude

Le territoire d'étude se situe au nord du Togo et à l'est du Burkina Faso. Il illustre parfaitement les enjeux économiques et politiques des échanges entre un sud côtier jusqu'ici plutôt préservé des tensions terroristes et un Sahel qui ne parvient pas à retrouver stabilité et paix, vivant une situation sécuritaire en constante dégradation depuis le début des années 2010.

La principale richesse du Togo est son port et sa capacité à l'utiliser pour commercer *via* mer et terre avec ses voisins. Ainsi, l'accès au Burkina Faso est vital pour l'économie nationale, et l'activité à la frontière au poste de Cinkassé témoigne du dynamisme et de l'ampleur des flux marchands entre la côte et le Sahel *via* la route internationale. De l'autre côté de la frontière, les échanges avec le Togo sont tout aussi stratégiques. Les zones frontalières sont en effet, malgré des ressources naturelles prometteuses, parmi les plus défavorisées du Burkina Faso, et sont particulièrement touchées par l'insécurité. Dans ce contexte, elles se tournent vers le sud plus accessible aujourd'hui que la plupart des autres zones actives de leur pays.

Ces flux génèrent des activités induites conséquentes, en plus des taxes bénéficiant d'abord au pays, et moins significativement à la zone frontalière. La frontière est aussi un point de repère pour les pasteurs devant déplacer leurs animaux à la recherche de ressources fourragères, mais aussi pour les vendre. Le flux d'animaux la traversant est considérable et contribue à la fourniture de bœufs de labour pour les agriculteurs et à l'apport en protéines animales aux habitants de la côte. Certains animaux font

aussi le chemin inverse, passant du Togo au Burkina Faso durant l'hivernage. Ces déplacements contribuent aux dynamiques commerciales, activités et richesses induites des échanges transfrontaliers, et bénéficient à tout le territoire, au Togo comme au Burkina Faso.

Le choix de cette zone frontalière se justifie donc d'abord par cette activité pastorale dynamique, inscrite dans un territoire transfrontalier dynamique. Il se justifie aussi parce que le Togo, par rapport à ses voisins, a résolument choisi de mettre en place des politiques de gestion des flux d'animaux. Son objectif est de réguler plutôt que de réduire les échanges, de prévenir les conflits avec les agriculteurs *via* un encadrement des déplacements plutôt que de mettre en place des mécanismes répressifs. On assiste ainsi, de fait, à des mouvements contraires en termes de territorialisation transfrontalière. D'un côté, la menace terroriste au Burkina Faso et la multiplication des conflits entre agriculteurs et éleveurs – réelle bien qu'amplifiée par la violence de certains événements – ont tendance à durcir la frontière et à limiter les échanges. De l'autre, les communautés de part et d'autre de la frontière ont, en ces temps difficiles, besoin de davantage commercer, et plus largement de renforcer les liens sociaux, de « faire territoire » par-delà les limites administratives. La transhumance occupe une place particulière, à la fois intégratrice et source de tension, dans ces recompositions territoriales, ce qui renforce encore l'intérêt générique de la zone pour penser le pastoralisme transfrontalier.

Un autre intérêt pour l'étude, mais qui rend aussi son exécution difficile, réside dans le fait que la zone fait territoire, alors même qu'elle est soumise à un découpage administratif qui contraint fortement ses logiques territoriales. Le territoire couvre en effet trois entités administratives principales de part et d'autre de la frontière (figure 3.1). Au Burkina Faso, il s'agit des provinces de la Kompienga, dans la région est, et du Koulpélogo, dans la région centre-est. Au Togo, il s'agit de la Région des Savanes, qui occupe toute la partie nord du pays.

La province du Koulpélogo comprend une commune urbaine (Ouargaye), 7 communes rurales (Comin-Yanga, Dourtenga, Lalgaye, Sangha, Soudigui, Yargatenga, Yondé) et 184 villages pour une superficie de 2492 km². La province de la Kompienga occupe 7280 km². Elle comprend une commune urbaine, Pama, comprenant elle-même 14 villages, et 2 communes rurales, Kompienga (comprenant 17 villages) et Madjoari (comprenant 8 villages). La Région des Savanes occupe 8470 km². Elle est divisée en 7 préfectures (à l'ouest Cinkassé, Tône, et son chef-lieu Dapaong, Tandjouaré; à l'est Kpendjal, Kpendjal Ouest, Oti, Oti Sud.), avec un sous-découpage récent ayant donné lieu à la création de 16 communes.

Dans ce découpage régional et du fait de politiques de décentralisation timides, mais aussi souvent inabouties et peinant à être pleinement mises en œuvre, les deux provinces burkinaises et la Région des Savanes sont plutôt incitées à tourner leur réflexion stratégique vers leur capitale nationale respective. Dans l'organisation administrative, les schémas de développement sont écrits et structurés autour des instances régionales, mais sur la base d'une réflexion, d'objectifs et d'indicateurs nationaux. Il s'agit là d'une nouvelle force contraire à la territorialisation, qu'il ne faut pas négliger. Cette gouvernance centralisatrice laisse aujourd'hui peu de marge de manœuvre aux acteurs des communes et des préfectures, mais aussi

des régions, pour nouer des alliances et conduire des politiques dans leur espace régional transfrontalier.

Ces contraintes organisationnelles et administratives se traduisent aussi, très concrètement, par la grande difficulté à trouver des données homogènes, cohérentes et synchrones dans les différentes entités administratives composant notre espace transfrontalier. La reconstruction d'une trajectoire territoriale est ainsi une véritable gageure.



Figure 3.1. Le territoire d'étude : deux provinces au Burkina Faso, une région au Togo (source : FAO, 2021).

Cadre méthodologique

Une des originalités de l'étude est la diversité des approches proposées, chacune constituant une étude dans l'étude, l'ensemble devant former un tout cohérent représenté en figure 3.2. La démarche d'anticipation s'est donc appuyée sur un diagnostic territorial et sur une démarche de prospective proprement dite.

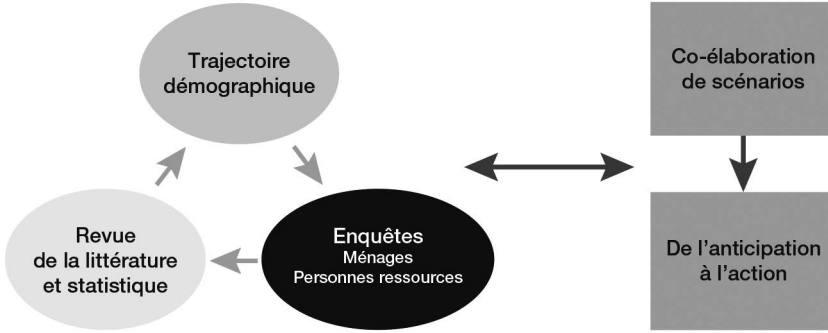


Figure 3.2. Schéma synthétique du cadre méthodologique mis en place (source : FAO, 2021).

Le diagnostic territorial mené s'est appuyé sur un assemblage de trois grandes sous-études :

- une exploration bibliographique du territoire visant à compiler des données jusqu'alors éparses pour tenter de reconstituer grossièrement le passé et le présent du territoire. Cette vision dynamique présente de nombreuses limites, la complexité de fonctionnement d'ensemble d'un territoire ne pouvant être capturée par l'analyse des seuls jeux de données statistiques ;
- la caractérisation des trajectoires démographiques des trois entités administratives du territoire transfrontalier et leurs projections selon différentes hypothèses à l'horizon 2035 et 2040 (Sourisseau *et al.*, 2017). Ces projections démographiques sont ensuite utilisées pour approcher les besoins en terres, en infrastructures et en emplois du territoire à l'horizon 2035 ;
- la récolte de données de « première main » *via* des enquêtes afin de compléter la revue de la littérature et les bases de données. Cinq cent soixante-huit agriculteurs et 61 autres personnes ressources ont été interrogés de part et d'autre de la frontière sur leurs représentations du passé et du présent, et leur projection à l'horizon 2035. Le focus a davantage été mis ici sur la transhumance et sur sa perception par les enquêtés. L'objectif est de ne pas s'en tenir aux visions des acteurs de la transhumance, mais de recueillir aussi celles de ceux et celles qui ont un rapport plus distant avec elle.

Concernant la démarche de prospective en elle-même, deux ateliers de co-élaboration de scénarios ont réuni 21 experts et expertes (11 du Togo et 10 du Burkina Faso), animés par une équipe de 7 personnes. Dix sessions de travail collectif successives ont permis au groupe d'experts de construire des images contrastées du futur du territoire, allant jusqu'à l'écriture d'histoires du futur incluant différentes formes de transhumance et leur participation au territoire. Ces dix sessions visaient toutes des objectifs spécifiques (tableau 3.1). Enfin, un troisième atelier organisé en trois sessions,

valorisant les représentations du futur ainsi construites, et réunissant le même groupe d'experts, a produit des premières recommandations, ciblant la gouvernance locale et la coopération transfrontalière pour une transhumance apaisée.

Tableau 3.1. Objectifs des différentes sessions mises en place pendant la démarche de prospective.

Phase	Sessions	Objectifs
Co-élaboration participative de scénarios	1	Définition du système et de la question : le diagnostic, restitué au début de l'atelier, a permis de stabiliser la problématique, de préciser l'horizon temporel d'anticipation.
	2	Introduction à la question et à la démarche de l'anticipation : il s'est ici agi de réaliser une fresque historique qui retrace les événements externes et internes qui ont influencé le territoire, et d'identifier les espoirs et craintes relatifs à des événements qui pourraient se produire.
	3	Identification des facteurs de changements du territoire : ces forces correspondent à des dynamiques passées, présentes et futures, perçues comme ayant potentiellement une influence sur l'évolution du territoire.
	4	Identification des forces motrices (analyse structurelle) : la classification des forces en différents groupes (moteurs, leviers, produits, singulières) permet de caractériser la structure du système et de sélectionner les principales forces dites « motrices » : celles qui ont une grande influence sur les autres et en sont peu dépendantes.
	5	Définition des états du futur (analyse morphologique) : pour chaque force motrice sélectionnée, on explore un jeu d'hypothèses contrastées appelées aussi « états du futur plausibles ».
	6	Co-élaboration des trames de scénarios : une trame est une combinaison intégrant une hypothèse d'évolution pour chacune des forces motrices, combinaison présentée sous forme de synopsis décrivant une situation future de la région transfrontalière Togo-Burkina en 2035.
	7	Écriture des synopsis : les trames sont développées sous forme de synopsis, des paragraphes courts combinant les différents états du futur de chaque force motrice.
	8	Développement des narratifs : les synopsis sont développés en narratifs complets sous la forme d'un texte cohérent et plausible dans lequel les experts incorporent les autres facteurs de changement.
	9	Intégration de la variable transhumance : à l'issue du développement de tous les narratifs, le groupe a procédé au choix des scénarios plus contrastés pour réintégrer la question de la transhumance.
	10	Introduction aux approches de <i>backcasting</i> : cette session a permis aux participants de se projeter dans l'utilisation des scénarios pour changer le présent.

Phase	Sessions	Objectifs
Recommandations pour l'action	11	Choix du périmètre des recommandations et définition d'une vision : les histoires du futur peuvent être utilisées pour éclairer les décisions des acteurs, simplement par mise en circulation et débats publics. Mais les histoires peuvent aussi apparaître comme des visions à atteindre et inspirer des politiques publiques à mettre en œuvre.
	12	Conditions de l'action (acteurs, changements, contraintes et opportunités) : les acteurs les plus importants pour réaliser la vision ont été identifiés, et les changements à opérer et les obstacles à éviter précisément définis.
	13	Stratégies et recommandations pour l'action : durant cette dernière session, les experts se sont concentrés sur l'écriture de propositions très concrètes d'actions, pour améliorer la gouvernance transfrontalière dans les domaines de la sécurité, de la coopération entre les collectivités locales et de la transhumance.

► Résultats et enseignements

Diagnostic territorial

Le poids de la croissance démographique sur les dynamiques territoriales

Les dynamiques territoriales sont structurées depuis 50 ans par le déplacement des zones de culture de l'ouest vers l'est (figure 3.3), principalement au détriment des savanes, ainsi que par leur densification partout sur le territoire, sous l'effet d'une forte pression démographique. Ce processus d'occupation de l'ouest vers l'est devrait perdurer dans l'avenir, alors qu'entre 2020 et 2035, la population du territoire pourrait en effet passer de 1,65 million à 2,58 millions d'habitants, si les déplacements, et notamment ceux liés à la situation sécuritaire, ne modifient pas les équilibres en place.

Outre la densification massive du territoire, la santé, l'éducation et l'emploi sont des défis considérables si les prévisions démographiques, et notamment le rajeunissement de la population sur l'ensemble du territoire, se confirment. Quand 33 500 jeunes entraient sur le marché du travail en 2015, ils seront 53 400 en 2035, et plus de 60 000 en 2040, soit un nombre total d'emplois à créer de près de 750 000 d'ici 2035 et de 950 000 d'ici 2040. Les projections des besoins en personnels et infrastructures de santé et d'éducation, au regard des niveaux atteints lors des dernières décennies, rendent peu probable l'alignement des systèmes sur les standards internationaux.

La nécessaire mais difficile diversification économique

L'agriculture et l'élevage continuent d'occuper près de 90 % des actifs, avec une remarquable permanence. Ces secteurs n'enregistrent pas de gains de productivité significatifs; l'accroissement des surfaces suit la croissance démographique, avec cependant quelques ajustements dans les systèmes de culture (figure 3.4). Les systèmes d'élevage demeurent largement dominés par l'élevage agro-pastoral mobile et allaitant, pour les bovins comme pour les petits ruminants. Chez les agriculteurs, la présence de bœufs de labour sédentarisés, notamment pour la culture du coton, est néanmoins fréquente. Mais ces animaux sont issus d'un élevage pastoral mobile.

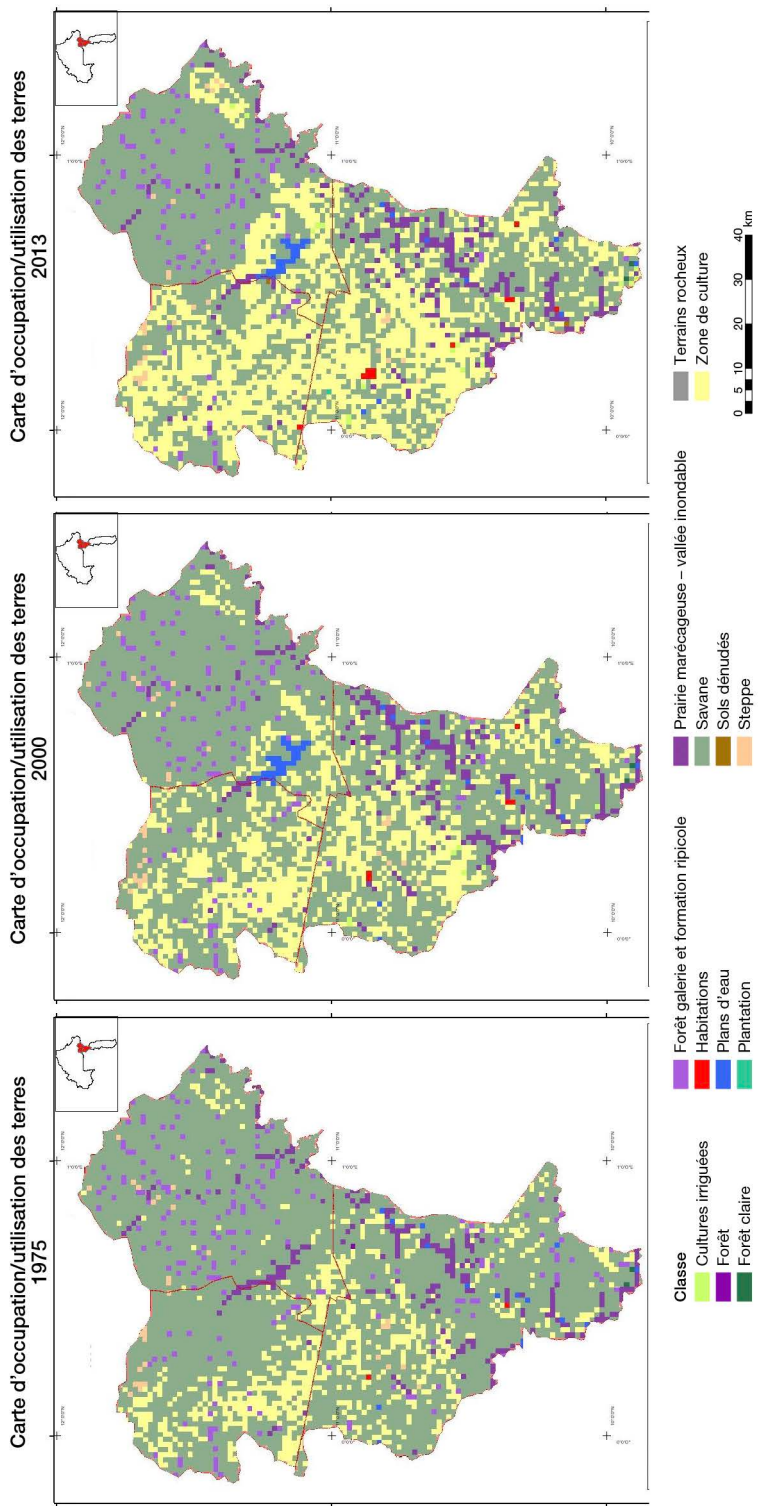


Figure 3.3. Évolution des surfaces des zones de culture 1973-2013 (source : FAO, 2021 ; d'après les données U.S. Geological Survey's – Earth Resources Observation and Science Center).

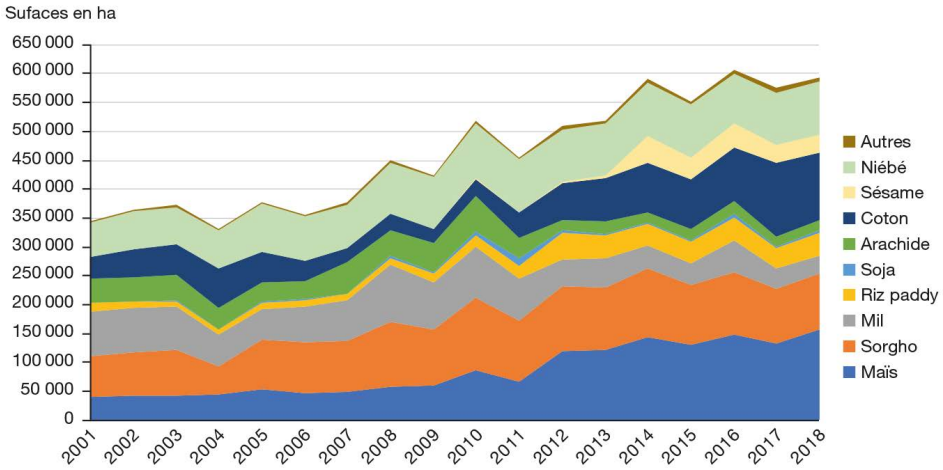


Figure 3.4. Évolution des surfaces cultivées (hors maraîchage) sur l'ensemble du territoire d'étude (source : FAO, 2021).

La faiblesse de la diversification économique reste bel et bien une caractéristique forte du territoire et le signe de marges de manœuvre limitées dans les options stratégiques offertes. Mis à part pour le coton, mais dont les activités aval ne sont pas localisées sur le territoire, l'agroalimentaire ne trouve pas de filières dans lesquelles se développer. Conjointement, le tissu des entreprises du territoire est peu dense et concerne essentiellement le petit commerce et l'artisanat. La mine ouvre des perspectives intéressantes potentiellement, mais présente aussi des risques indéniables de mauvaise gouvernance. De même, les promesses d'un tourisme organisé autour des parcs nationaux dans la zone toute proche sont pour l'heure non tenues, du fait d'une pression humaine peu maîtrisée, mais surtout parce que ces zones au Burkina Faso sont aujourd'hui des bases arrière des terroristes.

Des territoires marginalisés dans leur espace national

La Région des Savanes est dans la durée bien plus « pauvre » que le reste du Togo, et bien plus inégalitaire que les régions de l'est et plus encore du centre-est du Burkina Faso. Pour autant, les derniers chiffres disponibles semblent attester d'un rattrapage national sur cet indicateur, ainsi que d'une homogénéisation des taux entre les trois régions. Les différentes enquêtes nationales auprès des ménages insistent en particulier sur la trajectoire positive de la région est au Burkina Faso, tirée par le développement de la commune urbaine de Fada N'Gourma. S'il est difficile de juger de l'impact de la crise politique de 2015 et de la dégradation plus récente de la situation sécuritaire sur les revenus et la pauvreté des ménages du territoire, il est à craindre que le ralentissement économique objectivement observé ait déjà eu des répercussions sur les indicateurs de bien-être. Il est à craindre aussi que les écarts entre le Burkina Faso et le Togo se soient creusés en termes de revenus et d'inégalités.

Des représentations contrastées sur l'avenir du territoire

Les enquêtes effectuées auprès de l'échantillon de ménages ruraux dans le territoire confirment les conditions de vie difficiles, mais ont permis aussi de mieux comprendre

comment les individus se représentent la trajectoire de leur territoire d'appartenance, ainsi que ses avenir possibles.

Par exemple, les hommes chefs de famille interrogés ont une perception de la taille idéale de la famille avec notamment environ 5,5 enfants par épouse mais ce nombre serait en diminution. Il est déjà inférieur (4,5) chez les jeunes. Toutefois, le planning familial reste méconnu pour une partie de la population, y compris chez les jeunes, tandis que seules 24 % des femmes déclarent l'avoir déjà consulté. Ces perceptions, avec toutes les limites liées à l'enquête, indiquent que la transition démographique devrait être lente et progressive. Par ailleurs, les parents interrogés sur l'avenir de leurs enfants anticipent un exode rural très important, essentiellement vers la capitale mais aussi vers les villes secondaires (en particulier au Togo). De fait, 81 % des jeunes au Togo et 72 % au Burkina Faso déclarent vouloir vivre en ville.

Scénarios co-élaborés

Partant d'une sélection des grandes variables de changement du territoire, le groupe d'experts a sélectionné huit forces motrices sur lesquelles les différentes images du futur du territoire ont été construites. Ce sont les suivantes :

- capital humain : qualité de l'éducation et de la formation des populations et capacité des populations à s'impliquer dans le développement du territoire ;
- gouvernance locale : qualité de la gouvernance locale dans le territoire : renouvellement des élus, redevabilité, transparence, participation, etc. ;
- sécurité : niveau de sécurité des biens et des personnes et collaboration entre services de sécurité de part et d'autre de la frontière ;
- croissance démographique : niveau de croissance naturelle de la population ;
- structuration professionnelle : qualité de la structuration des organisations professionnelles locales (agriculteurs, éleveurs, artisans, commerçants, pêcheurs, exploitants forestiers, etc.) ;
- activités minières : niveau de développement de l'activité minière et de la qualité de sa gestion ;
- coopération décentralisée transfrontalière : niveau et qualité de la coopération entre les collectivités territoriales de part et d'autre de la frontière ;
- préservation des écosystèmes : l'état des écosystèmes : couverture végétale, biodiversité faunique, floristique, lacustre.

Puis, en imaginant des états du futur de ces forces et en les combinant, le groupe d'experts a ébauché 15 scénarios, réduits à 8 images du territoire en 2035, intégrant la place que pourrait occuper la transhumance dans ces futurs. À titre d'exemple, deux des images du territoire en 2035, intégrant les possibles rôle et fonctions de la transhumance, sont présentées dans les encadrés 3.1 et 3.2.

Recommandations pour l'action

Les actions préconisées concernent cinq grands domaines : la production de textes réglementaires transfrontaliers ; la formation et la sensibilisation à la bonne gouvernance ; la production institutionnelle et les mécanismes de suivi ; le financement de la gouvernance et de la coopération ; la production et la gestion des données et des connaissances pour la gouvernance et la coopération. Un exemple des recommandations est donné en figure 3.5.

Actions et stratégies

Production institutionnelle et mécanisme de suivi

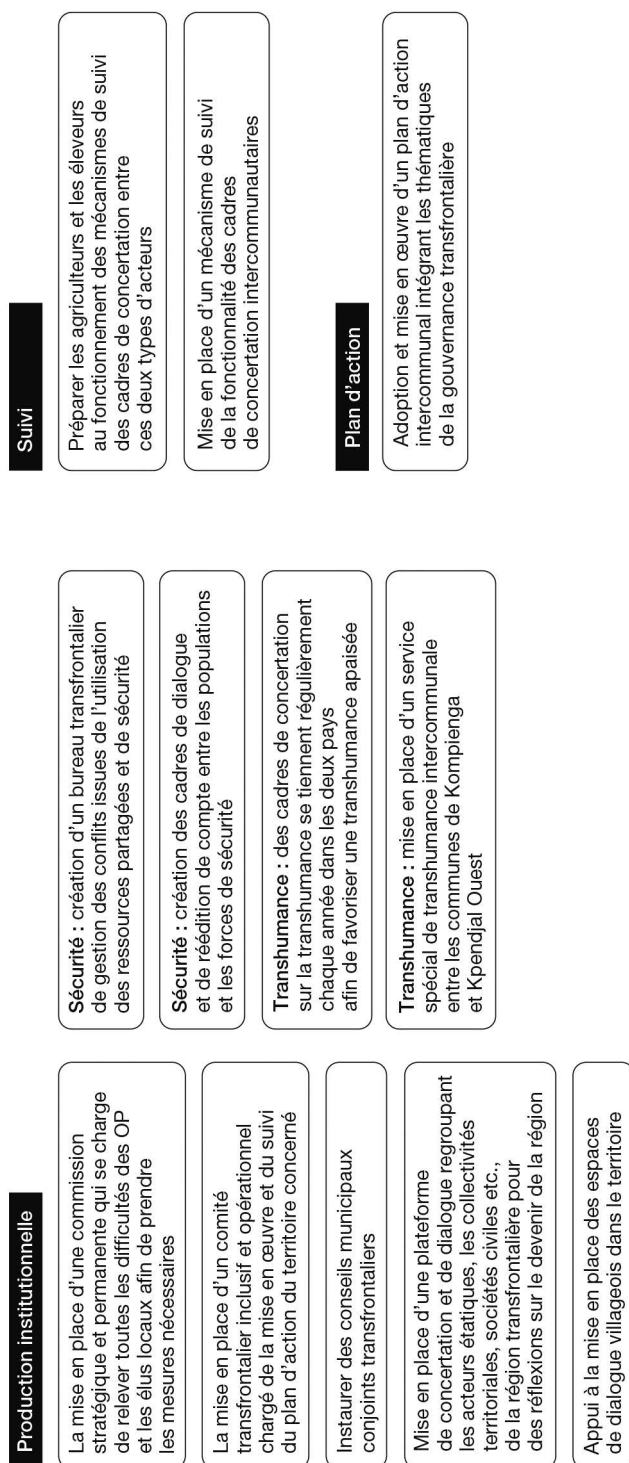


Figure 3.5. Exemple de recommandations formulées par les groupes de travail pour le domaine de la production institutionnelle et les mécanismes de suivi. OP : organisation professionnelle (source : FAO, 2021).

Encadré 3.1. Scénario « Oasis du désert »

En 2035, le territoire transfrontalier entre le Togo et le Burkina Faso est un vaste espace quasi désertique caractérisé par la faiblesse de sa flore et de sa faune, et le tarissement des plans d'eau. L'activité principale demeure l'élevage avec une forte propension ancestrale vers la transhumance transfrontalière. L'effectif du bétail de la zone est évalué à plus de 850 000 unités bétail tropical (UBT). Longtemps handicapé par la rareté des ressources hydriques et alimentaires, l'élevage bénéficie au cours de ces dernières années d'un important investissement permettant une semi-sédentarisation. Une agriculture de subsistance avec des technologies adaptées au sahel (irrigation, zaï, demi-lune, etc.) est pratiquée. Des techniques adaptées de cultures fourragères permettent aux éleveurs de faire du bon foin et de constituer un stock important dans les magasins de la coopérative.

En outre, la coopération transfrontalière est dynamique et performante, caractérisée par des jumelages, des ententes et des intercommunalités entre les collectivités, permettant la planification commune de projets. Dans les nombreux projets de cette coopération, un accent particulier a été accordé aux défis de la mobilité du bétail. Ainsi, des pistes pastorales balisées, des aires de repos, des forages solaires, des parcs de vaccination ont été mis en place, facilitant la mobilité du bétail vers les points d'oasis. À la croissance démographique forte, s'ajoute un flux migratoire important lié aux activités minières et à la prospérité de la transhumance. Les ressources humaines ont une éducation et une formation professionnelle de qualité qui sont en adéquation avec les besoins effectifs et pour tous. Cependant, la pratique de la transhumance soustrait une partie des éleveurs du système éducatif classique, qui a conduit à la mise en place de centres d'alphabétisation et de formation professionnelle adaptés aux besoins des éleveurs.

Les ressources minières sont exploitées par des procédés modernes respectant le développement durable avec une gestion transparente permettant à toute la population de bénéficier des retombées positives. La décentralisation est une réalité et les principes de redevabilité, de transparence, de participation, d'équité genre et d'opérationnalité sont respectés, la gouvernance est donc assurée par les élus locaux. Ces élus locaux, avec l'appui des partenaires techniques et financiers et du gouvernement, ont, au cours de leurs mandats, permis la construction et la fonctionnalité de diverses infrastructures socio-économiques. Parmi ces infrastructures, on note : des marchés à bétail transfrontaliers où les produits d'élevage se vendent et s'exportent facilement et sans tracasserie vers les zones côtières ; des infrastructures de stockage de céréales, d'aliments bétail, de médicaments vétérinaires, autogérées par des centres d'autopromotion féminine, et des auxiliaires villageois d'élevage ; des centres de distribution d'énergie renouvelable et d'eau potable pour toute la population ; des postes vétérinaires sont bien équipés et dotés de personnels qualifiés.

Pour donner une impulsion particulière au secteur de l'élevage et du pastoralisme, les infrastructures pastorales mises en place dans le cadre de la coopération transfrontalière (pistes pastorales, parc, forage) sont gérées par les élus locaux et par les associations professionnelles d'éleveurs. Toutes ces infrastructures permettent aux éleveurs de conduire, dans le même territoire, sans contrainte majeure leur troupeau d'une zone à l'autre et autour des points d'oasis où se développe la culture fourragère. Des marchés de bétail connaissent une grande affluence et les agriculteurs en profitent pour acheter des taurillons pour la culture attelée. En contrepartie de ce lourd investissement en faveur du pastoralisme, les communes bénéficient

Encadré 3.1. (suite)

de plusieurs retombées positives de cette mobilité à travers des taxes de mobilité et des taxes liées aux ventes dans les marchés de bétail. Ces taxes ensemble constituent près de 60 % du budget de la commune.

Les organisations professionnelles (OP) locales sont bien organisées et dynamiques. En partenariat avec les forces de sécurité, les OP ont lancé un système permettant le déplacement sécurisé des transhumants. Ce système repose sur l'utilisation obligatoire d'un badge d'identification. L'apport diversifié de la transhumance sur les différents maillons de l'économie (agriculture, commerce, fiscalité) a contribué à une réduction de la pauvreté sur le territoire qui se situe autour de 3%. Une stratégie de défense transfrontalière dans laquelle les communautés collaborent avec les forces de sécurité et incluant l'utilisation de robot permet une absence de conflits communautaires et la libre circulation des personnes et des biens dans un climat sécurisé. Cette stratégie mise en place éloigne le territoire de l'attaque des terroristes que connaissent certains territoires de la sous-région.

Encadré 3.2. Scénario « La face du chaos : quand l'homme contredit la générosité de la nature, le chaos est presque toujours à l'affût »

En 2035, la région transfrontalière entre le Togo et le Burkina Faso est caractérisée par un écosystème (forêts, animaux, cours d'eau) luxuriant avec des ressources étendues et diversifiées qui fonctionnent de manière équilibrée. La zone compte non seulement des parcs et des réserves mais aussi d'énormes espaces pastoraux et cultivables. Ce potentiel naturel attire des éleveurs transhumants de toute la région avec les avantages socio-économiques afférents. Ainsi, les relations entre les transhumants et les populations permettent à ces derniers de bénéficier des effets de l'élevage dans l'agriculture et aussi des échanges commerciaux entre ces deux communautés.

Cependant, des menaces pèsent sur cet atout de la zone. En effet, il n'existe pas de coopération intercommunale car les communes sont reversées dans l'administration centrale. Il n'y a aucune vision stratégique commune de développement à l'échelle du terroir : autant dans le domaine des échanges commerciaux que dans celui du développement des filières du territoire et des infrastructures agro-sylvo-pastorales et halieutiques. Ainsi, la transhumance est mise à mal par ce manque d'organisation du terroir. Les éleveurs sont persécutés dans la zone et certains préfèrent s'éloigner de ce terroir, fuyant les multiples taxes et contraintes liées à leur libre circulation dans le terroir.

La population est dans une situation d'insécurité généralisée à cause de la rupture de collaboration transfrontalière entre les services de sécurité et la population, et des tensions au sein des services de sécurité. Cela met à mal la cohésion sociale et l'intégration entre les peuples de part et d'autre de la frontière. Ce manque de collaboration est d'autant plus contraignant pour les transhumants obligés de se déplacer de part et d'autre de la frontière à la recherche de pâturage. Ces derniers sont même accusés, à tort ou à raison, de braquage, vol, kidnapping et autres activités illicites comme la divagation des animaux dans les champs, l'abattage d'arbres pour le fourrage, etc.

Le territoire est dominé par des potentats locaux. La gestion des biens communs est familiale et ethnocentrique avec une confiscation des ressources par des pseudo-propriétaires terriens organisés et violents, ce qui empêche l'exploitation des

richesses minières. Difficile de trouver des moyens pour introduire des technologies nouvelles dans les domaines agricoles et l'élevage, secteurs les plus importants dans le terroir. Plus grave, les populations sont privées d'infrastructures et d'équipements de services sociaux de base.

Les organisations professionnelles sont disloquées et la représentation des acteurs dépend des individus ou d'organisations familiales. Les filières sont dominées par les acteurs privés et politiques. Les producteurs ne bénéficient d'aucun accompagnement, pas même d'infrastructures de stockage de leurs produits, ni d'assistance médicale pour le bétail. Tout cela rend non seulement difficile l'activité de transhumance dans la zone, mais elle ne profite qu'à quelques individus qui négocient individuellement avec les transhumants et en tirent profit au détriment de la communauté.

Pour ne rien arranger, on assiste à une forte croissance démographique, un indice synthétique de fécondité élevé dans un contexte de rareté de services sociaux. Une situation qui aggrave la difficulté d'accès à l'emploi, d'autant plus que rien n'est entrepris pour accompagner l'industrialisation.

Dans un autre registre et non des moindres, on note une instabilité politique à l'échelle du territoire, des menaces sur la cohésion sociale, l'ignorance de concept comme l'inclusion genre. La présence des transhumants, loin d'être un atout, est perçue comme un sérieux problème dans le terroir. Rien d'étonnant, les populations sont formées dans des systèmes éducatifs obscurantistes... La face du chaos.

Les actions proposées ne couvrent qu'une partie des champs possibles d'intervention (la gouvernance locale et la coopération transfrontalière) et sont encore à travailler, y compris pour trouver des voies de portage. Pour autant, elles constituent une base solide pour envisager l'avenir.

► Perspectives

Vers une réflexion stratégique transfrontalière : s'appuyer sur les ressources territoriales

La question d'une diversification mobilisant les ressources spécifiques du territoire apparaît comme une piste de réflexion porteuse de développement. Pour autant, les atouts ne sont pas probants et l'isolement du territoire dans ses espaces nationaux respectifs constitue indéniablement un frein. C'est en s'appuyant sur le témoignage de femmes et d'hommes habitant et faisant vivre le territoire, ainsi que sur leurs ressources propres et sur les dynamiques qui expliquent sa résilience dans la durée, que des solutions d'avenir peuvent être trouvées. L'une de ces ressources s'inscrit dans les échanges transfrontaliers et dans la complémentarité des espaces de part et d'autre de la frontière.

Les déséquilibres spatiaux constituent un autre élément fort du diagnostic réalisé. En comparaison avec les terroirs saturés de l'ouest, bénéficiant des meilleures infrastructures de marché et des connexions aux axes de commerce, des espaces dans l'est sont encore ouverts mais faiblement dotés en infrastructures. La tendance est la conquête progressive par l'agriculture et les villages de la partie est du territoire, avec une pression grandissante sur les ressources naturelles. Le désenclavement sans projet économique et territorial global va simplement permettre de reproduire les

dynamiques des dernières décennies. Ainsi les déséquilibres sont des leviers pour l'action, à condition que leur réduction s'inscrive dans un projet global, valorisant les spécificités de chaque partie du territoire.

Les recompositions de la mobilité pastorale et sa place dans les dynamiques territoriales

Les différents défis identifiés à l'échelle du territoire dans son ensemble permettent d'éclairer la thématique de la transhumance. Indéniablement importante pour la zone pour ses retombées économiques et sa capacité à mobiliser les ressources naturelles encore disponibles, elle peut être un secteur clé pour penser la réduction des déséquilibres territoriaux. C'est en effet dans l'est que les couloirs peuvent encore se maintenir ; il semble peu probable qu'ils s'ouvrent à nouveau dans les zones très denses de l'ouest.

Mais il faudrait sûrement l'inscrire, là encore, dans la dynamique d'ensemble du territoire. La transhumance à elle seule n'est pas un projet de territoire, il faut penser les parcours dans leurs possibles concurrences et complémentarités avec d'autres activités et trouver des compromis, accompagner le déplacement des êtres humains et des animaux en les régulant par rapport à l'ensemble des flux de biens et de marchandises traversant le territoire.

Une dynamique à entretenir

Quelques éléments techniques inhérents à l'étude restent à réaliser. Ainsi, l'étude devra être discutée et valorisée par les experts du territoire ayant participé aux ateliers, mais au-delà, auprès des autorités locales et nationales, aux services techniques centralisés et déconcentrés, ainsi qu'aux principaux acteurs de la société civile. Cet effort de partage, au-delà de sa participation à la diffusion de la connaissance produite, pourrait être une étape pour « embarquer » d'autres acteurs dans le développement local transfrontalier et dans une approche territoriale et anticipatrice d'une transhumance apaisée.

Des supports de communication, décrivant la méthode de la prospective territoriale et présentant quelques-uns des scénarios, sont disponibles et utilisables à la demande par l'ensemble des partenaires intéressés. Ces films et dessins permettent, dans un langage et une forme accessibles, d'introduire les grands principes travaillés ici.

La prospective et le diagnostic réalisés ici doivent être considérés comme des points de départ d'une démarche plus longue, mais qui n'appartient plus aux équipes de recherche, et doit être prise en charge par les acteurs légitimes du développement, chacun dans ses compétences. Les premières propositions et recommandations sur la gouvernance et la coopération transfrontalières ne sont que des ébauches, qui plus est dans un champ thématique réduit. Il conviendrait de poursuivre ce premier travail, en abordant d'autres domaines définis par les variables motrices. L'idée est d'utiliser le diagnostic territorial, les projections et les scénarios, pour réfléchir à des actions et à des recommandations sur le renforcement du capital humain, sur la sécurité, sur la natalité, sur la structuration du monde professionnel, sur les activités minières et sur la préservation des écosystèmes.

Puis, pour les recommandations sur la coopération et sur la gouvernance transfrontalières comme pour les forces motrices identifiées, un travail de déclinaison *via* des études et des ateliers supplémentaires permettrait d'envisager leur mise en œuvre.

Il conviendrait ici de travailler le cadre institutionnel et réglementaire de cette mise en œuvre, et la cohérence et compatibilité entre l'action publique aux différentes échelles, avec un point d'attention sur la décentralisation. Comme pour l'étape précédente, ce travail ne relève pas des compétences de la recherche.

Enfin, le partage des travaux au niveau régional est une priorité. La méthode et ses grands résultats doivent être présentés et discutés, avec des partenaires des territoires et du pastoralisme, au Togo et au Burkina Faso, mais aussi possiblement dans d'autres territoires transfrontaliers stratégiques. Ainsi le nord du Bénin pourrait être utilement impliqué dans des prospectives territoriales.

Plus largement, les grands résultats produits par la prospective territoriale transfrontalière pourraient accompagner la réflexion de la conférence interministérielle sur la transhumance apaisée, voire celle d'autres instances sous-régionales pouvant être intéressées. Cet effort de dissémination relève de la recherche, mais plus largement des acteurs qui ont été formés à l'anticipation dans le cadre de cette étude.

► Conclusions

En premier lieu, l'étude confirme la pertinence de penser la frontière comme un lien territorial dont il faudrait dépasser les ruptures de gouvernance, et donc valide le fait que ces trois entités administratives font territoire. Elle confirme que des perspectives d'une gouvernance plus intégrée de ce territoire sont réelles, en particulier pour apaiser les échanges et en premier lieu la transhumance. Mais elle confirme aussi que l'organisation actuelle des États et de leur administration a tendance à minimiser ces perspectives et à privilégier le repli sur soi.

Par ailleurs, les scénarios construits ne sont pas des prédictions et il est peu important qu'ils se produisent ou non tels qu'ils ont été formulés. De même, les recommandations formulées demeurent incomplètes et partielles, ne touchant que les questions de la gouvernance locale et de la coopération transfrontalière. Ce qui importe, c'est la connaissance réciproque collectivement construite qui permet au groupe d'experts réunis pour l'occasion d'avoir de nouvelles représentations de leur territoire, de la transhumance dans ce territoire, des grandes dynamiques à l'œuvre et des processus pouvant changer les trajectoires aujourd'hui à l'œuvre. Ils disposent de nouveaux éléments pour agir dans le présent, pour produire des transformations en direction de futurs souhaités, ou au moins pour éviter un glissement vers des directions non désirables.

Surtout, le travail conduit ouvre des perspectives pour que les experts impliqués dans cette démarche, ensemble ou non, entre eux ou en associant d'autres réseaux d'appartenance, puissent se servir des représentations du futur pour transformer le présent. Une dynamique collective est née et un cadre d'action transfrontalier inédit est en gestation, ce qui laisse envisager de nouvelles modalités d'action et surtout de collaboration de part et d'autre de la frontière. Le groupe d'experts a pu aborder, non sans tensions mais avec écoute réciproque et compréhension, des sujets extrêmement conflictuels. En imaginant le futur et en repositionnant la transhumance dans ses rôles et fonctions pour l'ensemble du territoire transfrontalier, un dialogue s'est engagé entre élus des deux pays, entre agriculteurs et pasteurs, mais aussi avec les commerçants, enseignants, services déconcentrés de l'État, etc.

L'impact à terme de cette construction sur le futur du pastoralisme dépendra surtout de la capacité et de la volonté de ses membres, relayés par d'autres acteurs du développement et de la recherche, à faire vivre la dynamique de travail et de réflexion entamée lors des ateliers. La prospective territoriale est susceptible de déclencher un processus de changement, mais il appartient aux personnes directement impliquées dans le territoire de le concrétiser. Du point de vue de la recherche, elle peut aussi permettre de générer de nouvelles connaissances originales sur la relation du pastoralisme à l'espace, et plus largement sur les formes actuelles et encore à inventer, de son insertion et de sa contribution aux territoires⁵.

5. Aujourd'hui, cinq années après ces travaux de recherche, l'extension des violences dans la région d'étude relègue l'approche et les enseignements présentés ici dans le passé mais, aux yeux des auteurs, ne leur ôte pas leur valeur de témoignage.

Chapitre 4

Transition(s) 2050, modélisation prospective des secteurs agricoles et alimentaires français

Antoine Pierart

Ce chapitre s'appuie sur la synthèse du rapport de l'Ademe « Transition(s) 2050 »⁶.

► Introduction

En ligne avec ses engagements internationaux de l'accord de Paris (2015) et dans l'objectif collectif de stabiliser le climat sous le seuil d'une augmentation de la température globale à 2°C, la France a construit deux premières stratégies nationales bas carbone (SNBC). Elles ont permis de fixer les grands objectifs de réduction des émissions de GES et des budgets « carbone » qu'elle doit respecter pour les années à venir. La trajectoire de réduction des émissions et des absorptions des GES doit permettre d'atteindre un objectif de « neutralité carbone » d'ici 2050, c'est-à-dire un équilibre entre les flux annuels d'émissions et les flux d'absorption (selon la loi relative à l'énergie et au climat dite « Énergie-Climat » de 2019). Cela implique, dès les prochaines années, d'indispensables transformations, rapides, profondes et systémiques, pour diminuer considérablement les impacts néfastes non seulement sur le climat, mais également sur les écosystèmes et lutter contre les pollutions. Ces transformations supposent une mobilisation sans précédent de tous les acteurs de la société, d'importantes innovations techniques, institutionnelles et sociales ainsi qu'une évolution profonde des modes de vie individuels et collectifs, des modes de production et de consommation, de l'aménagement du territoire... C'est à l'heure où des décisions doivent être prises pour réduire drastiquement les émissions de GES que l'Ademe a publié ses travaux en amont des délibérations collectives sur la future SFEC et à la veille des débats de l'élection présidentielle de 2022.

En effet, l'objectif de cet exercice de scénarisation était de contribuer à rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et sociales, pour nourrir des débats sur les options d'évolution possibles et souhaitables. Les décisions collectives doivent en effet porter autant sur la société durable que nous souhaitons construire ensemble que sur les modalités de réalisation de transformations profondes et systémiques qui la rendront possible. C'est pourquoi l'Ademe propose quatre scénarios pour atteindre la neutralité carbone « types » qui présentent de manière volontairement contrastée des options économiques, techniques et de société, sans épuiser pour

6. Prospective – Transitions 2050, Synthèse, 2021, Ademe.

autant la diversité des futurs possibles qui pourront être décidés. Ces quatre scénarios sont désignés par les noms suivants : S1 – Génération frugale, S2 – Coopérations territoriales, S3 – Technologies vertes et S4 – Pari réparateur.

En plus de l'urgence climatique à laquelle nous faisons face, d'autres enjeux environnementaux sont plus pressants que jamais : la qualité et la disponibilité de la ressource en eau, la destruction et la perte de qualité des sols, l'érosion de la biodiversité, etc. Le choix de la stratégie française devra être justifié au regard de l'ensemble des enjeux écologiques, sociaux et économiques. C'est pour faciliter le passage à l'action que l'Ademe a réalisé cet exercice de prospective inédit, reposant sur deux ans de travaux d'élaboration et sur la mobilisation d'une centaine de collaborateurs de l'Ademe et des échanges réguliers avec un comité scientifique. Les hypothèses et modèles ont été enrichis et affinés au travers d'échanges nourris avec une centaine de partenaires et prestataires extérieurs, spécialistes des différents domaines, ainsi que par l'organisation de deux webinaires en mai 2020 et janvier 2021 qui ont réuni chacun près de 500 participants afin d'échanger sur les résultats intermédiaires.

Ce chapitre est un focus sur les secteurs agricoles et alimentaires, fondé uniquement sur la présentation des travaux lors de l'école chercheurs MAELE en 2022 et ne reflète pas l'intégralité des hypothèses et enseignements clés de Transition(s) 2050.

» Méthodologie

Approche générale

Les quatre scénarios de neutralité carbone sont inspirés des scénarios du Giec (P1 à P4 du rapport RS15 « Réchauffement planétaire de 1.5°C »⁷). Ils se distinguent, par leur ambition, d'un scénario de prolongation des tendances (Tend), qui, en l'absence de ruptures, rend le chemin de développement incompatible avec la neutralité carbone (NC). Le scénario tendanciel et les quatre scénarios NC sont appliqués à l'échelle de la France métropolitaine. Des exercices spécifiques à l'Outre-mer seront réalisés ultérieurement.

Les quatre scénarios NC sont construits de façon à s'approcher d'une cible de neutralité carbone en 2050. Cette cible n'a de sens pour le climat qu'au niveau de la planète. Au niveau des États, cette cible permet de guider l'ambition de stratégie nationale. Nous reprenons donc la traduction qui en est faite dans la loi Énergie-Climat de 2019. Celle-ci vise, à l'horizon 2050, des émissions annuelles nettes au moins nulles sur le territoire français métropolitain selon les normes de la convention d'inventaires d'émissions de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Cela suppose que les émissions résiduelles de l'année 2050 soient au moins compensées par un volume égal d'absorption des GES.

Chaque scénario est nourri par un récit, assumant la représentation du monde et les dimensions sociétales et politiques de la trajectoire choisie. Cette approche qualitative est complétée par un volet quantitatif de modélisations technico-économiques, avec des hypothèses, secteur par secteur. Chacun des quatre scénarios est ainsi constitué par un corpus d'hypothèses interdépendantes permettant d'assurer une cohérence du système énergie-ressource-territoire avec le récit du scénario.

7. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Ce travail va donc bien au-delà de la seule modélisation du système énergétique et décrit des transitions de société contrastées.

Le tableau 4.1, issu de la synthèse du rapport Transition(s) 2050, récapitule les grandes hypothèses démographiques, climatiques et économiques utilisées en arrière-plan des scénarios.

Tableau 4.1. Hypothèses de cadrage du rapport Transition(s) 2050.

	Tendanciel	Génération frugales S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
Démographie	65,6 millions d’habitants en 2020 ; 67,4 en 2030 ; 69,7 en 2050 en Métropole Natalité : 1,8 enfant/femme, vieillissement (1/4 de la population a plus de 65 ans en 2050), solde migratoire + 70 000/an (source : Insee, 2017, scénario fécondité basse, espérance de vie centrale et migration centrale)				
Évolution climat	Monde : + 5,4 °C en 2100 France : + 3,9 °C en 2100 en France en 2100 (RCP 8.5 du Giec)	Monde : + 3,2 °C en 2100 France : + 2,1 °C en 2100 (2070-2100) par rapport à la référence 1976-2005 (source : Météo France Drias 2021 – RCP 4.5 – Logique NDC)			
Prix énergie importée	59 et 72 USD/baril en 2030 et 2040 (source : AIE WEO 2020 – scénario Delayed recovery)	82 EUR/baril, 95 et 108 en 2030, 2040 et 2050 (source : Cadrage Commission européenne, 2020)			
Potentiel de croissance économique	Croissance potentielle de long terme (population active + productivité) : 1,3 %/an en moyenne sur la période (dont 1,1% de productivité) (source : SNBC, 2020) L’activité économique réelle et l’emploi varient selon les scénarios (cf. analyse macroéconomique).				



Figure 4.1. Narratifs généraux des scénarios de Transition(s) 2050 (source : Ademe, 2021).

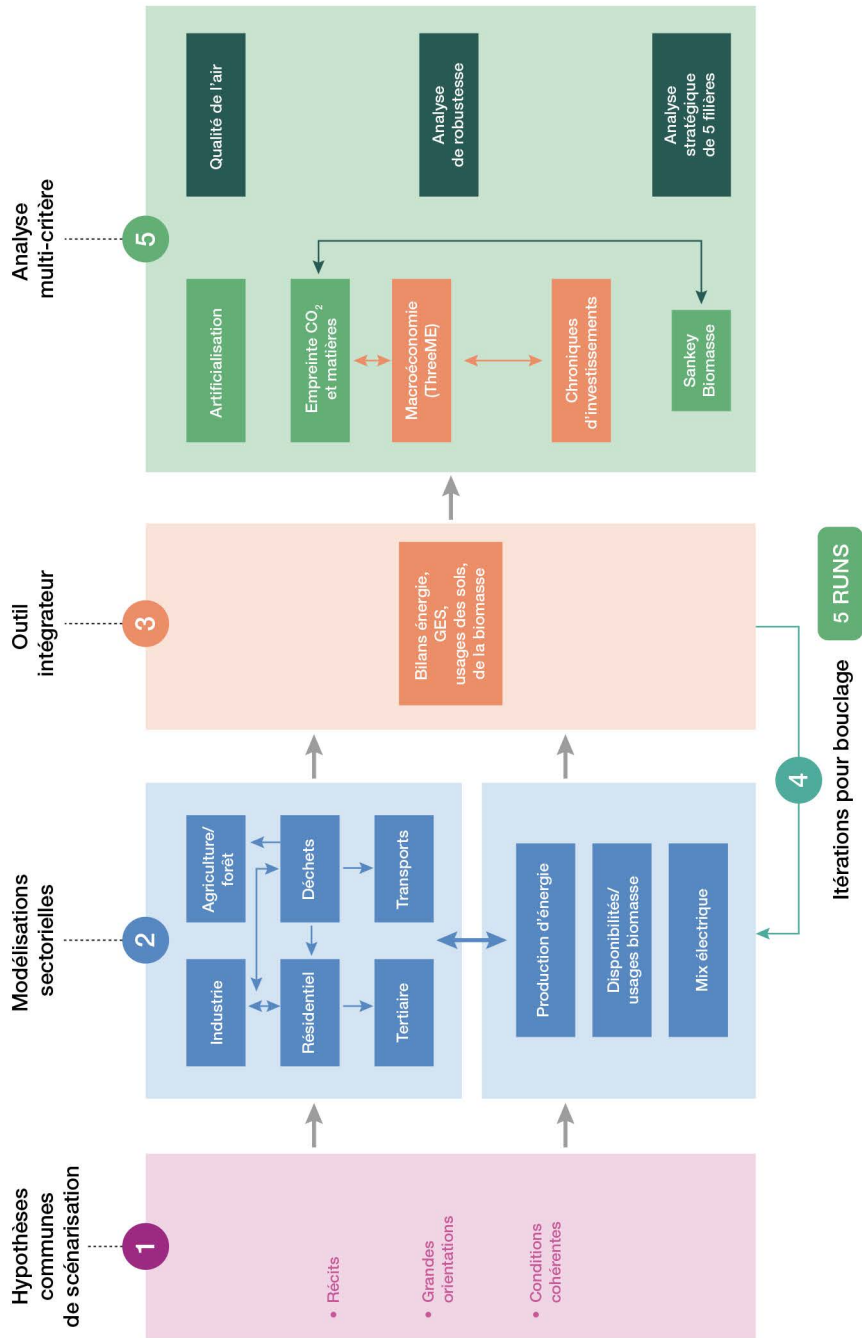


Figure 4.2. Schéma des interactions entre les briques de modélisation (source : Ademe, 2021).

Sur la base de ces hypothèses transversales, la méthode a suivi les étapes principales suivantes :

1. Pour chaque scénario, un récit cohérent a été construit, au travers de variables structurantes décrivant les modes de vie, le modèle économique, l'évolution technologique, la gouvernance ou le rôle des territoires (figure 4.1).
2. Ces récits ont ensuite été transformés en hypothèses quantitatives dans des modèles sectoriels existants ou créés pour l'occasion (figure 4.2).
3. Ces résultats sectoriels ont ensuite été intégrés pour calculer les bilans sur l'énergie et les GES, mais aussi pour définir l'usage des sols ou des biomasses.
4. Des itérations successives ont été réalisées pour faire converger l'ensemble des hypothèses et vérifier, croiser et affiner ces quantifications, notamment au sein de *systèmes fortement interconnectés* :
 - bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols,
 - aménagement du territoire-bâtiments-mobilités,
 - industrie-matériaux-économie circulaire,
 - systèmes énergétiques décarbonés.

Enfin, plusieurs analyses complémentaires ont été réalisées (analyses *macro-économiques*, *empreinte matière et GES*, mix électrique, analyses sociales, ou encore des analyses stratégiques de quelques filières à enjeux, etc.).

Description des secteurs alimentaire et agricoles

Sur le secteur de la bioéconomie, les travaux ont été construits comme suit (figure 4.3).

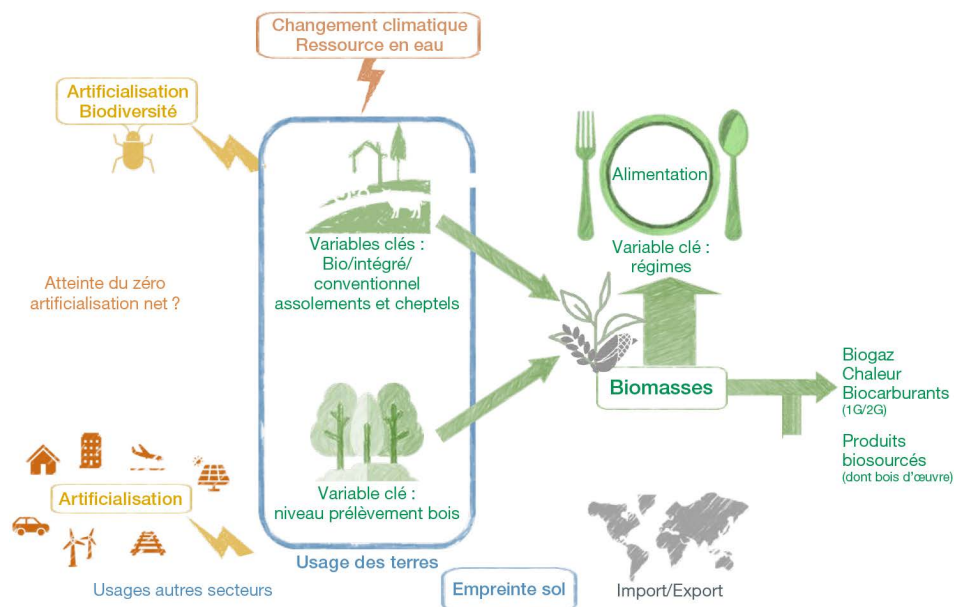


Figure 4.3. Schéma représentant la chaîne de modélisation et les variables clés du secteur de la bioéconomie (source : Ademe, 2021).

La première hypothèse repose sur l'évolution nécessaire des régimes alimentaires pour entraîner l'évolution des systèmes productifs afin de répondre à la demande. Cela permet de traduire les besoins alimentaires (et en parallèle les besoins non alimentaires) en itinéraires techniques et en surfaces afin de calculer la quantité de biomasses, l'usage des terres ainsi que différents indicateurs de suivi de la résilience des systèmes productifs agricoles.

Pour faire évoluer le contenu de l'assiette, nous nous sommes appuyés sur les données de l'enquête Inca2⁸ à partir desquelles la population actuelle a été segmentée en quatre groupes de consommateurs (figure 4.4).

Ensuite, selon les scénarios, des contraintes nutritionnelles (apport calorique, nécessité d'une assiette équilibrée, etc.), des contraintes de quantité (et qualité) et de types de protéines animales ont été appliquées pour faire évoluer les groupes de population vers l'un ou l'autre des régimes avec l'objectif d'aboutir à des évolutions de consommation moyenne de protéines animales de l'ordre de - 10, - 30, - 50 et - 70 % (S4 à S1, respectivement).

Par ailleurs, des hypothèses ont aussi été définies pour orienter vers une demande alimentaire et des modes de production permettant de fournir des produits à forte valeur environnementale (bas intrants de synthèse, de saison) et relocalisés, avec des proportions variables selon les scénarios : S1/S2 : formation systématique des professionnels opérationnels et saisonniers, assouplissement en profondeur des cahiers des charges en lien avec les distributeurs, développement de circuits alternatifs pour l'écoulement systématique des produits non conformes, offre en circuit-court optimisée...

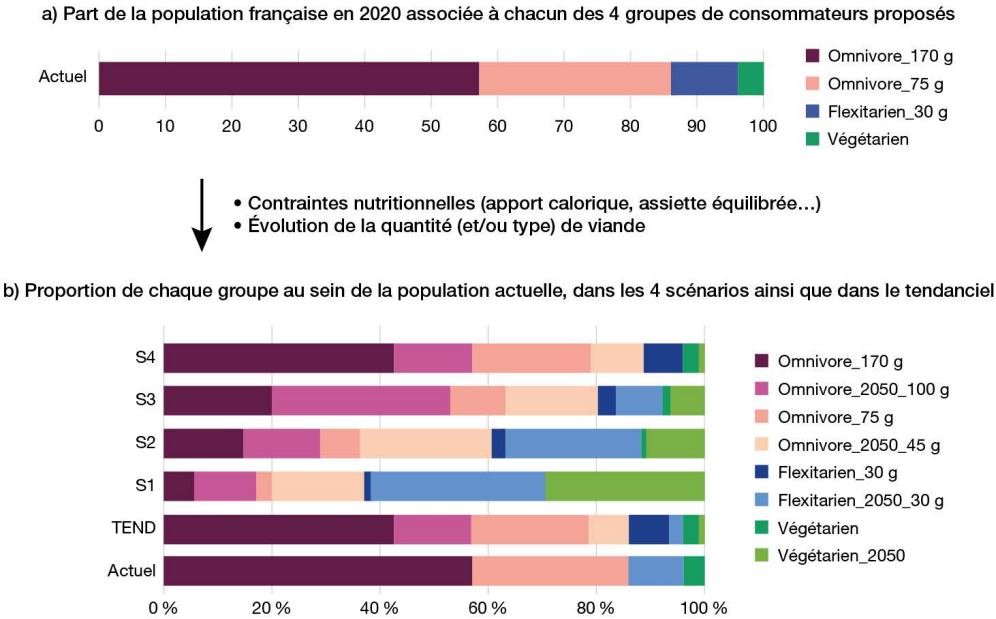


Figure 4.4. Construction des différents groupes de régimes alimentaires (source : Ademe, 2021).

8. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-de-consommations-et-habitudes-alimentaires-de-letude-inca-2-3/>

S3/S4 : réduction des pertes au champs (production et récolte) principalement *via* des innovations techniques (agriculture de précision).

Ces hypothèses ont permis d'aboutir à une représentation d'assiettes moyennes françaises pour chacun des scénarios (figure 4.5).

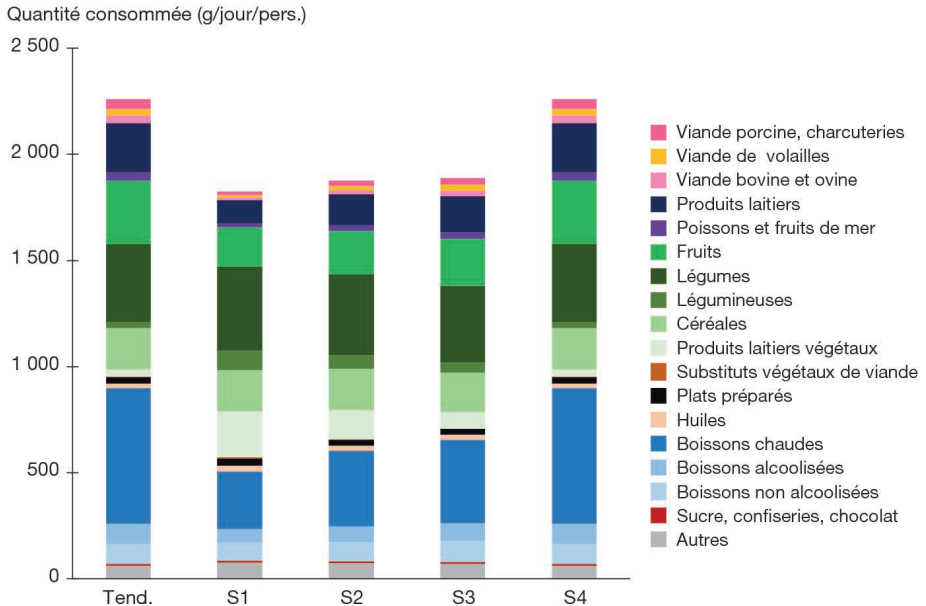


Figure 4.5. Quantités consommées (en g/j/personne) des principaux groupes d'aliments (source : Barbier *et al.*, 2022).

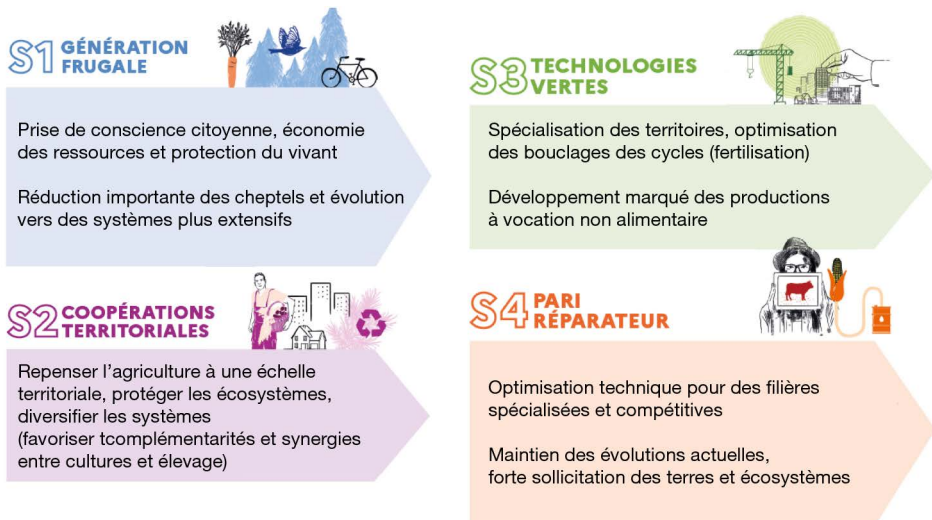


Figure 4.6. Résumé du narratif sur le secteur agricole (source : Ademe, 2021).

En cohérence avec ces hypothèses, les travaux sur le secteur agricole ont visé à élaborer les quatre narratifs décrits en figure 4.6 et traduits *via* les variables suivantes (tableaux 4.2 et 4.3) :

L'agroécologie (gestion de l'azote, développement des légumineuses, des haies et de l'agroforesterie...) : elle est mise en avant de façon graduelle entre les scénarios. La part de systèmes bas intrants de synthèse, de productions intégrées et de conventionnels raisonnées évolue distinctement mais de façon cohérente en réponse à la demande en biomasses.

L'élevage : en réponse à l'évolution des régimes alimentaires, la quantité de bétail, leur productivité et les pratiques d'élevage associées évoluent de façon contrastée. Les terres libérées sont réallouées de façon différente selon les scénarios.

L'adaptation des systèmes face au changement climatique : le besoin d'adapter les systèmes productifs est toujours présent car indispensable.

La production de biomasses non alimentaires : pour répondre à la demande en produits biosourcés et bioénergies contribuant à réduire les émissions dans d'autres secteurs, les scénarios prévoient le maintien et/ou le développement de cultures énergétiques (pérennes ou non) en lien avec les espaces libérés par l'évolution de la demande alimentaire.

Les services écosystémiques : l'agriculture rendant de multiples services additionnels (stockage de carbone, qualité de l'eau et des sols, réservoir de biodiversité), ils sont plus ou moins protégés et promus selon les scénarios.

Tableau 4.2. Sollicitation des leviers principaux de décarbonation (teinte la plus claire à la plus sombre : intensité de l'action).

Levier	Tendanciel	S1	S2	S3	S4
Réduction des pertes et gaspillages					
Baisse de la consommation de viande					
Réduction des apports de fertilisants azotés de synthèse					
Intensification des pratiques d'élevage					
Stockage de carbone*					
Réduction de la déforestation importée**					
Production d'énergies renouvelables***					

□ Rien □ Très faible □ Faible □ Moyen □ Fort

* Dans les sols et la biomasse agricole

** Liée à l'évolution de l'alimentation animale ou des imports pour un usage énergétique

*** Pour la décarbonation des autres secteurs

L'organisation du territoire : coopération internationale, nationale, ou reterritorialisation des productions.

La diversification des revenus : diversification des rotations et production d'énergies renouvelables sont les deux leviers principaux.

L'ensemble de ces hypothèses a ensuite été détaillé et modélisé par un outil de modélisation systémique de l'utilisation des terres, l'outil MoSUT⁹ (conçu par l'association Solagro).

Tableau 4.3. Part des différents modèles agricoles à l'horizon 2050 et abattement d'indice de fréquence de traitement (IFT) estimé.

		Tendanciel	S1	S2	S3	S4
Bas intrants de synthèse	Part de la SAU, %	20	70	50	20	10
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée, %	- 100 (0 produit phytosanitaire de synthèse)				
Production intégrée	Part de la SAU, %	10	30	50	50	20
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée, %	- 25	- 25	- 50	- 50	- 25
Conventionnel raisonné	Part de la SAU, %	70	-	-	30	70
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée, %	- 15	-	-	- 25	- 15

» Limites et perspectives

À l'issue de ces modélisations sur les secteurs alimentaires et agricoles, plusieurs limites et perspectives ont été identifiées :

Sur le secteur alimentaire

S1/S2 : les évolutions comportementales et d'organisation des systèmes alimentaires sont majeures et constituent soit une accélération radicale des tendances, soit une rupture ;

S3/S4 : les bonds technologiques attendus restent incertains en termes de gain environnemental ;

S4 : introduction d'innovations alimentaires majeures (viande de synthèse, alternatives végétales, nutrition assistée, etc.) mais à un niveau modéré.

Néanmoins, leur développement pourrait être plus massif (si la performance environnementale est avérée), mais les modèles actuels ne permettent pas de bien les évaluer ;

S4 : dégradation de l'état nutritionnel de la population et moindres gains environnementaux, les efforts étant reportés sur d'autres secteurs.

Est-ce qu'une autre vision « technologique » serait possible ? L'évolution radicale des régimes guidée par des enjeux nutritionnels *via* des assistants numériques et

9. <https://solagro.org/travaux-et-productions/references/mosut-outil-de-modelisation-systemique-sur-lutilisation-des-terres-developpe>.

environnementaux ou *via* des alternatives technologiques aux produits animaux conduirait à une quasi-disparition de l'élevage.

Le lien avec le budget des ménages reste à creuser.

Sur le secteur agricole

Un changement fort de paradigme dans notre relation au monde du vivant est nécessaire : transition vers des systèmes productifs plus sobres en intrants et plus diversifiés (par exemple : biomasse énergie).

L'agriculture doit apporter des services environnementaux indispensables au maintien de nos sociétés : stockage de carbone, conservation des sols et de la qualité des eaux, réservoirs de biodiversité inestimables, services socio-culturels.

Des arbitrages ambitieux sont nécessaires pour un usage raisonné et équilibré des ressources (eau, sols, biodiversité...) et des biomasses.

Des efforts collectifs importants sont indispensables, qui nécessitent l'implication de tous les acteurs de l'offre et de la demande (agriculteurs, conseillers, coopératives, industries agro-alimentaires, distribution, consommateurs).

Pour que cette transition soit un succès, la mise en place de politiques publiques d'ampleur est nécessaire *via* l'intégration de ces enjeux dans les marchés et le soutien des politiques publiques.

» Couplages « prospective et évaluation »

Les travaux menés sur les secteurs agricoles et alimentaires dans Transition(s) 2050 ont permis d'avancer efficacement sur plusieurs points en couplant prospective et évaluation environnementale.

Les outils utilisés (MoSUT...) et développés (tableurs de suivi des flux de biomasses) ont permis une bonne mise en cohérence entre ressources disponibles et usages potentiels des différentes biomasses afin d'éviter les doubles comptages ou les incohérences entre production et demande.

Sur le secteur agricole, les scénarios ont été évalués sur la base d'indicateurs de résilience face au changement climatique (tableau 4.4).

Tableau 4.4. Indicateurs de vulnérabilité et résilience des scénarios prospectifs Transition(s) 2050. Avec SAU : surface agricole utile, Mdm³ : million de décimètres cubes, kha : millier d'hectares, ktN : millier de tonnes d'azote, kt MS : millier de tonnes de matière sèche, TWh : térawattheure.

Indicateurs de vulnérabilité	Actuel	Tend.	S1	S2	S3	S4
Dépendance à l'eau						
Superficie irriguée totale [Mha]	1,7	2,6	1,5	2	2,6	3,7
Part de la SAU irriguée [%]	6 %	10,3 %	5,8 %	7,2 %	9,5 %	13,8 %
Part de la surface irriguée en maïs grain [%]	50,2 %	34,3 %	15,6 %	20,8 %	33,8 %	33,2 %
Volumes d'eau total d'irrigation [Mdm ³]	2,7	3,6	1,8	2,3	3,1	4,5

Indicateurs de vulnérabilité	Actuel	Tend.	S1	S2	S3	S4
Dépendance à l'eau						
Volumes d'eau irrigation estivale [Mdm ³]	1,8	1,7	0,4	0,8	1,4	1,9
Consommation d'eau d'irrigation estivale [%]	68,3 %	48,4	23,4 %	35,2 %	46,9 %	41,7 %
Couverture des sols						
Terres arables avec couverts végétaux [kha]	1 091,8	2 163,6	1 6549,5	17 538,2	11 234	4 918,5
Fertilité des sols et biodiversité						
Surfaces de terres arables en semis direct [kha]	363,9	1 547	519	8 284	8 055	10 164
Variation des stocks de carbone dans les sols de grandes cultures (0-30 cm) par rapport au tendanciel, tC/ha (hors haies et bandes agroforestières)*	-	-	+ 2	+ 5	+ 3	+ 1
Nombre de doses unités ou Nodu (produit de synthèse)	14,6	9,7	1,7	3	5,7	9,7
Part d'azote organique [%]	24 %	32 %	56 %	71 %	51 %	44 %
Recours aux légumineuses						
Azote obtenu par fixation symbiotique [ktN]	387,7	441,3	990,5	1 555,5	859,9	475,8
Ressources fourragères (ruminants)						
Production fourragère issue du maïs et cultures [%]	23,2 %	19,5 %	8,2 %	8,9 %	18 %	23,6 %
Production fourragère issue de pâturage [%]	32,3 %	40,9 %	44,1 %	44,5 %	35,3 %	35,6 %
Part de la production fourragère issue de prairies permanentes et naturelles (stock) [%]	44,5 %	39,6 %	47,7 %	46,5 %	46,7 %	35,6 %
Bilans fourragers (surplus d'herbe) [ktMS]	15 093	10 952,9	10 572,5	13 717,2	19 554,2	11 977,5
Linéaires de haies et d'agroforesterie dans les agrosystèmes						
Haies sur prairies et terres arables [milliers de kilomètres]	500**	547	935	939	619	500**
Agroforesterie (terres arables, prairies et pré-vergers-75 arbres/ha) [kha]	140***	232	597,7	1 499	1 212	232
Diversification des revenus						
Production de bioénergies agricoles [TWh/an]	39	106,8	163,2	150,8	199,8	165,8

* La variation des stocks de carbone dans les sols est utilisée comme une approximation proxy de celle des teneurs en matières organiques, composante majeure de la fertilité des sols agricoles.

** Ordre de grandeur basé sur les estimations de Pointereau (2006). Les estimations du linéaire de haies à l'échelle nationale sont lacunaires et pourront être précisées *via* le dispositif national de suivi des bocages.

*** Majoritairement sur prairies et pré-vergers.

Néanmoins, plusieurs axes de travail seront à approfondir dans de futurs travaux de prospective, comme :

- améliorer l'évaluation des impacts des systèmes productifs et du changement climatique (sur la santé des sols, sur la biodiversité, sur la ressource en eau...);
- développer une méthodologie permettant d'évaluer une empreinte sol globale (et non centrée uniquement sur l'empreinte des régimes alimentaires);
- développer une évaluation socioéconomique des scénarios envisagés;
- traduire à l'échelle régionale les modélisations réalisées en prenant en compte les contraintes pédoclimatiques et la ressource en eau;
- évaluer plus finement la résilience et/ou la vulnérabilité des scénarios, en particulier face à des chocs climatiques plus intenses.

► Conclusion

L'importance de régimes alimentaires sains et durables

Trois leviers principaux permettent de réduire drastiquement les impacts environnementaux de l'alimentation, pour construire des stratégies gagnant-gagnant entre impact climat et impact santé : i) l'évolution des régimes alimentaires vers des régimes plus sains et moins carnés, via, en particulier, la division par 3 (S1) et 2 (S2) ou une baisse de 30 % (S3) des consommations de viande par rapport à aujourd'hui; ii) la demande en produits à forte valeur environnementale (bas niveau d'intrants), devient majoritaire dans S1 et S2; iii) la réduction des pertes et gaspillages, qui atteint 50 % dans tous les scénarios soit *via* des leviers plutôt comportementaux dans S1 et S2, soit plutôt technologiques et digitaux dans S4.

En prenant en compte uniquement l'impact d'une moindre consommation de viande sur les émissions agricoles, les scénarios se traduisent par une réduction d'émission carbone d'environ 40 % pour S1 par rapport aux émissions actuelles, contre seulement 6 % dans S4. Des impacts du même ordre de grandeur sont estimés sur l'empreinte sol.

Des productions agricoles qui doivent s'adapter en profondeur

À l'horizon 2050, le secteur agricole est à la croisée de multiples enjeux : il doit à la fois répondre aux demandes alimentaires et non alimentaires, fournir différents services écosystémiques indispensables (stockage de carbone, mais aussi réservoirs de biodiversité, conservation des sols et de la qualité des eaux...) et s'adapter à l'évolution du climat, tout en contribuant à l'objectif de neutralité carbone de la France.

En fonction des scénarios, différents leviers interdépendants sont mobilisés : l'agro-écologie, la réduction des cheptels et un passage à des systèmes plus extensifs, la baisse des besoins en irrigation, la production de biomasse à vocation énergétique.

Les simulations réalisées montrent que diviser par deux les émissions de GES du secteur agricole (figure 4.7) n'est possible que dans S1 et S2, et ce, par davantage de sobriété et une meilleure prise en compte du rôle essentiel du monde vivant dans le maintien de nos capacités de production. L'ensemble des acteurs de la filière doivent effectuer une transition, en particulier *via* l'évolution des régimes alimentaires. Pour être un succès, cette transition d'ampleur doit être accompagnée par les politiques publiques.

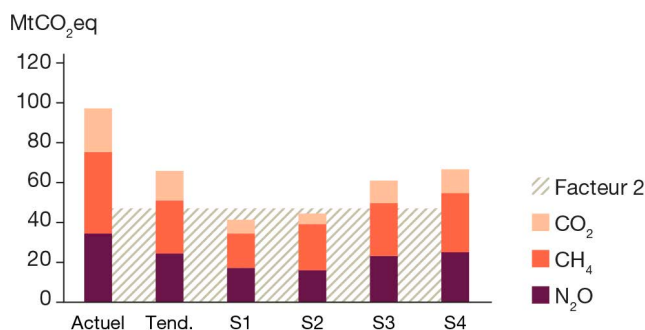


Figure 4.7. Émissions territoriales de GES actuelles et à l'horizon 2050 du secteur agricole, en millions de tonnes en équivalent CO₂ (source : Ademe, 2021).

Au-delà du volet émissions de GES, les scénarios plus extensifs S1 et S2 permettent également de réduire la consommation d'eau d'irrigation (divisée par deux par rapport à aujourd'hui dans S1), ainsi que l'usage des produits phytosanitaires (divisé par cinq dans S2 par rapport à 2020) et des fertilisants de synthèse (*i. e.* azote minéral) au profit des apports d'azote d'origine biologique ou du développement des légumineuses, qui permettent une fixation symbiotique d'azote.

A contrario, S3 et S4 favorisent les systèmes plus intensifs, mais optimisés techniquement pour réduire leurs impacts (en comparaison des systèmes actuels et tendanciels). La contribution du secteur agricole à la production de biogaz et de biocarburant est la plus haute dans S3.

Préserver le vivant

Le vivant n'est pas uniquement un moyen, avec une valeur différente selon les scénarios, et Transition(s) 2050 invite à questionner notre relation à la nature. Les scénarios présentent quatre équilibres possibles entre ces trois leviers interdépendants : le potentiel de réduction des GES, le potentiel de stockage naturel de carbone et le potentiel de mobilisation de biomasse renouvelable substituable aux ressources fossiles.

Ces trois leviers sont très fortement interconnectés et nécessitent de prendre en compte également d'autres enjeux comme les équilibres avec la production de biomasse alimentaire, les autres fonctions écologiques (biodiversité, régulation de température, limitation de l'érosion...) et sociale (forêt pour les loisirs, par exemple) ainsi que les enjeux d'adaptation de la forêt au changement climatique.

Les hypothèses et résultats présentés dans cet article ne reflètent qu'une partie du travail réalisé dans le cadre de Transition(s) 2050. Nous recommandons au lecteur de consulter le rapport complet, sa synthèse ou encore les feuillets dédiés¹⁰ pour appréhender ce travail de prospective dans son ensemble et ne pas en tirer des conclusions erronées.

L'ensemble des jeux de données est disponible en ligne¹¹.

10. <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>

11. <https://data-transitions2050.ademe.fr/>

Chapitre 5

La place de l'élevage et des produits animaux dans la prospective Agrimonde-Terra sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire mondiale en 2050

Olivier Mora et Chantal Le Mouél

La prospective Agrimonde-Terra sur l'usage des terres et sur la sécurité alimentaire en 2050 (Mora *et al.*, 2020) offre l'opportunité de réexaminer les termes du débat sur la place des productions animales dans les futurs de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire, et par suite sur leur rôle au regard de l'avenir des systèmes alimentaires globaux. Commanditée et conduite par INRAE et le Cirad, la prospective Agrimonde-Terra vise à explorer l'utilisation future des terres et la sécurité alimentaire à l'horizon 2050 afin d'anticiper les questions de durabilité et de santé à prendre en compte.

Cinq scénarios d'usage des terres et de sécurité alimentaire en 2050 ont été produits dans le cadre d'Agrimonde-Terra. Ils confirment le rôle clé de l'élevage et de la consommation de produits animaux au regard de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire mondiales. Ils montrent que l'évolution des régimes alimentaires vers une diète, en moyenne mondiale, moins riche en calories, plus diversifiée et contenant moins de produits animaux est nécessaire pour assurer de manière durable une sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale à l'horizon 2050.

Les scénarios d'Agrimonde-Terra reposent sur quatre hypothèses d'évolution alternative des régimes alimentaires à 2050, qui donnent une place contrastée aux produits animaux, dans le temps mais aussi dans l'espace. En particulier, dans un souci de sécurité alimentaire régionale, selon Agrimonde-Terra, l'hypothèse est faite que les régimes alimentaires des régions à faible revenu et à revenu intermédiaire (Afrique sub-saharienne et Inde) verront leur contenu en énergie et leur contenu en produits animaux augmenter à 2050, même lorsque la trajectoire générale d'évolution conduit ces contenus à diminuer en moyenne mondiale. Cette hypothèse se révèle cruciale au regard de l'équilibre global entre l'offre et la demande de biomasse et en termes d'usage des terres au niveau mondial et régional, dans la mesure où, dans les scénarios d'Agrimonde-Terra, ces régions à faible revenu et à revenu intermédiaire, très peuplées connaîtront une croissance démographique très rapide, tandis que leurs systèmes d'élevage peu performants en termes de rendements à l'hectare verront leur productivité s'améliorer à 2050, mais dans une mesure limitée comme l'ensemble des autres régions du monde.

Cette section est organisée de la manière suivante : après avoir décrit la méthode utilisée dans Agrimonde-Terra (partie 1), les scénarios d'Agrimonde-Terra sont présentés en mettant en exergue le rôle des productions animales (partie 2) ; puis, dans un troisième temps, il s'agit d'éclairer les enjeux des scénarios pour les productions animales dans le monde de demain (partie 3) ainsi que les limites du processus de modélisation dans la prise en compte de l'élevage.

» La méthode Agrimonde-Terra : le couplage d'une méthode de scénarios et d'une démarche de simulation numérique

Pour penser les futurs de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire mondiale à l'horizon 2050, la méthode prospective adoptée dans Agrimonde-Terra couple deux approches : une méthode des scénarios fondée sur l'analyse morphologique (Ritchey, 2011), mobilisée à différentes échelles du système et mise en œuvre *via* des groupes d'experts où ont été élaborées les hypothèses d'évolution du système (Mermet, 2009), et la construction et l'utilisation d'un outil de modélisation et de simulation, GlobAgri-AgT.

La méthode développée dans Agrimonde-Terra tient compte des enseignements méthodologiques de diverses revues de la littérature scientifique sur les scénarios d'agriculture et de sécurité alimentaire. En ce qui concerne les usages des terres par l'élevage, une revue bibliographique menée par Le Mouël et Forslund (2017) souligne le « manque et la faiblesse des scénarios existants concernant les hypothèses pour l'avenir des systèmes d'élevage, bien qu'il s'agisse d'un facteur clé en ce qui concerne les impacts des scénarios sur le changement d'affectation des terres ». S'intéressant à l'avenir des régimes alimentaires, van Dijk et Meijerink (2014), dans un examen des scénarios de sécurité alimentaire mondiale, recommandent de mieux inclure la demande alimentaire et des indicateurs tels que la « composition des régimes alimentaires » dans l'élaboration des scénarios. Van Dijk et Meijerink (*ibid.*) recommandent également de mieux intégrer l'utilisation et la stabilité de l'accès aux produits alimentaires dans les scénarios de sécurité alimentaire mondiale afin d'évaluer la sécurité nutritionnelle, en intégrant tous les types de malnutrition.

La méthode de prospective développée dans Agrimonde-Terra répond à d'autres lacunes identifiées dans les prospectives des systèmes agricoles et alimentaires par la revue de la littérature de Wiebe *et al.* (2018). Tout d'abord, le choix d'un modèle de bilan de biomasse est un moyen d'éviter « l'inadéquation potentielle entre les dynamiques générées de manière endogène dans le modèle quantitatif et les hypothèses narratives ». Deuxièmement, notre méthode tente de répondre au manque de « recherche sur l'interface qualitative-quantitative dans la simulation » et à « la difficulté de traduire les récits en paramètres de modèles » (*ibid.*; van Vuuren *et al.*, 2012). Ainsi, Agrimonde-Terra développe une méthode couplée qui lie de façon explicite et transparente la conception d'un scénario qualitatif et la modélisation quantitative des impacts (Wiebe *et al.*, 2018).

Agrimonde-Terra se définit comme un exercice à visée *exploratoire* dont le but est de préparer les acteurs et la recherche à différents futurs possibles, en leur fournissant des éléments de compréhension et d'anticipation des enjeux à venir sous la forme de scénarios. La méthode des scénarios fondée sur une analyse morphologique permet d'envisager une pluralité de scénarios alternatifs à partir d'une analyse commune des dynamiques passées et futures du système, tout en prenant en compte un degré élevé

d'incertitude (Durance, Godet, 2010 ; Ritchey, 2011). L'analyse morphologique présente ici au moins trois avantages : premièrement, elle met en évidence les relations systémiques au sein du système ; deuxièmement, elle permet d'explorer une large diversité de changements non linéaires et ainsi de prendre en compte les fortes incertitudes sur le devenir des systèmes alimentaires et, troisièmement, elle permet de s'assurer que tous les scénarios reposent exactement sur le même ensemble de déterminants.

La méthode d'Agrimonde-Terra est un processus d'intelligence collective fondé sur des groupes d'experts (Miller, 2007). L'ensemble de la démarche a mobilisé environ quatre-vingts experts scientifiques internationaux au cours de trois ateliers thématiques, et un comité international en charge de l'appui à la construction des scénarios comprenant des scientifiques et des parties prenantes d'institutions internationales et nationales (Banque mondiale, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], Fonds international de développement agricole [Fida], Institut international de recherche sur les politiques alimentaires [Ifpri] et ministères de l'agriculture) et de la société civile (Oxfam, Comité international pour la souveraineté alimentaire [IPC]).

Dans l'approche systémique Agrimonde-Terra, les principaux déterminants du système *Usage des terres et sécurité alimentaire* qui ont été considérés sont : les déterminants majeurs que sont les systèmes de culture, les systèmes d'élevage, les structures de production, les relations entre les zones urbaines et rurales, et les déterminants externes que sont le changement climatique, les régimes alimentaires et le contexte global. Après avoir identifié le système, la démarche de prospective s'est déroulée en six phases (blocs verts inférieurs, figure 5.1) avec cinq groupes d'experts différents (quatre « groupes d'experts scientifiques » et un « comité de scénarios », blocs bleus supérieurs, figure 5.1).

Les phases 1 et 2 (figure 5.1) ont analysé la dynamique à long terme des déterminants du système *Usage des terres et sécurité alimentaire*. Elles se rapportent au panneau de gauche de la figure 5.1. Les dynamiques d'évolution des déterminants ont été identifiées par une analyse des tendances passées et des signaux faibles en mobilisant, lorsqu'elles sont disponibles, les séries de données produites par les agences internationales telles que la FAO, ainsi que par une analyse des ruptures potentielles qui pourraient influencer sur les évolutions futures des déterminants. Des ateliers thématiques ont été organisés pour analyser les quatre déterminants majeurs (systèmes de culture, systèmes d'élevage, structures de production, relations entre les zones urbaines et rurales). Chaque atelier a impliqué un groupe spécifique de chercheurs spécialisés dans le domaine examiné. Pour chaque déterminant, deux réunions avec des groupes d'experts ont été organisées : la première visait à discuter des tendances passées de l'évolution et la seconde était consacrée à l'élaboration d'hypothèses alternatives sur l'évolution future de chaque déterminant à l'horizon 2050. Pour les déterminants externes, l'analyse rétrospective menée par l'équipe du projet s'est appuyée sur des revues de la littérature scientifique (y compris sur les projections disponibles à différents horizons temporels) et les séries temporelles de données disponibles. À l'issue de ces deux phases, des hypothèses alternatives sur les changements possibles d'ici 2050 ont été élaborées pour chaque déterminant ; elles constituent les « éléments constitutifs » du tableau morphologique (voir la figure 5.1).

Les deux phases suivantes (phases 3 et 4 de la figure 5.1) concernent l'élaboration de scénarios et de récits. Elles se rapportent au panneau central de la figure 5.1. Cinq scénarios contrastés ont été élaborés sur la base de discussions approfondies

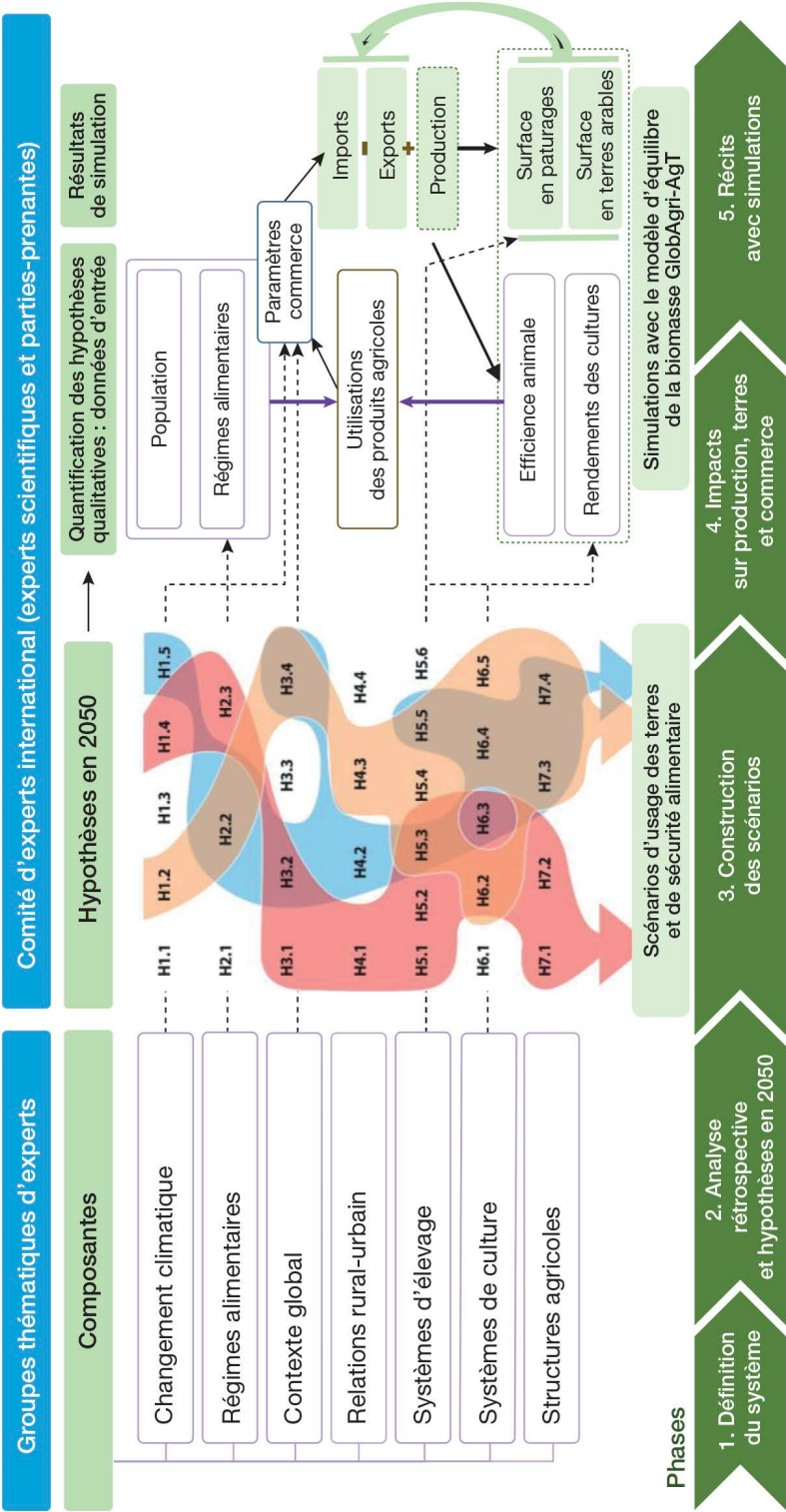


Figure 5.1. Méthode de couplage entre approche des scénarios et simulation quantitative dans la prospective Agrimonde-Terra (source : Mora *et al.*, 2020).

entre les chercheurs et les acteurs parties prenantes au sein du comité des scénarios. Le comité des scénarios a d'abord évalué les hypothèses alternatives d'évolution de tous les déterminants à l'horizon 2050 résultant de la phase précédente. Ensuite, il a élaboré des scénarios contrastés en mobilisant le tableau morphologique. Chaque scénario combine une ou plusieurs hypothèses de changement par déterminant (voir le graphique dans le panneau central de la figure 5.1, où les scénarios sont représentés par des rubans de couleur), en respectant les relations de causalité et en recherchant une cohérence entre les hypothèses, ainsi qu'une plausibilité du scénario obtenu. Sur cette base, cinq scénarios contrastés ont été construits par un comité des scénarios composé d'experts internationaux. Chaque scénario décrit une situation d'utilisation des terres et de sécurité alimentaire en 2050.

Les phases 5 et 6 (panneau de droite de la figure 5.1) ont été consacrées à l'évaluation quantitative des scénarios. Les impacts des scénarios en termes d'usage des terres ont été évalués à l'aide du modèle GlobAgri-AgT (voir encadré 5.1). Pour ce faire, chaque hypothèse d'évolution alternative à 2050 des différents déterminants du système a d'abord été quantifiée pour disposer, pour chaque hypothèse et pour chacune des 14 régions considérées, de valeurs pour les variables d'entrée du modèle.

Encadré 5.1. « GlobAgri et GlobAgri-AgT »

GlobAgri est une plateforme quantitative permettant de produire des bases de données cohérentes et des modèles de bilans ressources – utilisations de produits agricoles et agroalimentaires à partir de données Faostat et de données complémentaires partagées par des scientifiques de plusieurs institutions. Les bases de données générées sont équilibrées et tiennent compte des liens entre produits (*via* l'alimentation animale ou les produits joints huiles-tourteaux d'oléagineux ou lait-viande, par exemple). Les modèles de bilans équilibrent les ressources (production domestique plus importations moins exportations), d'une part, et les utilisations (consommation humaine, consommation animale et autres utilisations), d'autre part, pour chaque produit dans chaque région. Ils permettent de simuler les changements d'usages des terres induits par des modifications des utilisations de produits dans les différentes régions, étant donné un ensemble d'hypothèses d'évolution des autres variables du système (rendements végétaux et animaux, contrainte de terres disponibles pour l'agriculture, contrainte de terres cultivables, conditions du commerce international...). L'outil GlobAgri a été utilisé pour générer une base de données et un modèle de bilans spécialement spécifiés pour Agrimonde- Terra : GlobAgri-AgT.

GlobAgri-AgT comporte 33 agrégats de produits (26 agrégats de produits végétaux et 7 agrégats de produits animaux) et couvre 14 régions du monde. L'élevage y est représenté par 5 secteurs (lait, bovin viande, petits ruminants, porc et volaille) qui produisent 6 produits (lait, viande bovine, de petits ruminants, de porc, de volaille et œufs). Dans chaque secteur, plusieurs systèmes d'élevage co-existent : mixte, pastoral, urbain et autre pour les ruminants, mixte et autre pour les monogastriques, tels que définis dans Herrero *et al.* (2013). Les coefficients inputs/outputs entre les quantités des divers produits végétaux consommées par les animaux, (y compris l'herbe) et les quantités produites de produits animaux sont calibrés par système à partir des données sur les rations et les rendements animaux de Herrero *et al.* (2013), complétées par des données de Bouwman *et al.* (2005) et de Monfreda *et al.* (2008). L'outil générique GlobAgri et son application GlobAgri-AgT sont décrits en détail dans l'article de Le Mouél *et al.* (2018a).

Des matrices de traduction ont ainsi été construites pour chacune de ces variables (voir les matrices dans Le Mouël *et al.*, 2018b). Puis, quatre des cinq scénarios ont été simulés, fournissant ainsi des résultats quantitatifs sur leurs impacts en termes d'usage des terres, de production agricole et de commerce international par région et pour le monde dans son ensemble.

Enfin, dans une dernière étape, articulant analyse qualitative et analyse quantitative, un récit a été élaboré pour chaque scénario. Ces récits ont été rédigés par l'équipe de projet et discutés par les experts du comité des scénarios. Chaque récit fournit une image des usages des terres et de la sécurité alimentaire en 2050, et détaille le moteur du scénario et la trajectoire du système vers son image en 2050.

» Les scénarios d'usage des terres et de sécurité alimentaire mondiale et leurs impacts quantifiés

Les récits des cinq scénarios d'Agrimonde-Terra

Agrimonde-Terra propose un ensemble de cinq scénarios, qui sont représentés par des combinaisons d'hypothèses dans la figure 5.1, et dont les récits sont résumés ci-dessous. Les récits détaillés correspondants sont disponibles dans Mora *et al.* (2020). Trois scénarios, « Métropolisation », « Régionalisation » et « Ménages », sont fondés sur les tendances concurrentes actuelles identifiées dans la plupart des régions du monde. Deux scénarios, « Régimes sains » et « Communautés », impliquent des ruptures potentielles qui pourraient modifier l'ensemble du système d'usage des terres et de sécurité alimentaire.

Le scénario « Métropolisation » associe le développement des mégapoles et une intensification conventionnelle de l'agriculture, soit avec une transition nutritionnelle pilotée par les entreprises agro-alimentaires mondiales qui commercialisent des aliments ultra-transformés, soit avec une augmentation de la consommation des produits d'origine animale, dans un contexte global de développement porté par les forces du marché et marqué par des changements climatiques rapides. Les petits agriculteurs déconnectés des marchés urbains sont marginalisés.

Le scénario « Régionalisation » relie l'augmentation des villes de taille moyenne et leur mise en réseau avec les zones rurales, avec l'émergence de systèmes alimentaires régionaux fondés sur une agriculture familiale, de régimes alimentaires régionaux (correspondant aux tendances traditionnelles de consommation) et de systèmes d'approvisionnement régionalisés, portés par un ensemble d'accords régionaux, notamment sur le commerce international.

Le scénario « Ménages » associe une forte mobilité individuelle entre les zones rurales et urbaines et un développement de la pluriactivité et de l'emploi non agricole, avec l'émergence de régimes alimentaires hybrides s'appuyant à la fois sur des chaînes de valeur traditionnelles et modernes, dans un monde globalisé où les exploitations familiales et les coopératives sont des acteurs majeurs de l'usage des terres.

Les deux derniers scénarios impliquent des ruptures potentielles qui pourraient changer radicalement le système *Usage des terres et sécurité alimentaire* dans son ensemble.

Selon le scénario « Régimes sains », en raison du coût croissant de la malnutrition, se produit un basculement radical vers des régimes alimentaires sains, entraîné par une coopération mondiale et par des politiques publiques multisectorielles, dans un contexte de stabilisation du changement climatique. Il implique une reconfiguration des systèmes agricoles vers la durabilité et l'agroécologie, soutenue par de nouvelles alliances entre les parties prenantes.

Selon le scénario « Communautés », dans un contexte de crises multiples et récurrentes, intégrant un changement climatique fort, il existerait soit un développement fondé sur de petites villes et des communautés rurales qui se concentre sur la gestion des biens communs afin d'assurer la sécurité alimentaire, soit un scénario d'impasse des systèmes techniques marqué par une intensification conventionnelle et une dégradation de l'environnement.

Les impacts des scénarios sur l'usage des terres

Les modalités de quantification des scénarios

Les conséquences des scénarios sur l'usage des terres ont été simulées à l'aide du modèle de bilans de biomasse GlobAgri-AgT. La figure 5.1 indique que plusieurs hypothèses d'évolution à 2050 d'un déterminant peuvent coexister dans un même scénario. Par exemple, dans le scénario « Régimes sains », les systèmes de culture peuvent adopter une trajectoire d'intensification durable dans certains endroits et de transition vers l'agroécologie dans d'autres. Dans l'analyse quantitative néanmoins, par souci de simplicité, nous avons considéré des scénarios constitués d'une seule hypothèse d'évolution par déterminant, s'appliquant partout dans le monde. Certains scénarios ont par conséquent été simulés sous différentes variantes, chaque variante correspondant à une hypothèse d'évolution possible d'un déterminant (voir tableau 5.1). Enfin, les spécificités du scénario « Ménages » (réseaux, mobilité, pluriactivité, agilité) étant plutôt liées aux structures agricoles et au modèle de développement rural, elles sont difficiles à prendre en compte dans le modèle et aucun résultat quantitatif n'est disponible pour ce scénario, le scénario conservant néanmoins tout son intérêt en termes qualitatifs.

Les scénarios d'Agrimonde-Terra reposent sur quatre hypothèses d'évolution alternative des régimes alimentaires à 2050, qui donnent une place contrastée aux produits animaux dans le temps mais aussi dans l'espace : (1) une transition vers des régimes à base de produits ultra-transformés (« Métropolisation_Ultrap »); (2) une généralisation des régimes à base de produits animaux (« Métropolisation_Anim »); (3) une diversité régionale des régimes et des systèmes alimentaires (« Régionalisation »); (4) une transition vers des régimes sains fondés sur des aliments diversifiés incluant plus de fruits et légumes, de légumineuses, et en moyenne moins de produits animaux, de sucres et d'aliments ultra-transformés (« Régimes sains »).

Concernant l'élevage, quatre hypothèses alternatives d'évolution de l'élevage en 2050 ont été retenues : (1) élevage conventionnel intensif (« Intensif »); (2) élevage conventionnel intensif avec ressources locales (« Intensif_Local »); (3) élevage agroécologique en synergie avec l'agriculture ou l'urbanisation (« Agroécologique »); (4) élevage de basse-cour (« Basse-cour »).

Le tableau 5.1 décrit les variantes qui ont fait l'objet d'une simulation pour chaque scénario.

Tableau 5.1. Les scénarios et leurs variantes simulés avec le modèle GlobAgri-AgT.

Scénarios	Variantes	Noms des scénarios
Métropolisation	Avec hypothèse de transition des régimes vers les produits ultra-transformés	Métropolisation_Ultrap
	Avec hypothèse de transition des régimes vers les produits animaux	Métropolisation_Animp
Régionalisation	Avec technologie A : intensification durable pour systèmes de culture ; intensification conventionnelle avec ressources locales pour systèmes d'élevage	Régionalisation_A
	Avec technologie B : agroécologie pour systèmes de culture et systèmes d'élevage	Régionalisation_B
Régimes sains	Avec technologie C : intensification durable pour systèmes de culture ; agroécologie pour systèmes d'élevage	Régimes sains_C
	Avec technologie D : agroécologie pour systèmes de culture et systèmes d'élevage	Régimes sains_D
Communautés	Avec agroécologie : agroécologie pour systèmes de culture et systèmes d'élevage	Communauté_AE
	Avec effondrement : effondrement des systèmes de culture et élevage de basse-cour	Communauté_EFF

Les évolutions de l'usage des terres dans les différents scénarios

Presque tous les scénarios et leurs variantes conduisent à une expansion des terres agricoles au niveau mondial (tableau 5.2). Seules les variantes « Métropolisation_Ultrap » et « Régimes sains_C » permettraient de nourrir la population mondiale grandissante en 2050 sans étendre la surface agricole mondiale ni entraîner un surcroît potentiel de déforestation. Cependant, tandis que le scénario « Régimes sains » prévoit la réduction de la surnutrition, de la malnutrition et contribue à freiner le développement des maladies chroniques liées à l'alimentation, le scénario « Métropolisation » prévoit l'accroissement de la malnutrition et des maladies chroniques liées à l'alimentation. Ce dernier ne répond donc pas à des objectifs de sécurité alimentaire et nutritionnelle.

L'expansion des terres agricoles mondiales varie néanmoins très fortement d'un scénario à l'autre et, pour chaque scénario, d'une variante à l'autre. L'expansion est particulièrement élevée pour les scénarios impliquant soit une augmentation significative du niveau des calories d'origine animale dans les régimes alimentaires (+ 1,3 milliard d'hectares ou + 27 % par rapport à la situation initiale pour « Métropolisation_Animp »), soit une stagnation ou une détérioration générale des performances des systèmes de production agricole (+ 2 milliards d'hectares ou + 41 % pour « Communautés_EFF »). Elle est beaucoup plus faible dans les scénarios impliquant soit une réduction du niveau calorique des régimes alimentaires (+ 142 millions d'hectares ou + 3 % pour « Communautés_AE »), soit une augmentation limitée du niveau des calories d'origine animale dans ces régimes, accompagnée d'un mouvement de substitution significatif des viandes de ruminants par des viandes de monogastriques (+ 29 millions d'hectares ou + 0,6 % pour « Régimes sains_C » et – 54 millions d'hectares ou – 1 % pour « Métropolisation_Ultrap »).

Tableau 5.2. Conséquences des scénarios sur l'usage des terres au niveau mondial (millions d'hectares).

	Surface agricole totale	Surface en cultures arables et permanentes	Surface en prairies et pâtures permanentes
Métropolisation			
Métropolisation_Ultrap	– 54 (– 1 %)	+ 243 (+ 16 %)	– 297 (– 9 %)
Métropolisation_Animp	+ 1 318 (+ 27 %)	+ 620 (+ 40 %)	+ 698 (+ 21 %)
Régionalisation			
Régionalisation_A	+ 249 (+ 5 %)	+ 70 (+ 4,5 %)	+ 179 (+ 5,5 %)
Régionalisation_B	+ 691 (+ 14 %)	+ 174 (+ 11 %)	+ 517 (+ 15,5 %)
Régimes sains			
Régimes sains_C	+ 29 (+ 0,6 %)	– 56 (– 4 %)	+ 85 (+ 2,5 %)
Régimes sains_D	+ 269 (+ 5,5 %)	+ 50 (+ 3 %)	+ 219 (+ 6,5 %)
Communautés			
Communautés_AE	+ 142 (+ 3 %)	+ 277 (+ 18 %)	– 135 (– 4 %)
Communautés_EFF	+ 2 013 (+ 41 %)	+ 555 (+ 36 %)	+ 1 458 (+ 43,5 %)

La surface mondiale en cultures arables et permanentes s'accroît dans tous les scénarios, excepté « Régimes sains_C ». Ce sont les scénarios présentant les régimes alimentaires les plus riches en calories d'origine animale ou les perspectives les plus sombres pour les rendements des cultures et la productivité des systèmes de production animale qui induisent les expansions de terres cultivées les plus larges au niveau mondial (respectivement, + 620 millions d'hectares ou + 40 % pour « Métropolisation_Animp » et + 555 millions d'hectares ou + 36 % pour « Communautés_EFF »). On peut noter l'expansion assez importante de terres cultivées induite par le scénario « Métropolisation_Ultrap » (+ 243 millions d'hectares ou + 16 %). Outre les régimes alimentaires riches en calories embarqués dans ce scénario, l'hypothèse qui y est adoptée d'une substitution marquée entre viandes de ruminants et viandes de monogastriques (essentiellement de volaille) explique une large part de ce résultat. De la même façon, on peut souligner le caractère économe en terre cultivée du scénario « Régimes sains » (– 56 millions d'hectares dans sa variante C et + 50 millions d'hectares dans sa variante D), qui provient essentiellement du contenu calorique réduit et de la part limitée des calories d'origine animale dans les régimes alimentaires de ce scénario.

Le tableau 5.2 indique que la surface mondiale en prairies et pâtures permanentes augmente également dans la plupart des scénarios. Cette dernière s'accroît considérablement dans le scénario « Communautés_EFF » (+ 1,5 milliard d'hectares ou + 43,5 %), qui implique une détérioration de la productivité des productions animales entre 2010 et 2050. Elle s'étend de manière substantielle dans le scénario « Métropolisation_Animp » (+ 698 millions d'hectares ou + 21 %), du fait de la forte consommation de produits animaux, notamment de ruminants, qui caractérise ce scénario. La surface mondiale en prairies et pâtures permanentes augmente également significativement dans le scénario « Régionalisation », notamment dans sa variante B (+ 517 millions d'hectares ou + 15,5 %), en partie parce que les régimes alimentaires traditionnels, qui sont à la base de ce scénario, comportent une part importante de viande de petits ruminants, en particulier dans certaines régions à la démographie très dynamique (Afrique du Nord et Afrique sub-saharienne). L'expansion des prairies et pâtures permanentes

sur la planète est en revanche beaucoup plus limitée dans le scénario « Régimes sains », notamment dans sa variante C (+85 millions d'hectares ou +2,5%), tandis que leur surface diminue dans les scénarios « Métropolisation_Ultrap » et « Communautés_AE ».

► Les enjeux futurs des productions animales pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle

Dans un souci d'atteinte d'une sécurité alimentaire régionale (inclus dans le scénario « Régimes sains »), Agrimonde-Terra fait l'hypothèse que les régimes alimentaires des régions à faible revenu et à revenu intermédiaire (Afrique sub-saharienne et Inde) voient leur contenu calorique et en produits animaux augmenter en 2050, même lorsque la trajectoire générale d'évolution conduit ces contenus à diminuer en moyenne mondiale. Ainsi, dans le scénario « Régimes sains », le régime alimentaire sain combine deux stratégies opposées concernant la question spécifique de la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans chaque région du monde. Dans les pays à revenus haut et moyen, l'objectif est de diminuer la consommation d'aliments d'origine animale, tandis que, dans certains pays à faibles revenus, où les apports en protéines sont trop faibles, l'objectif est de l'augmenter, ainsi que la consommation de légumineuses, afin d'accroître les apports quotidiens en protéines. Par exemple, par rapport à la situation initiale (en 2010), le régime alimentaire sain implique en 2050 une réduction de 39% de la consommation quotidienne de produits animaux en Amérique du Nord et une augmentation de 35% en Afrique du Centre, de l'Est et du Sud ainsi qu'une augmentation de 130% de la consommation quotidienne de légumineuses. Plus généralement, le régime alimentaire sain d'Agrimonde-Terra considère qu'une stratégie de diversification des régimes alimentaires, incluant des aliments d'origine végétale plus diversifiés, pourrait résoudre en partie la sous-nutrition et les retards de croissance des enfants dans les pays à faible revenu en réduisant les carences en micronutriments (Smith, Haddad, 2015).

Cette hypothèse se révèle cruciale au regard de l'équilibre global entre l'offre et la demande de biomasse et en termes d'usage des terres au niveau mondial et régional, car, dans les scénarios d'Agrimonde-Terra, les régions à faible revenu et à revenu intermédiaire très peuplées connaîtront une croissance démographique très rapide, tandis que leurs systèmes d'élevage peu performants en termes de production à l'hectare verront leur productivité s'améliorer à 2050 mais dans une mesure limitée.

Au final, le scénario « Régimes sains » est celui qui a le plus faible effet sur l'expansion des terres cultivées à l'échelle mondiale, de l'ordre de 0,3 à 5%, tandis que le scénario « Métropolisation » avec une forte croissance de la consommation de produits animaux (« Métropolisation_Animp ») génère la plus forte croissance des terres cultivées, de l'ordre de 27%, et que le scénario « Régionalisation », avec une diversité de régimes alimentaires suivant les régions du monde, induit une expansion des terres intermédiaire de 5 à 13%.

► Les limites de la quantification de l'élevage dans les scénarios d'Agrimonde-Terra

Les résultats quantitatifs d'Agrimonde-Terra doivent être considérés avec prudence car ils sont contingents à un certain nombre de limites de l'analyse. L'analyse quantitative des scénarios d'Agrimonde-Terra s'est heurtée à deux difficultés majeures en ce

qui concerne les systèmes d'élevage : la disponibilité et la qualité des données initiales, d'une part, et la fragilité des hypothèses d'évolution des performances des systèmes d'élevage à l'horizon 2050, d'autre part, particulièrement dans les régions à faible revenu et à revenu intermédiaire.

Le modèle GlobAgri-AgT utilise les données Faostat. Cette base de données ne fournit que les quantités totales des différents ingrédients consommés par les animaux. Or, GlobAgri-AgT a besoin de répartir les quantités totales consommées entre espèces, puis, pour chaque espèce, entre systèmes d'élevage. Il existe peu de travaux permettant de réaliser cette répartition à l'échelle mondiale. Dans le cadre de GlobAgri-AgT, les travaux de Bouwman *et al.* (2005) et Herrero *et al.* (2013) ont été mobilisés. L'agrégation des rations animales par système et par espèce, issues de ces travaux, ne concorde pas toujours avec les quantités correspondantes fournies par la base de données Faostat. Il est nécessaire de procéder à différents types d'ajustements et de rééchelonnements pour harmoniser les différentes sources. Ce faisant, on introduit des biais et de l'incertitude sur les données initiales utilisées. Comme mentionné précédemment, nous avons constaté par exemple un niveau très élevé des coefficients inputs/outputs (ratio de la quantité de matière sèche ingérée sur la quantité de produit animal produite) pour le secteur de la viande bovine en Inde et pour les secteurs de ruminants en Afrique de l'Ouest. Dans les deux cas, ces niveaux élevés peuvent provenir d'un biais dans les données initiales et/ou résulter des traitements visant à harmoniser les différentes sources. Néanmoins, dans les deux cas également, ils peuvent aussi révéler des finalités des activités d'élevage qui sont différentes dans ces régions relativement à d'autres régions du monde qui cantonnent l'animal à sa fonction de rente. En Afrique sub-saharienne par exemple, l'élevage a fréquemment une fonction d'épargne; il a aussi une dimension sociale, culturelle et symbolique (Alary *et al.*, 2011).

Par ailleurs, il n'y a pas de données sur les quantités d'herbe consommées par les animaux dans la base Faostat, cette dernière ne fournissant que la surface en prairies et pâtures permanentes par pays. Pour GlobAgri-AgT, nous avons donc utilisé les quantités d'herbe figurant dans les rations par système et par espèce des travaux de Bouwman *et al.* (2005) et Herrero *et al.* (2013). Toutefois, lorsque l'on agrège ces quantités et qu'on les rapporte aux surfaces classées comme « pâtures et prairies permanente » dans la base de données Faostat, on s'aperçoit que la productivité en herbe révélée de ces surfaces est très hétérogène dans l'espace. Outre le fait que cette productivité est très mal connue à une échelle globale, cela suggère que la catégorie « pâtures et prairies permanentes » de Faostat recouvre des types de pâture très différentes d'une région à l'autre : des parcours naturels en zones désertiques jusqu'aux prairies les plus fertiles. Il y a là également une source de biais et d'incertitude dans les données initiales.

Enfin, nous avons rencontré une grande difficulté à quantifier les hypothèses d'évolution alternative à 2050 des systèmes d'élevage. Il existe peu de littérature fournissant, sur une large échelle géographique, des indications quantitatives sur les performances techniques comparées de différents systèmes d'élevage dans les différents secteurs de production animale et sur leurs potentialités d'évolution dans le futur. C'est particulièrement vrai pour les régions à faible revenu et à revenu intermédiaire pour lesquelles nous faisons face à des données et des connaissances limitées sur les systèmes d'élevage. C'est un enjeu fort pour l'avenir de l'usage des terres et de la sécurité alimentaire globale car les résultats d'AgriMonde-Terra montrent clairement

que ces régions présentent un potentiel fort de croissance de la consommation de produits animaux, alors que leurs systèmes d'élevage majoritairement extensifs sont très gourmands en terre. Au total, si les résultats d'Agrimonde-Terra permettent de différencier clairement les scénarios qui ne seraient pas capables de ceux qui seraient susceptibles d'assurer la sécurité alimentaire mondiale en 2050, les résultats au niveau régional sont plus ambigus.

► Conclusion

Les résultats d'Agrimonde-Terra confirment le rôle majeur des productions animales dans l'usage des terres et dans la sécurité alimentaire en 2050. Ils montrent qu'une transition vers des systèmes alimentaires durables et sains nécessitera d'agir simultanément du côté de la demande en produits animaux et du côté de l'offre en produits végétaux et animaux, mais en apportant quelques nuances, notamment en insistant sur le rôle de la production animale pour la sécurité alimentaire dans certaines régions à faible revenu et à revenu intermédiaire où les apports protéiques quotidiens sont particulièrement faibles aujourd'hui et ne permettent pas toujours d'assurer une sécurité alimentaire et nutritionnelle.

Les hypothèses d'Agrimonde-Terra conduisent, quel que soit le scénario, à une expansion significative de la surface agricole dans certaines régions à faible revenu et à revenu intermédiaire en particulier en Afrique sub-saharienne. Une évolution plus optimiste de la productivité des systèmes de production agricole dans cette région du monde permettrait d'atténuer cette expansion. L'accroissement des importations de produits animaux en provenance de régions qui les produisent en utilisant moins de terre constitue un autre levier possible. En parallèle, la réduction de la consommation de produits animaux dans les régions à revenu élevé, dans le scénario « Régimes sains », conduit à libérer des quantités importantes de terres mobilisées pour l'alimentation animale (dans la région d'origine ou importées), et ainsi à réduire la pression de ces régions pour s'approvisionner en aliments pour les animaux sur les marchés internationaux. Ce mécanisme permet d'accroître les surfaces consacrées aux productions végétales pour l'alimentation humaine améliorant ainsi la sécurité alimentaire et nutritionnelle tout en réduisant la pression qu'exercent les systèmes agricoles sur les écosystèmes à l'échelle globale.

Partie 2

Inscrire les travaux de modélisation
et d'évaluation de scénarios
dans les démarches de prospective

Chapitre 6

Introduction à la modélisation et à l'évaluation de scénarios

Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne et Aurélie Wilfart

Cette première section de la partie 2 présente tout d'abord quelques éléments de méthode de modélisation et d'évaluation (avec définition des concepts importants), puis introduit plus spécifiquement deux méthodes de modélisation-évaluation et deux études prospectives récentes associées à un travail de modélisation-évaluation de scénarios issus de prospectives (Afterres 2050 et Tyfa). Ces deux études prospectives sont présentées en détail dans la suite du chapitre en précisant à la fois la nature des scénarios, les méthodes de modélisation-évaluation mobilisées et leurs conséquences sur un certain nombre d'indicateurs.

► Nécessité de modéliser et d'évaluer les scénarios issus de prospectives

Face à la multiplicité des enjeux liés à l'évolution des territoires et dans un contexte d'accélération de changements locaux et globaux, et de prise de conscience des impacts des activités humaines sur leur propre durabilité dans les territoires (Van der Ploeg, 2008 ; Millennium Ecosystem Assessment, 2005), la modélisation et l'évaluation de scénarios sont de plus en plus fréquemment attendues de la part des acteurs technico-économiques et des décideurs politiques. Dans le cadre des prospectives produisant des scénarios, la modélisation et l'évaluation sont mobilisées avec l'objectif d'anticiper l'impact des différents scénarios sur la durabilité des activités humaines dans les territoires. Ces évaluations peuvent intervenir à différentes échelles spatiales et temporelles selon l'objectif du travail de prospective, voir par exemple les prospectives présentées dans cet ouvrage Afterres 2050 à l'échelle de la France (chapitre 9), Tyfa à l'échelle de l'Europe (chapitre 10) et Agrimonde-Terra à l'échelle mondiale (chapitre 5). Il s'agit à la fois de pouvoir comparer les impacts de différents scénarios, mais aussi d'évaluer la capacité des scénarios à répondre à des objectifs pré-identifiés comme la réduction des émissions de GES, l'augmentation de la sécurité alimentaire, la réduction de l'usage des pesticides chimiques en agriculture, l'autonomisation des territoires, la non-extension des terres cultivées dans un objectif de conservation de la biodiversité. Les évaluations permettent de mesurer l'étendue des changements induits dans les scénarios et fournissent des éléments qualitatifs ou quantitatifs de comparaison des scénarios entre eux.

» Une introduction aux approches de modélisation et d'évaluation

L'évaluation est l'action de déterminer la valeur de quelque chose. La démarche d'évaluation peut viser à mesurer, à quantifier et à caractériser un système dans sa situation actuelle ou future, ou dans une situation alternative à la situation de référence (souvent la situation actuelle). Ce système est dans bien des cas de nature complexe. La représentation de ses caractéristiques et l'évaluation de ses performances sont alors rendues difficiles par cette complexité, nécessitant souvent la définition d'un certain nombre d'hypothèses sur le fonctionnement, sur la dynamique du système étudié dans le cadre de la prospective qui peuvent être, si besoin, synthétisées dans un modèle informatique de simulation. Selon l'objet ciblé, la démarche d'évaluation fait alors appel à des méthodes ou à des outils très variés en fonction de leurs présupposés, de leurs buts, de leurs techniques (voir par exemple l'encadré 6.1 sur l'analyse de cycle de vie territoriale). L'évaluation est un processus omniprésent en agriculture. Elle ne se résume pas seulement à la mesure de la performance de systèmes agricoles. C'est un processus complexe qui soulève des enjeux tant méthodologiques qu'éthiques, qui intègre l'accompagnement des processus d'apprentissage sur les systèmes étudiés et d'amélioration continue de ces systèmes.

Dans le domaine de la prospective sur les territoires agricoles, l'évaluation consiste, en mettant en œuvre des méthodes explicites, à élaborer des conjectures sur l'évolution future du territoire dans ses dimensions sociotechnique, économique et/ou écologique. Elle s'appuie sur un agencement méthodique de connaissances et de savoirs relatifs au devenir du système étudié mais de natures et d'origines diverses (tant qualitatives que quantitatives). Son objectif est d'anticiper ou de répondre aux enjeux actuels et futurs, et d'envisager des leviers d'action pour y répondre dès aujourd'hui.

Ces évaluations mobilisent des méthodes d'évaluation très diverses (qualitative ou quantitative, monocritère ou multicritère, agrégée ou pas, etc.) et peuvent faire appel dans certains cas à des modèles numériques de simulation qui convertissent les scénarios en données quantitatives alimentant les évaluations. Ces modèles peuvent être de natures très différentes (statique ou dynamique, empirique ou mécaniste, non spatialisés ou spatialement explicite, etc.). Cette étape de modélisation est généralement chronophage, elle demande un travail important de conceptualisation. La modélisation conceptuelle détermine le périmètre du système étudié, les composantes et les processus (par exemple : les stock et flux) pris en compte et représentés, précise la nature des scénarios qui seront simulés et des indicateurs qui peuvent être calculés à partir du modèle.

La modélisation informatique ou simulation numérique des socio-agro-écosystèmes

Les territoires agricoles et les systèmes agri-alimentaires sont des systèmes complexes, qui peuvent être considérés comme des *socio-agro-écosystèmes* (SAE) intégrant des dimensions écologiques (sols, climat, biodiversité), techniques (techniques de culture, d'élevage, gestion des ressources), économiques (marchés), sociales (pratiques culturelles, réseaux d'acteurs) et politiques (réglementations, incitations). Ils se distinguent par l'interaction entre les pratiques et les systèmes agricoles, entre les écosystèmes naturels et les dynamiques socio-économiques (Lescourret *et al.*, 2015). La modélisation

informatique, ou simulation numérique, de ces systèmes a pour objectif de comprendre ces interactions complexes, d'anticiper les impacts de changements de pratiques ou d'aménagement et d'aider à concevoir des stratégies de gestion durable des ressources.

Diverses approches de modélisation

La modélisation des SAE peut avoir recours à des méthodes diverses : modèles empiriques ou mécanistes, modèles statiques ou dynamiques, modèles spatialement explicites ou pas, etc. Elles peuvent être divisées en plusieurs catégories selon les objectifs, les données disponibles et la nature des processus modélisés. Quelques approches de modélisation sont ici présentées en mettant en avant leurs principaux avantages et limites.

Les *modèles économétriques et d'optimisation* utilisent des outils statistiques et mathématiques pour évaluer les relations entre les pratiques agricoles, les rendements et les facteurs socio-économiques et environnementaux. L'optimisation permet de déterminer les meilleures stratégies en termes de gestion des ressources et de production agricole, selon des objectifs économiques, environnementaux ou sociaux. Cette approche quantitative offre des résultats robustes et mesurables. Les techniques d'optimisation sont souvent utilisées pour maximiser les bénéfices tels que la productivité ou les résultats économiques et minimiser les effets négatifs tels que les impacts environnementaux (Berre *et al.*, 2014). Les principales limites de ce type d'approche résident dans le fait qu'elles mobilisent des modèles statiques qui ne prennent pas en compte l'évolution des comportements à long terme, et sa difficulté à modéliser les interactions complexes entre les facteurs écologiques et sociaux.

Les *modèles dynamiques des systèmes* visent à représenter les flux de matière, d'énergie et d'information dans les SAE à travers des boucles de rétroaction positives et négatives. Ils s'appuient souvent sur des équations différentielles pour capturer l'évolution temporelle de variables comme les stocks de nutriments, les populations ou les ressources. Cette approche de modélisation offre une vue d'ensemble des relations de causalité à l'échelle du système (Vayssières *et al.*, 2009). Elle est utile pour analyser les tendances à long terme et les effets de boucle de rétroaction. Mais elle aboutit à une simplification parfois excessive des interactions entre les acteurs humains et permet difficilement d'intégrer la diversité des comportements et des acteurs individuels.

Les *modèles spatiaux explicites* intègrent des données géographiques (sous forme de systèmes d'information géographique – SIG) pour représenter les relations entre les pratiques agricoles et les dynamiques spatiales des écosystèmes. Ils permettent de simuler l'impact de changements de pratiques et de systèmes agricoles sur des variables environnementales comme l'érosion des sols, la pollution des eaux dans un bassin versant (Gascuel-Oudou *et al.*, 2009), la déforestation ou la fragmentation des habitats (Degenne, Lo Seen, 2016). Ces modèles disposent d'une précision spatiale qui permet d'analyser des scénarios localisés. Ils sont particulièrement utiles pour la conception et l'évaluation des politiques de gestion des territoires. La principale limite est l'exigence élevée et le besoin de données géospatiales fines pas toujours disponibles notamment dans les terrains des pays du Sud. Ce type de modèle a par ailleurs des difficultés à intégrer les dynamiques sociales et économiques de manière détaillée.

Les *modèles basés sur les agents* (ou systèmes multi-agents, SMA) simulent les interactions entre de multiples agents individuels (animaux, agriculteurs, entreprises, acteurs politiques, etc.) qui prennent des décisions en fonction de leur environnement et de

leurs objectifs (Bousquet, Le Page, 2004; Grimm, Railsback, 2005). Ces modèles sont particulièrement adaptés pour représenter l'hétérogénéité des acteurs et la dynamique de prise de décision dans un contexte d'incertitude (Grillot *et al.*, 2018a et 2018b). Les avantages de cette approche sont une bonne considération de la diversité des comportements et des stratégies des agents. Cette approche généralement de type *bottom-up* permet d'explorer l'impact de décisions individuelles sur le système global (Kleinpeter *et al.*, 2024). Mais ces modèles nécessitent de nombreuses données comportementales, et sont particulièrement complexes à calibrer et valider (Manson *et al.*, 2012).

Les défis et les perspectives de la modélisation des SAE

Au-delà des grands types d'approches de modélisation définis ci-dessus et compte tenu de la complexité des SAE, il est souvent nécessaire de combiner plusieurs approches de modélisation. L'*intégration multi-modèles* permet de combiner des modèles écologiques, agro-zootechniques, économiques et sociaux pour mieux capturer les interactions entre les différents sous-systèmes. Cette intégration reste un vrai défi scientifique sur le plan conceptuel et informatique (Vayssières, 2021).

De plus, dans certains contextes, la modélisation des SAE est fortement limitée par la *disponibilité et la qualité des données*. Les données socio-économiques et écologiques sont souvent fragmentaires, et la collecte de données précises à l'échelle des territoires reste un défi, en particulier dans les pays du Sud. Il est donc parfois utile de réduire la granularité des modèles en ne conservant que la représentation des processus majeurs et déterminants, notamment au regard des objectifs de représentation et d'évaluation fixés, en réduisant la complexité des modèles individuels intégrés (Grillot *et al.*, 2018a).

Par ailleurs, l'un des principaux défis est l'*incertitude* inhérente à la modélisation des SAE. Cette incertitude provient à la fois des limites des connaissances sur les processus écologiques et des comportements humains difficilement prévisibles, notamment sur le temps long. L'évolution du climat est une des sources d'incertitude qui gagne en importance. Les modèles doivent de plus en plus être capables de représenter les effets des changements climatiques, notamment en ce qui concerne la variabilité des rendements agricoles, la capacité des animaux à résister à des conditions de chaleur et d'humidité plus élevées (Thornton, Herrero, 2014), la disponibilité des ressources en eau et plus largement la résilience des écosystèmes.

Enfin, les *approches participatives* et la co-construction des modèles avec les agriculteurs, les décideurs politiques et autres parties prenantes sont de plus en plus promues. Elles permettent d'aligner les modèles avec les réalités locales et de renforcer l'acceptabilité des résultats. La co-construction peut aussi concerner l'élaborer des scénarios. Elle a tout son sens dans le cadre de perspectives territoriales, d'autant qu'elle permet une meilleure appropriation par les parties prenantes des outils, des enjeux et des résultats de simulation (collectif ComMod, 2005).

L'évaluation multicritère

L'évaluation multicritère (EMC) est une méthode largement utilisée dans la prise de décision pour des problématiques complexes où plusieurs critères, souvent contradictoires, doivent être pris en compte simultanément. Ces méthodes permettent d'analyser et de comparer des alternatives selon différents points de vue, facilitant ainsi la prise de décision, en particulier dans des environnements incertains ou conflictuels.

Cette approche est particulièrement pertinente dans les domaines de l'agriculture, de la gestion des ressources et de l'environnement, et des dynamiques territoriales où des décisions complexes doivent intégrer des aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

Cette section définit les principaux concepts, méthodes et applications associées à l'évaluation multicritère.

Concepts clés de l'évaluation multicritère

L'EMC s'appuie sur quelques concepts clés (Lairez *et al.*, 2016).

– Les *alternatives* et les *critères* : les alternatives représentent les options ou solutions entre lesquelles il faut choisir. Elles peuvent, dans certains cas, correspondre aux scénarios développés dans les prospectives territoriales. Les critères sont les dimensions sur lesquelles ces alternatives sont évaluées. Ces critères peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, mesurables ou non mesurables, et sont souvent en conflit entre eux. Par exemple, dans le choix d'un système d'élevage, un critère technique (par exemple : augmenter la productivité *via* un recours important aux aliments concentrés) peut entrer en conflit avec un critère environnemental (par exemple : conserver la biodiversité *via* le recours privilégié aux prairies permanentes pour l'alimentation des animaux).

Encadré 6.1. Analyse de cycle de vie territoriale : une méthodologie d'évaluation multicritère demandant à être plus largement utilisée dans le cadre de prospectives territoriales

L'*analyse de cycle de vie* (ACV) est une méthodologie majeure d'évaluation multicritère des impacts environnementaux associés à un produit ou à un service tout au long de son cycle de vie (Iso, 2006). Elle constitue un outil essentiel pour promouvoir la durabilité environnementale, en fournissant une vision complète des impacts des produits et services tout au long de leur cycle de vie. Elle vise à quantifier l'ensemble des flux de matière et d'énergie échangés entre l'environnement et le système étudié afin d'évaluer son empreinte environnementale. Cette méthode se fonde sur une approche systémique et multi-étape pour comprendre les impacts potentiels intervenants à chaque phase du cycle de vie.

Aujourd'hui largement utilisée pour comparer différents scénarios d'évolution des systèmes d'élevage et des filières de production des produits animaux (de Vries, de Boer, 2010), l'ACV continue d'évoluer avec le développement de l'analyse de cycle de vie territoriale (ACVT) avec des perspectives prometteuses pour l'évaluation de scénarios issus de prospectives territoriales (figure 6.1). L'ACVT considère le territoire dans son ensemble, y compris ses infrastructures, ses systèmes de production et de consommation, ainsi que ses interactions avec l'environnement global (Loiseau *et al.*, 2014). Cette approche systémique tient compte théoriquement des interactions entre différentes activités sur un même territoire et leurs effets conjoints sur l'environnement, en considérant les flux entrants et sortants, par exemple, les matières premières, l'énergie, les déchets (Loiseau *et al.*, 2018). L'inclusion des impacts sociaux et économiques (Vayssières *et al.*, 2019), la spatialisation des impacts, ainsi que le développement de bases de données plus complètes et accessibles font partie des pistes de recherche pour améliorer cette méthode.

Encadré 6.1. (suite)

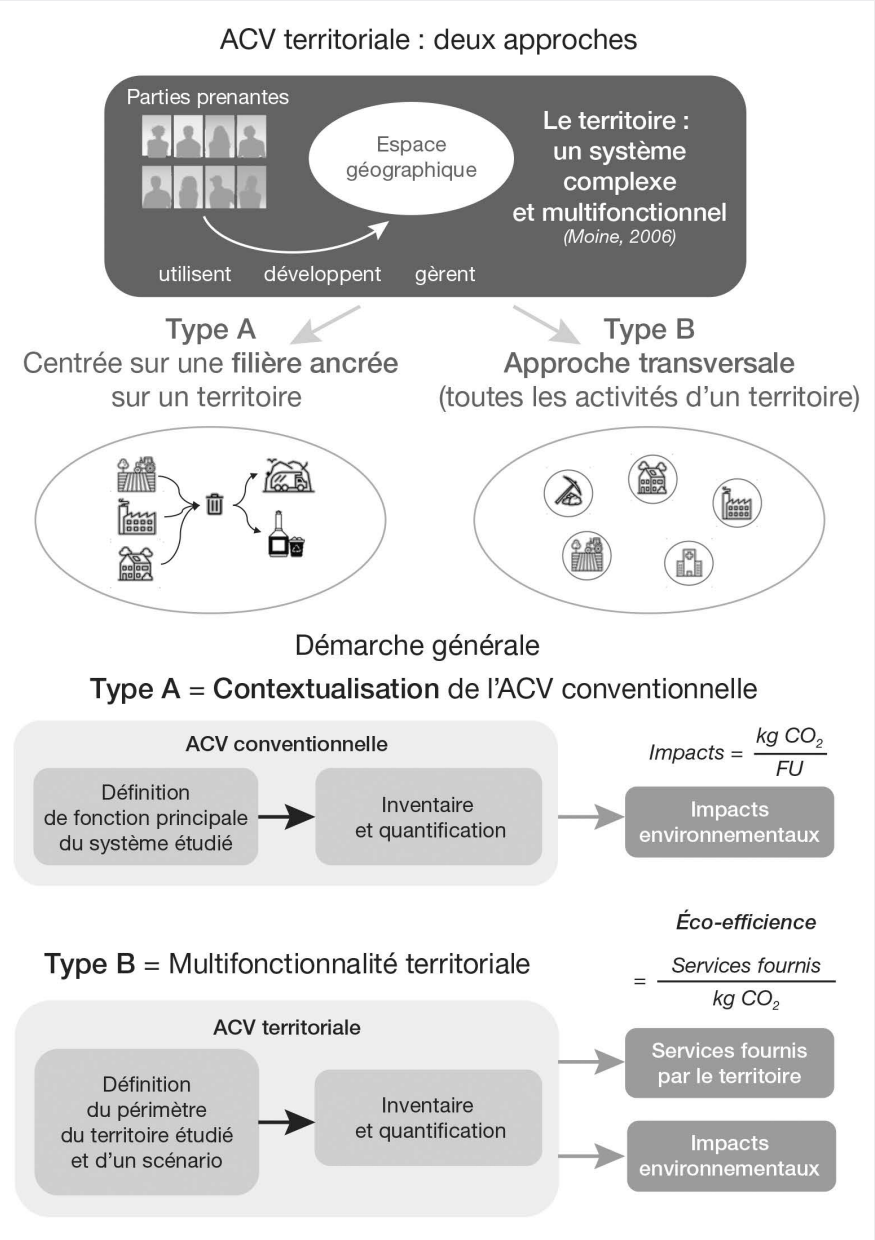


Figure 6.1. Principes généraux de l'ACV territoriale, adapté de Loiseau *et al.* (2022).

- *L'importance relative* des critères : l'EMC repose parfois sur la nécessité de pondérer les critères selon leur importance relative. Cela peut se faire de manière objective (sur des mesures) ou subjective (par l'avis d'experts ou des parties prenantes). Les pondérations des critères influencent directement les résultats, il est donc crucial de bien définir les critères et leur pondération.
- *Les objectifs contradictoires* : certains critères étant en contradiction, il est rarement possible d'optimiser simultanément tous les objectifs. Les décisions intégrant de multiples critères impliquent donc généralement des *compromis*. La gestion de ces compromis est centrale dans l'EMC, par exemple : en cherchant à maximiser certains critères tout en minimisant les inconvénients sur d'autres.
- On distingue classiquement les *évaluations quantitatives* des *évaluations qualitatives*. Les évaluations quantitatives s'appuient sur des données chiffrées (par exemple : statistiques, tests standardisés) et permettent une analyse « objective » des performances. Les évaluations qualitatives reposent sur l'observation, sur des entretiens et sur des études de cas pour une évaluation plus contextuelle et nuancée. Cette dernière prend de l'importance dans un contexte d'intérêt croissant pour les méthodes participatives, tout en posant de nouveaux défis à relever pour garantir leur pertinence et leur utilité dans différents contextes.

Applications de l'évaluation multicritère

L'EMC en agriculture présente de nombreux domaines d'application, en voici quelques exemples.

La dynamique des systèmes agricoles dans les territoires : dans le cadre de la transition agroécologique notamment, l'EMC est utilisée pour évaluer l'effet de changement de pratiques et de systèmes agricoles sur de multiples indicateurs de durabilité des territoires, sur la fourniture de services écosystémiques en particulier (Kremen *et al.*, 2012 ; Duru *et al.*, 2015).

L'aménagement territorial : dans le cadre de l'aménagement du territoire, l'EMC aide à choisir entre différentes options de développement et d'usage des sols en lien avec de multiples indicateurs de performances socio-économique et environnementale des territoires. Ces critères intègrent généralement des critères de production agricole et de couvertures des besoins alimentaires et énergétique des territoires (Russeil *et al.*, 2023), mais aussi des critères socio-économiques tels que la création d'emploi et de valeur ajoutée, et des critères environnementaux tels que l'empreinte carbone du territoire.

La gestion des ressources, notamment des ressources naturelles telles que l'eau, les forêts et la biodiversité en prenant en compte des intérêts multiples (Guitouni, Martel, 1998) : l'EMC permet de comparer différentes stratégies de gestion des ressources (priorisation des ressources renouvelables par rapport aux ressources non renouvelables) et des espaces naturels et anthropisés (*land sharing* par opposition à *land sparing*, voir chapitre 11) en évaluant des critères comme le coût, la durabilité et l'acceptabilité sociale de ces différentes stratégies.

Défis et perspectives de l'évaluation multicritère

Complexité et subjectivité : l'EMC peut être complexe à mettre en œuvre, notamment en raison de la subjectivité dans le choix des critères et des pondérations. Des techniques de facilitation et de consultation des parties prenantes peuvent aider à atténuer ces biais.

Prise en compte des incertitudes : tout comme la modélisation, les évaluations font face aux incertitudes liées aux données de descriptions des systèmes et renseignant leur dynamique. Des approches comme l'analyse de sensibilité ou les méthodes probabilistes peuvent être intégrées pour mieux gérer ces aspects.

Intégration de nouvelles technologies : l'essor des données massives (*big data*) et de l'intelligence artificielle offre des opportunités pour améliorer les modèles d'EMC, en permettant une évaluation plus précise et dynamique des critères.

La modélisation des socio-agro-écosystèmes et l'évaluation multicritère : des outils complémentaires pour accompagner la transition des territoires

La modélisation des socio-agro-écosystèmes et l'évaluation multicritère sont des domaines en plein essor. Elles offrent des outils puissants pour accompagner la prise de décision face à la complexité des systèmes territoriaux et à la multiplicité des enjeux et des dynamiques en cours.

La modélisation des socio-agro-écosystèmes permet de comprendre et de gérer les interactions complexes entre l'agriculture, l'élevage notamment, la société et l'environnement. Les approches intégratives, combinant des méthodes spatiales, dynamiques, orientées agents et participatives, semblent être les plus prometteuses pour représenter le fonctionnement et la dynamique de ces systèmes complexes (voir par exemple le chapitre 7).

De façon complémentaire, l'évaluation multicritère permet de tenir compte de multiples dimensions des socio-agro-écosystèmes (fonctionnement, propriétés, performances, impacts, services, etc.), elle permet une approche holistique et intégrée des enjeux associés aux dynamiques territoriales. Les défis liés à sa mise en œuvre appellent à une rigueur méthodologique et à une implication active des parties prenantes pour garantir la pertinence et la légitimité des résultats.

La modélisation des systèmes complexes et l'évaluation multicritère se complètent donc et sont particulièrement pertinentes pour accompagner les démarches participatives de construction de scénarios, les prospectives territoriales notamment. La complexité des systèmes étudiés et l'incomplétude des connaissances dans certains contextes ne doivent pas limiter leur utilisation. Il est possible de simplifier les modèles et de réduire la granularité des modèles et des données mobilisées dans les évaluations quand on représente des territoires complexes et vastes tels que les territoires agricoles. Un des prérequis réside toutefois dans la nécessité d'informer les parties prenantes et les utilisateurs finaux des hypothèses et des choix de simplification qui ont été faits dans le cadre des approches de modélisation-évaluation participatives.

► Quatre travaux illustrant la diversité des méthodes de modélisation-évaluation et leur utilisation dans le cadre de prospectives

Deux méthodes de modélisation-évaluation contrastées et deux études prospectives récentes associées à un travail de modélisation-évaluation de scénarios issus de prospectives (Afterres 2050 et Tyfa) sont présentées dans la suite de cette partie.

Le chapitre 7, coordonné par Olivier Therond, chercheur à INRAE, décrit une plateforme de modélisation (Maelia) pour la simulation et l'évaluation intégrées des systèmes et territoires agricoles. La modélisation intégrée, au cœur de la démarche Maelia, vise l'intégration dans les modèles des connaissances, des enjeux, des parties prenantes, des échelles spatiales et temporelles, des disciplines, des méthodes et de modèles préexistants, afin, entre autres, de simuler la construction de propriétés émergentes vis-à-vis du système territorial étudié. Ainsi, Maelia est une des rares plateformes de modélisation permettant de simuler finement la dynamique spatiotemporelle des systèmes de production et filières de transformation et recyclage des biomasses agricoles en interaction avec les ressources en eau dans un territoire. Maelia réunit les avantages et les fonctionnalités des modèles spatiaux explicites et des systèmes à base d'agents (voir les types de modèles décrits plus haut). La chaîne de modélisation proposée dans Maelia correspond à un ensemble de modèles couplés permettant de représenter les dynamiques écologiques et les activités humaines et leurs interactions au pas de temps journalier sur plusieurs années consécutives. La plateforme offre la possibilité d'explorer une grande gamme de scénarios d'évolution des territoires intégrant la dynamique des contextes (climat, prix, etc.), des entités (exploitations agricoles, ressources, unités de transformation, etc.) et des stratégies de gestion. Elle fournit un ensemble de variables intermédiaires sur l'état du système socio-agro-écologique permettant le calcul d'un ensemble d'indicateurs quantitatifs de performances biophysiques, environnementales, économiques et sociales. Maelia a déjà été utilisée pour traiter divers enjeux et leviers de durabilité propres aux territoires agricoles tels que la gestion de l'eau et la transition agro-écologique. De nombreux développements sont en cours notamment pour i) mieux représenter les systèmes d'élevage en tant que composante importante de l'organisation des flux de matière au sein des territoires et plus largement ii) étudier les systèmes de bioéconomie territorialisés dans une perspective de neutralité carbone des territoires. La plateforme Maelia est destinée à être de plus en plus utilisée dans les démarches de prospective, fondées sur la co-construction de scénarios exploratoires, répondant aux enjeux locaux et globaux identifiés avec les acteurs des territoires.

Dans le chapitre 8, intitulé « Évaluer la multifonctionnalité des élevages au pâturage au sein des territoires », coordonné par Alexandre Ickowicz, chercheur au Cirad, un modèle conceptuel de la multifonctionnalité est proposé pour évaluer les multiples fonctions des élevages au pâturage au sein des territoires et soutenir la dynamique de ce type de systèmes d'élevage. Le modèle conceptuel a été développé dans le cadre du réseau GASL « Restoring value to grassland ». Il est organisé en quatre dimensions : la production de produits animaux, les dimensions sociale et environnementale et enfin le développement territorial. Ce modèle conceptuel permet d'explorer non seulement les fonctions au sein de chacune des dimensions mais aussi les interactions entre les dimensions et entre les fonctions. Le modèle conceptuel est qualitatif, il est à la base d'identification d'enjeux liés au développement de l'élevage. Il est très utile en amont d'évaluations multicritères mobilisant différents outils de modélisation-évaluation qualitatif ou quantitatif selon les contextes. Ce modèle conceptuel a été appliqué dans différentes régions du monde : Argentine, Brésil, Sénégal, Mongolie, Vietnam, Chine, France. Son application est illustrée dans ce chapitre dans deux contextes : le Vietnam et le Sénégal. Au Sénégal, un SMA a été développé pour évaluer l'effet de scénarios d'allocation des ressources végétales et de développement de la filière lait locale. Au Vietnam, ce modèle conceptuel a été utilisé pour aider à la définition participative et multi-acteurs des indicateurs rendant compte

des fonctions de l'élevage à trois échelles (troupeau, ferme et territoire). Une analyse transversale des études de cas montre que le modèle conceptuel favorise une approche systémique, holistique et intégrative à l'échelle territoriale (ressources, acteurs, activités) incitant à intégrer les différentes dimensions de la durabilité. Il fournit également un outil pertinent d'analyse des dynamiques d'élevage dans les territoires. Ces analyses peuvent aussi contribuer à alimenter des prospectives territoriales en amont de stratégie de développement territorial, en y incluant explicitement les multiples fonctions des élevages au pâturage et leurs interactions et compromis à considérer en lien avec les autres activités présentes dans les territoires.

Le chapitre 9, intitulé « Afterres 2050 : de la fabrique de scénarios à leur évaluation », coordonné par Christian Couturier, scénariste au sein de Solagro, présente un scénario portant sur l'usage des terres et des systèmes agricoles à l'échelle de la France métropolitaine respectant les objectifs fixés par différentes feuilles de routes nationales à l'horizon 2050. Dans ce scénario, l'agro-écologie est le mot d'ordre avec une réduction importante des intrants chimiques et des aliments d'élevage importés, il est fondé sur une division par deux de l'artificialisation des terres agricoles, sur un maintien des prairies permanentes et sur une augmentation des linéaires de haies et des surfaces forestières ; il est permis par une réduction d'un tiers de la surconsommation, par une réduction de moitié des pertes et gaspillages et par des régimes alimentaires humains composés pour un tiers de protéines animales et pour deux tiers de protéines végétales. Ce scénario a été évalué à l'aide du modèle MoSUT, développé par Solagro, et de l'outil ClimAgri®, développé par l'Ademe.

Le chapitre 10, intitulé « Une Europe agroécologique en 2050, scénario “Ten Years For Agroecology” (Tyfa) », coordonné par Pierre-Marie Aubert, chercheur à l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), et Xavier Poux, chercheur au sein du bureau d'études et de recherche ASca, a pour ambition d'expliquer ce que pourrait être une Europe à 100% agroécologique à l'horizon 2050. Le scénario prospectif Tyfa « Ten Years for Agroecology » développé par les deux chercheurs se distingue par son caractère très ambitieux, car il vise à supprimer totalement l'emploi des pesticides et des fertilisants de synthèse, tout en rendant l'Europe autonome sur le plan alimentaire et en préservant même sa capacité exportatrice en céréales, produits laitiers et vin. Le scénario proposé est fondé sur un changement des habitudes alimentaires, des systèmes de polyculture-élevage incluant des systèmes bovins extensifs redonnant une place importante aux légumineuses et aux prairies permanentes. L'élaboration de ce scénario repose sur un modèle d'équilibre de la biomasse (Tyfam). La force du scénario proposé réside dans la prise en compte des interrelations entre les phénomènes agronomiques, écologiques, sociaux et politiques.

Encadré 6.2. Les modèles et outils employés pour la modélisation-évaluation des scénarios décrits dans les perspectives de la partie 2 (Afterres 2050 et Tyfa)

MoSUT (éditeur : Solagro) : ce modèle biophysique, utilisé dans la prospective Afterres 2050, s'appuie sur une approche bilancielle. Celle-ci consiste à équilibrer les usages et les ressources, dans différentes dimensions. La dimension des « bilans d'approvisionnement » des produits agricoles est d'abord abordée : on équilibre les ressources (productions et importations) et les usages (usages alimentaires et non alimentaires, transformations, usages industriels et exportations). Le bilan d'azote et le bilan fourrager font également l'objet d'une approche bilantielle. Le premier permet de calculer les besoins en apports minéraux, qui sont la variable d'ajustement, et le second permet de vérifier s'il reste un excédent fourrager. Le modèle tient compte également d'hypothèses sur les échanges internationaux. Le modèle fonctionne par itération avec un ajustement des hypothèses et des résultats.

ClimAgri® (éditeur : Ademe) : cet outil de diagnostic des consommations d'énergie et des émissions de GES adapté aux enjeux de l'agriculture et la forêt, à l'échelle des territoires, a été utilisé pour évaluer les scénarios développés dans les perspectives Afterres 2050 et Tyfa. À partir d'une description détaillée des activités établie avec les acteurs locaux, il permet de réaliser un bilan chiffré des consommations d'énergie fossile et d'eau et des émissions de l'activité agricole selon une approche cycle de vie, intégrant notamment la phase amont avec l'impact des intrants (engrais, aliments des animaux).

Tyfam (éditeur : Iddri) : ce modèle d'équilibre de biomasse, développé tout spécialement dans le cadre de la prospective Tyfa, est organisé autour de compartiments (productions végétales et animales, demandes alimentaires et non alimentaires/industrielles en biomasse (énergie et biomatériaux)). Il considère les productions européennes et les importations. Les flux d'azote associés au fonctionnement et aux interactions entre les différents compartiments déterminent en grande partie les niveaux de productivité en biomasse des deux premiers compartiments. Le modèle Tyfam est également couplé au calculateur ClimAgri® pour calculer les émissions de GES du système alimentaire.

ACCT (éditeur : Solagro) : cet outil co-construit par Solagro et par un groupe de travail piloté par la Fédération nationale d'agriculture biologique, le réseau des producteur/trices en agriculture biologique, permet d'évaluer les consommations d'énergie et les émissions de GES à l'échelle de l'exploitation et par atelier de production.

Chapitre 7

Modélisation et évaluation intégrées des systèmes et territoires agricoles avec la plateforme Maelia pour outiller des démarches de prospective

Olivier Therond

» Des enjeux de durabilité aux approches intégrées

Les impacts environnementaux de l'agriculture dite « industrielle », fondée sur l'utilisation massive d'intrants, sont tellement importants qu'elle est considérée comme une des forces majeures qui conduisent les activités humaines à dépasser les « limites planétaires » (*planetary boundaries*; Rockström *et al.*, 2009). Considérant l'ensemble des impacts de l'agriculture industrielle sur l'environnement ou sur la santé, plusieurs instances internationales (par exemple : Iaastd, 2009) concluent que poursuivre dans la même direction (c'est-à-dire « *business as usual* ») n'est plus une option pour faire face aux enjeux actuels et futurs.

La prise en compte de ces enjeux environnementaux combinée à l'apparition de nouveaux acteurs de la gestion des ressources naturelles (par exemple : organisme unique de gestion de l'eau) et de nouvelles technologies (par exemple : numériques) et à l'évolution rapide des contextes économiques et socio-politiques conduisent à penser que de nouvelles approches de recherche et développement doivent être développées pour l'aide à la décision des acteurs impliqués dans la gestion des ressources naturelles et des territoires (Walker, 2002; Pahl-Wostl, 2007; Spielman *et al.*, 2009). Ces nouvelles approches devraient permettre de prendre en compte les processus socioéconomiques et écologiques en jeu, les différentes échelles de temps et d'espace associées, le comportement des acteurs ayant un impact sur le système étudié (Parrot, Meyer, 2012; Wu, 2013). Du point de vue appliqué, l'enjeu est de développer et de mettre en œuvre des démarches de conception/planification de paysages/territoires (Nassauer, Opdam, 2008; Parott, Meyer, 2012; Cumming *et al.*, 2013). Le paysage/territoire est alors conceptualisé comme « *un système socio-écologique complexe comprenant une mosaïque dynamique d'usages des sols* » (Parott, Meyer, 2012). L'enjeu est de représenter les différents niveaux d'organisation clefs et les propriétés émergentes issues des interactions au sein et entre ces niveaux d'organisation (Parrott, Meyer, 2012; Wu, 2013; Cumming *et al.*, 2013). Considérant les difficultés, les coûts matériels, humains et financiers et le temps nécessaire à la mise en œuvre d'expérimentations *in situ* à l'échelle du territoire, beaucoup d'auteurs promeuvent le développement et l'utilisation d'outils de modélisation numérique pour explorer les effets potentiels de nouvelles modalités de gestion des ressources dans les territoires.

Pour répondre à cette demande, les méthodes d'évaluation et de modélisation intégrées (ci-après IAM pour «*integrated assessment and modelling*») fondées sur l'intégration des connaissances dans des modèles, en vue d'évaluer la durabilité de modalités de gestion des ressources naturelles *via* la simulation, se sont fortement développées (Hamilton *et al.*, 2015). Les approches d'IAM sont généralement fondées sur le développement et l'évaluation par simulation de «scénarios» de changements (Therond *et al.*, 2009) : elles visent à évaluer *ex ante* (avant application) la durabilité de scénarios de changements d'ordre biophysique (par exemple : climat), technico-économique (activités humaines), politiques (réglementation, incitation), voire institutionnel (mode de gouvernance). Dans ces approches scientifiques, la volonté de produire des connaissances utilisables par les acteurs confrontés à des questions et problèmes de durabilité des activités humaines est souvent revendiquée (Jakeman *et al.*, 2006 ; Pahl-Wostl, 2007 ; Van Ittersum *et al.*, 2008). Elles s'inscrivent dans le champ des études de géoprospective, fondée sur le développement de scénarios, qui visent à fournir à la société civile une démarche et des outils pour explorer les relations entre l'organisation territoriale des activités humaines et les objectifs locaux et globaux portés par ces acteurs.

Dans le domaine de l'agriculture, Chevassus-Au-Louis *et al.* (2009) soulignent deux grands registres et enjeux associés de l'intégration : (i) dans le registre des connaissances, mettre en œuvre une approche «holistique» (par opposition à «réductionniste») des objets complexes étudiés, c'est-à-dire prendre en compte les entités et interactions clefs des objets agronomiques complexes étudiés relativement à la question qui sous-tend l'analyse, (ii) dans le registre de l'action, développer des objets et outils associant de manière fonctionnelle des composants permettant de représenter les propriétés émergentes étudiées (par exemple : la production d'une exploitation agricole, les débits des cours d'eau). Ils insistent sur le fait que l'intégration peut concerner aussi bien les entités/objets écologiques et sociotechniques que les objectifs de gestion et critères de réussite.

» Intégration, oui mais de quoi ?

Hamilton *et al.* (2015) définissent 10 grandes dimensions interreliées de l'intégration et enjeux associés dans les approches d'IAM (figure 7.1) :

- «**Enjeux**» afin de considérer les différents domaines de la durabilité et ainsi ne pas mettre en œuvre des actions («solutions») qui résoudraient un problème dans un domaine mais en généreraient un autre ou des autres dans un ou d'autres domaines ;
- «**Parties prenantes**» afin (i) d'associer une large gamme de porteurs d'enjeux, qu'ils soient à l'origine du problème, affecté directement par ou sensible à celui-ci (par exemple : utilisateur d'une ressources dont l'état quantitatif ou qualitatif est dégradé, association de protection de la nature), chargé de le résoudre (par exemple : décideur politique ou gestionnaire de ressources), porteur de connaissances clefs sur le système socio-écologique étudié et (ii) de prendre en compte leurs points de vue et valeurs au fil du processus IAM ;
- «**Dispositifs de gouvernance**» afin de prendre en compte et de représenter les différentes caractéristiques et stratégies d'action des systèmes de gouvernance collective, privée ou publique, des ressources partagées ou à enjeu collectif ;
- «**Cadre naturel**» et «**Cadre social**» afin de représenter les différentes caractéristiques, en termes de structure et de dynamiques, des deux sous-systèmes, social et

écologique, en interaction dans un territoire, notamment les boucles de rétroaction au sein et entre eux;

- « **Échelle spatiale** » et « **Échelle temporelle** » afin de considérer les différents niveaux d'organisation ou échelles spatiales et temporelles en jeu que ce soit du point de vue de la représentation des processus écologiques ou socio-économiques ou de la production d'information aux échelles qui font sens pour les différents porteurs d'enjeux;

- « **Disciplines** » afin de permettre à des scientifiques de postures, d'axiomatics, linguistique, sémantique et méthodes différentes de participer à l'ensemble du processus d'IAM;

- « **Méthodes, modèles, autres outils et données** » afin d'articuler les différentes informations et méthodes nécessaires pour traiter des autres dimensions de l'intégration. Deux grandes sous-dimensions sont ici à considérer : (i) l'intégration des connaissances génériques (académiques) et celles plus locales des acteurs et (ii) l'intégration, *via* un processus de modélisation, de celles-ci dans un ou des « modèles »;

- « **Incertitude** » afin de prendre en compte et de communiquer les différentes sources d'incertitudes liées aux différentes dimensions de l'intégration (y compris calibration et validation des modèles). Du fait de son caractère couteux et technique, cette dimension reste le parent pauvre des approches d'IAM.

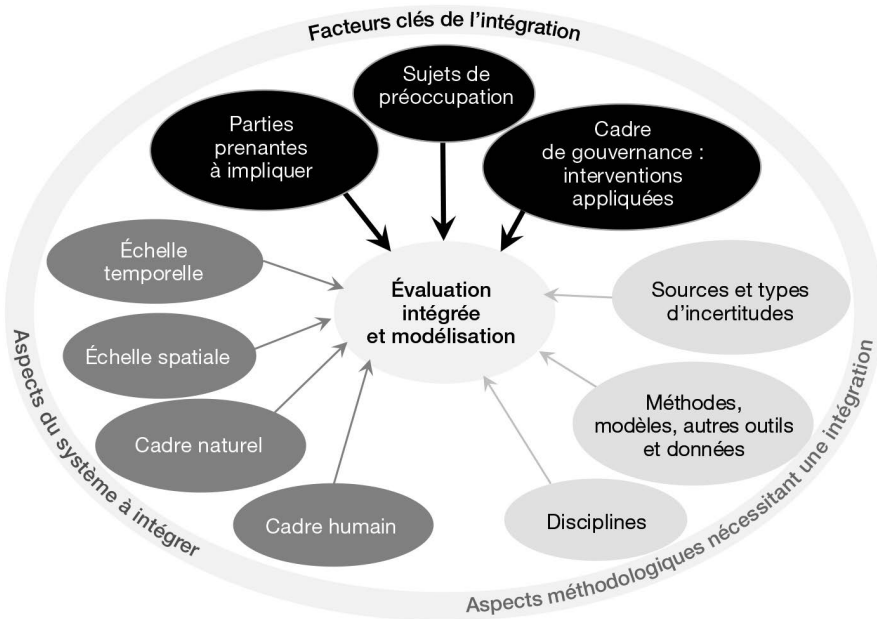


Figure 7.1. Les dix grandes dimensions de l'*integrated assessment and modelling* (source : Hamilton *et al.*, 2015).

►► Modélisation intégrée des territoires

Alors que les problèmes de gestion sont souvent exprimés à l'échelle de territoire (par exemple : bassin versant), ils sont souvent situés au sein de ces espaces (par exemple : sur un tronçon de rivière) et dans le temps (sur une période donnée) et peuvent être très hétérogènes. Leur fréquence et leur intensité dépendent de la

dynamique des interactions entre processus écologiques (météorologie, hydrologie, croissance des cultures) et activités humaines (usages des ressources et gouvernance de celles-ci) (Therond *et al.*, 2014). En d'autres termes, l'émergence de problèmes de gestion des ressources au sein d'un territoire est en fait liée aux différentes « situations d'action » des acteurs (McGinnis, Ostrom, 2014). Dans les territoires agricoles, elles sont caractérisées par les pédoclimats, par les systèmes de culture et de production, par les ressources individuelles (matériel, travail) et collective (par exemple : eau), par la gouvernance des ressources (par exemple : Cuma, police de l'eau) et par les filières. Modéliser un territoire agricole pour simuler les conséquences de modalités de gestion des ressources, individuelles et collectives, nécessite donc de représenter finement la structure de ce territoire, c'est-à-dire les situations d'action des acteurs de celui-ci (Therond *et al.*, 2014).

Les stratégies d'actions de chaque type d'acteurs, fondées sur des unités spatiotemporelles différentes, interagissent avec des processus écologiques qui ont eux-mêmes une dynamique spatiotemporelle propre. Aussi, la simulation des propriétés qui émergent de ces interactions entre activités humaines et processus écologiques nécessite de représenter les différents processus sociaux et écologiques en jeu et leurs interactions, notamment les rétroactions. Il s'agit non seulement de simuler les effets des activités humaines sur les processus écologiques et donc sur l'état des ressources naturelles mais aussi les effets de cette modification d'état sur les activités humaines. Ainsi, dans un territoire d'agriculture irriguée, il faudrait représenter la dynamique des prélèvements en eau et leurs impacts sur la ressource en eau mais aussi en quoi ce changement d'état des ressources (par exemple : disponibilité en eau) joue sur les pratiques d'irrigation.

Enfin, pour assurer la pertinence des simulations pour l'aide à la décision, il est nécessaire d'évaluer des indicateurs qui font sens pour les différentes parties prenantes de la gestion des ressources en jeu. Ces indicateurs doivent donc permettre de porter un regard adapté sur ces ressources aux échelles spatiotemporelles qui font sens pour chacun de ces acteurs. D'un point de vue évaluation, l'enjeu est ici de permettre à la fois de conduire une évaluation de la durabilité de nouveaux modes de gestion de ces ressources mais aussi de leur résilience face aux aléas. Il est donc question ici à la fois de l'évaluation du niveau (moyen) des performances environnementales, économiques et sociales mais aussi de l'évaluation de la résilience de ces performances au fil du temps (par exemple : en années) face à la variabilité et aux évolutions tendanciennes, notamment du climat, des marchés et des politiques publiques.

► Maelia, plateforme de modélisation et évaluation intégrées des systèmes et territoire agricoles

Le développement de la plateforme Maelia¹² s'inscrit dans le mouvement scientifique de l'IAM. Elle vise à structurer les démarches de modélisation, de conception et d'évaluation intégrées des systèmes et territoires agricoles. Développée initialement pour traiter des questions relatives à la gestion quantitative de l'eau dans les territoires d'agriculture irriguée, la plateforme Maelia vise à conduire une modélisation et une évaluation intégrées (IAM) des territoires agricoles et des systèmes de bioéconomie

12. Modelling of socio-Agro-Ecological systems for Landscape Integrated Assessment (<http://maelia-platform.inra.fr/>).

territorialisés. L'objectif est d'évaluer les impacts environnementaux, les services écosystémiques et les performances économiques et sociales de scénarios relatifs à l'organisation territoriale et la gestion des systèmes de production, transformation et recyclage des biomasses et des ressources naturelles (par exemple : retenue d'eau) dans un contexte de changement climatique et de variabilité des marchés agricoles et des politiques agricoles et environnementales.

La plateforme Maelia est fondée sur trois technologies principales : (i) un système multi-agent (SMA), intégrant (ii) une base de données géoréférencées à haute résolution spatiale et (iii) une chaîne de modèles dynamiques des activités humaines et processus écologiques. Maelia est développée au sein de la plateforme de développement de modèles multi-agents spatialisés Gama¹³. Cette dernière offre un environnement de développement de modèles multi-agents fondés sur des données géoréférencées sous la forme d'une grille (raster), de vecteurs ou d'un graphe (Taillandier *et al.*, 2014).

L'*architecture multi-agent* permet de modéliser et de simuler le comportement des systèmes humains-environnement dans lesquels de multiples et différents agents agissent suivant des rationalités propres (une autonomie décisionnelle). Les modèles multi-agents sont de plus en plus utilisés comme « objets intermédiaires » dans des dispositifs d'IAM pour accompagner les acteurs dans le traitement de questions relatives à la gestion des ressources au sein d'un territoire. Ils sont également particulièrement adaptés pour simuler les processus biophysiques et anthropiques distribués dans l'espace et les propriétés et processus émergents liés à l'interaction entre ces processus. Ils sont classiquement utilisés pour évaluer les effets de scénarios de changement de règles de gestion des ressources naturelles et de stratégies d'acteurs (Bousquet, Lepage, 2004; Bots, Daalen, 2008; Voinov, Bousquet, 2010; An, 2012). Enfin, c'est un type d'architecture de modélisation qui permet de représenter les systèmes socio-écologiques de manière relativement accessible et transparente pour les utilisateurs du modèle, puisque les composants du modèle (entités et processus) peuvent correspondre aux modèles conceptuels développés par les thématiciens, voire par les acteurs eux-mêmes (Sibertin *et al.*, 2018). Par ailleurs, les plateformes de développement de modèle multi-agent permettent généralement de mobiliser une large gamme de formalismes de dynamique dans un même modèle (équationnel, algorithmique, statistique, probabiliste, graphe, automate-cellulaire...).

La *bases de données géoréférencées* (SIG) à haute résolution spatiale permet de décrire finement la structure du territoire et les situations d'action. Elle est fondée sur l'intégration de nombreuses bases de données couvrant le territoire national ou régional de manière à permettre d'instancier Maelia le plus facilement possible dans différents territoires. Ainsi, par exemple, il intègre une représentation :

- des différents types de ressources en eau par hybridation des bases de données (BD) vecteurs de BD Carthage® (IGN et agences de l'eau) pour les cours, BD Topo® (IGN) pour les surfaces en eau de petite taille comme les retenues dites collinaires, du Bureau de recherches géologiques et minières sur les nappes alluviales;
- des sols et du climat *via* l'utilisation des données de la base de données géographique des sols de France (carte des sols au 1/1 000 000 ou 1/250 000) et de la BD de Météo France (grille Safran 8 × 8 km);

13. Gama : *Gis & Agent-based Modelling Architecture*.

- de la topographie *via* l'utilisation du modèle numérique de terrain BD Alti® (IGN);
- du parcellaire des exploitations *via* l'utilisation du registre parcellaire graphique®;
- de l'occupation du sol par couplage des données du registre parcellaire graphique et de la base de données Corine Land Cover;
- des points de prélèvement en eau agricole, domestique et industriel et des points de rejet en eau usée *via* l'utilisation des bases de données en libre accès des agences de l'eau et de Sandre.

Les informations sur ces bases de données et les traitements dédiés pour les intégrer sont disponibles sur le site de la documentation de Maelia¹⁴.

La chaîne modélisation correspond à un ensemble de modèles couplés permettant de représenter les dynamiques écologiques et les activités humaines et leurs interactions au pas de temps journalier sur plusieurs années (par exemple : 30 ans). De manière à permettre une instanciation de la plateforme Maelia sur une large gamme de territoires, seuls des modèles (i) réputés robustes, (ii) relativement simples à recoder et à appréhender et (iii) ne demandant pas un processus de calibration trop coûteux ont été sélectionnés. Ainsi, concernant les processus écologiques, le modèle de culture AqYield (Constantin *et al.*, 2015, Tribouillois *et al.*, 2018) a été intégré et amplifié *via* l'intégration des cycles de l'azote et du carbone (Tribouillois *et al.*, 2020; Misslin *et al.*, 2022). L'hydrologie est représentée *via* les formalismes, recodés, des phases sols et routage du modèle Swat (*Soil and Water Assessment Tool*¹⁵) et le développement d'un module *ad hoc* pour représenter l'hydrologie de chaque retenue et barrage dans un bassin versant.

Afin de permettre de représenter les filières de production, transformation et usage des biomasses de la bioéconomie, un module « filières » a été développé, en collaboration avec le Cirad (unité de recherche Recyclage et Risque), sur la base du modèle Uputuc développé sur l'île de La Réunion pour représenter les filières de traitements et valorisation de produits résiduels organiques. Au fur et à mesure des projets de recherche (voir ci-après), des modèles de fonctionnement d'unités de production ou de transformation des biomasses (par exemple : méthanisation) sont intégrés à ce module « filières » afin, à terme, de pouvoir représenter et simuler la dynamique d'une large gamme de filières biomasses.

Les activités humaines sont représentées au travers de modèles agents. Le modèle d'agent agriculteur a fait l'objet de développements spécifiques. Sur la base d'une architecture Desire-Belief-Intention, ou *via* le couplage avec Capfarm (Bareille *et al.*, 2020), il permet de simuler le choix d'assolement de systèmes de culture dans les parcelles d'une exploitation en fonction de critères (niveau et variabilité du revenu, temps de travail et coût au changement) et des performances des choix antérieurs mémorisés par l'agent. Ce modèle permet aussi de représenter les stratégies de conduite des cultures sous la forme de règles de décision de type « si-alors » qui conditionnent le déclenchement des opérations techniques : travail du sol, semis, fertilisations, irrigations, traitements phytosanitaires, récolte... Chaque opération technique est ainsi représentée par un jeu de règles de décision qui peuvent être fonction du type de sol, du précédent cultural ou de la rotation, du type d'exploitation, de la zone pédoclimatique... Les contraintes de fonctionnement à l'échelle de l'exploitation sont également prises en compte.

14. <http://maelia-platform.inra.fr/>

15. <https://swat.tamu.edu/>

Ainsi, comme chaque opération technique dans chaque parcelle dure un certain temps, fonction du débit de chantier, cela conduit à une distribution temporelle de celle-ci dans les parcelles fonction des forces de travail et du matériel disponibles, de la sole à traiter et des conditions météorologiques qui s'expriment pendant la période de réalisation de l'opération. En outre, les opérations sont réalisées de manière à limiter les déplacements entre les parcelles à traiter et les priorités entre opérations techniques et entre ressources (par exemple : eau) en compétition sont explicitement instruites. Ainsi, quelle que soit l'étendue du territoire simulé, de celui d'une exploitation à plusieurs milliers de kilomètres carrés, dans Maelia, chaque parcelle, de chaque exploitation a une dynamique propre, fonction de ses caractéristiques et de celles de l'exploitation à laquelle elle est rattachée. Il est donc possible de simuler les cycles biogéochimiques propres à cette parcelle et de faire tout traitement statistique pour exprimer les résultats aux échelles temporelles et spatiales supérieures.

Les comportements des autres acteurs, tels que les gestionnaires de barrage de soutien d'étiage, la police de l'eau ou les gestionnaires d'unité de transformation sont représentés dans la même logique suivant, le plus souvent, des jeux de règles « si-alors ».

In fine, la plateforme Maelia permet de paramétrer une très large gamme de scénarios factoriels ou multifactoriels relatifs aux climat, prix des intrants et produits agricoles, politiques agricoles et environnementales, à la nature et distributions des systèmes de culture et ressources (par exemple : eau) et des filières et aux stratégies de gestion des acteurs (agriculteurs et autres) (figure 7.2). Elle permet ensuite de simuler ces différents scénarios sur une série d'années, puis d'évaluer les indicateurs relatifs au niveau et à la variabilité (résilience/vulnérabilité) intra- et interannuelle des cycles de l'eau, de l'azote et du carbone (impacts et services écosystémiques), rendements, marge semi-

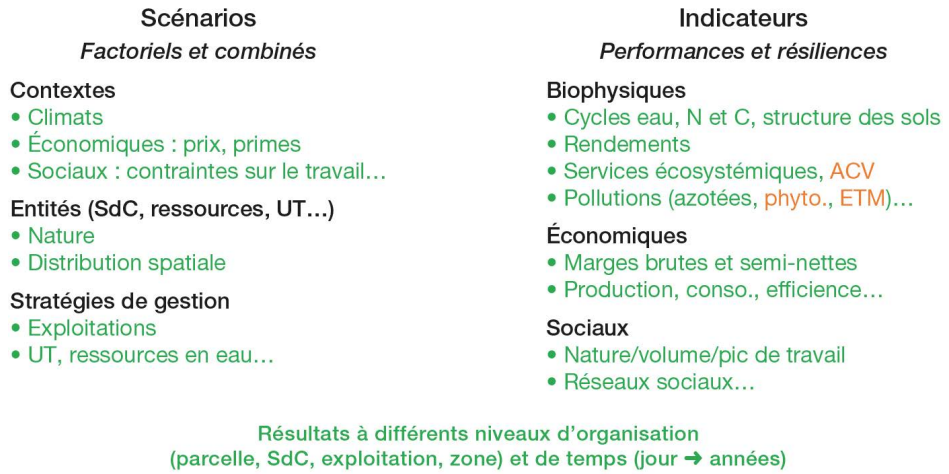


Figure 7.2. Nature des scénarios simulables dans Maelia et types d'indicateurs d'évaluation disponibles suivant leur état d'avancement, de vert pour opérationnel à orange pour en cours de développement. SdC : systèmes de culture. UT : unité de transformation de biomasse (par exemple : méthaniseur). ACV : analyse de cycle de vie. Phyto. : produits phytosanitaires. ETM : éléments-traces métalliques. N : azote. C : carbone.

nette, quantité et nature de travail, flux de matière, état des ressources en eau, durée et intensité des restrictions d'usage... de l'échelle de la parcelle et de l'unité de gestion de la ressource à celle du territoire.

► Maelia, support d'une dynamique aux nombreux domaines d'application

Les capacités de modélisation et d'évaluation de Maelia ont été développées au fil de projets de recherche afin de lui permettre de traiter la gamme des grands enjeux et leviers de durabilité propres aux territoires agricoles et systèmes de bioéconomie territorialisés (figure 7.3).

Gestion territoriale de l'eau

La plateforme Maelia est une des très rares plateformes qui représentent finement la dynamique spatiotemporelle et les interactions entre les quatre sous-systèmes des situations de gestion de l'eau : les ressources en eau, les hydrosystèmes, les utilisateurs de ces ressources et la gouvernance des usages (par exemple : police de l'eau).

Plus précisément, Maelia permet de modéliser à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles, les prélèvements domestiques et industriels, l'hydrologie des différentes ressources en eau (cours d'eau, nappes, retenues collinaires, barrages), les lâchers de barrage et restrictions d'usage au sein des bassins versants (d'une superficie de dizaines à milliers de kilomètres carrés).

La possibilité d'utiliser Maelia dans un dispositif multi-acteur pour concevoir et évaluer des organisations territoriales d'activités agricoles visant à réduire l'occurrence des crises de gestion quantitative de l'eau a été démontrée dans le cadre des thèses de doctorat de Clément Murgue (2011-2014) et de Sandrine Allain (2015-2017). Ces interactions fondées sur l'utilisation de Maelia ont permis d'instruire les questions d'actualité sur la gestion de l'eau et produire des connaissances jugées pertinentes, crédibles et légitimes par les acteurs locaux du bassin aval de l'Aveyron (Tarn et Garonne). Ainsi, par exemple, les simulations de Maelia ont montré que, dans ce bassin, les stratégies s'appuyant sur l'optimisation de l'irrigation ou sur la modification des rotations étaient plus efficaces pour réduire les déficits en eau que la création de retenues de substitution.

Transition agroécologique

À la suite des travaux sur l'eau, les capacités de Maelia ont été élargies à l'évaluation des performances des systèmes agroécologiques. Dans le cadre du projet Bag'ages, les travaux fondés sur Maelia visaient à évaluer les effets des couverts intermédiaires (CI) et rotations diversifiées sur les flux d'eau verte et bleue dans les bassins versants (figure 7.4). La question ici était de savoir si le déploiement de couverts intermédiaires ne risquait pas de limiter les flux d'eau bleue vers les hydrosystèmes pendant les deux périodes de recharge : l'automne et le printemps. L'utilisation de Maelia a permis de poser les premières bases de réponse : le risque semble moins important qu'anticipé dans le bassin étudié (Tribouillois *et al.*, 2022). Pour évaluer la généralité de ces premiers résultats, un projet de 2 ans, financé par l'Office français de la biodiversité (OFB), a été lancé en 2023 afin de déployer Maelia pour évaluer les effets de ces couverts sur des territoires contrastés en France.

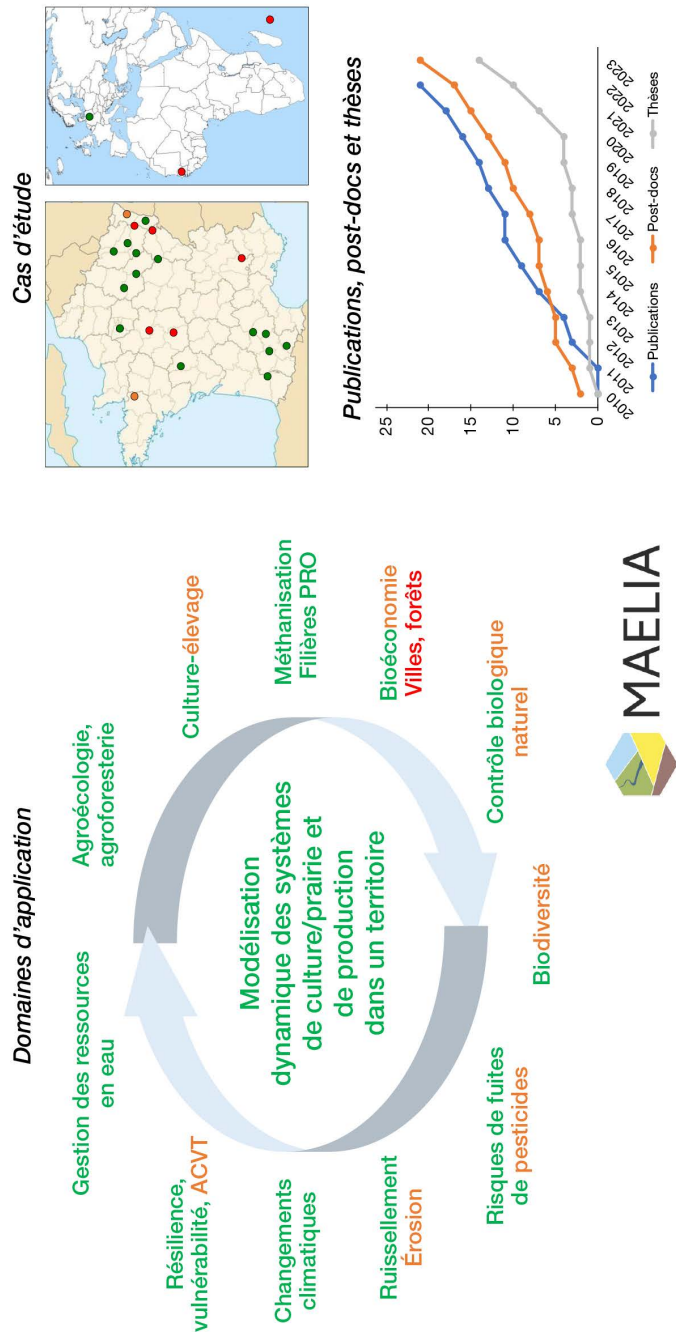


Figure 7.3. Représentation schématique des domaines de modélisation et évaluation intégrées de la plateforme Maelia (à gauche), et cartographie des cas d'étude (en haut à droite) suivant leur état d'avancement, de vert pour « opérationnel » à rouge pour « à planifier », et nombre de publications, post-docs et thèses fondés sur Maelia cumulés au fil du temps (en bas à droite). PRO : produits résiduaires organiques, ACVT : analyse de cycle de vie territoriale.

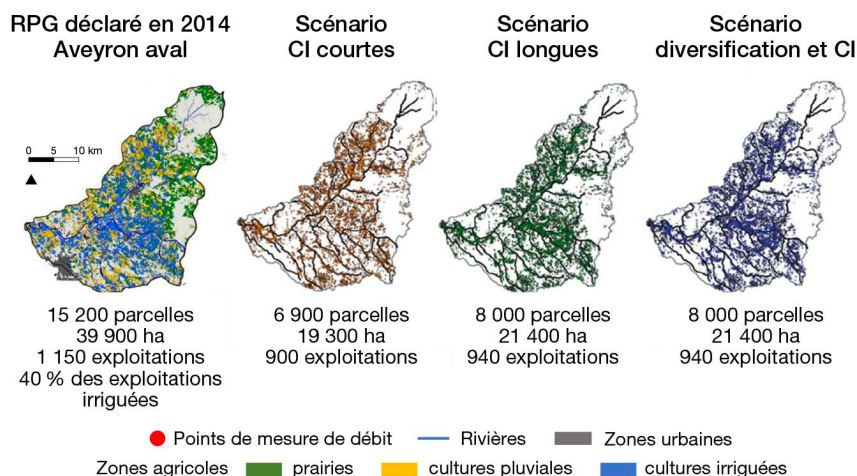


Figure 7.4. Représentation spatialisée de l'occupation du sol du bassin aval de l'Aveyron (sud-ouest de la France) en 2014 et de trois scénarios de déploiement de couverts intermédiaires (CI) courts ou longs, combinés ou non avec une diversification des rotations. RPG : registre parcellaire graphique.

Les possibilités de Maelia ont ensuite été étendues à l'évaluation des effets de la diversification des systèmes de culture sur une large gamme d'indicateurs, en France et en Allemagne (projet H2020 DiverIMPACTS). Ainsi, en Vendée, Maelia a été utilisée pour évaluer les performances de scénarios de systèmes culture-élevage à l'échelle du territoire (Catarino *et al.*, 2021). En Saxe, en Allemagne, Maelia a été utilisée pour évaluer les effets de scénarios d'introduction de couverts intermédiaires et de diversification des rotations sur la qualité de l'eau, les émissions de GES et les performances socio-économiques des exploitations.

En parallèle, le projet PotA-GE, coordonné par l'UMR Silva, a permis d'intégrer un module d'agroforesterie dans Maelia et ainsi d'évaluer les effets du déploiement de ces systèmes sur les cycles de l'eau à l'échelle du territoire. Ces travaux sont poursuivis afin de prendre en compte les cycles de l'azote et du carbone mais aussi, dans le cadre du projet Tetra'haies, coordonné par l'UMR Fare, de représenter les effets des haies sur ces cycles.

Services écosystémiques et biodiversité

Considérant ses capacités à simuler la dynamique du carbone organique dans les sols et un bilan GES complet, la plateforme Maelia a été reconnue comme un des cinq outils utilisables pour la labélisation « bas carbone » en systèmes de grandes cultures.

Par ailleurs, plusieurs projets ont été lancés pour développer des modèles de simulation du contrôle biologique naturel des bioagresseurs des cultures *via* l'activité de leurs ennemis naturels à l'échelle du paysage. Ainsi, dans un premier temps, la thèse de Nirina Ratsimba (2016-2020) a permis de faire un état des connaissances et de poser les bases conceptuelles et les premières briques de ce type de modélisation dans Maelia. Dans la foulée, les recherches menées sur la modélisation des régulations biologiques ont permis de développer un module générique de simulation des chaînes trophiques cultures-ravageur-maladie-auxiliaires. Dans le cadre du

Plan national de recherche et innovation (PNRI), ce modèle sera utilisé pour évaluer des scénarios de gestion du paysage visant à augmenter les régulations naturelles des pucerons, à réduire la pression de la jaunisse de la betterave et, ainsi, à réduire l'utilisation des pesticides.

Plus récemment, plusieurs projets ont été lancés afin de prendre en compte les effets des systèmes agricoles sur la biodiversité. Dans le cadre d'un projet Interreg et d'une collaboration avec l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), le post-doc d'Abdelhak Rouabah (2022-2023) et la thèse de Camille Gay (2021-2024) visent à développer un modèle simulant les relations entre paysage, systèmes agricoles et plusieurs groupes de pollinisateurs. L'ambition est d'intégrer dans Maelia des modèles permettant d'évaluer l'abondance et la diversité des pollinisateurs, à la fois enjeux de conservation de la diversité animale et puissants déterminants de la diversité végétale sauvage. Enfin, en collaboration avec la Tour du Valat, la thèse de Rose Rodier a été lancée fin 2022 pour modéliser et simuler, *via* Maelia, les relations entre agriculture, gestion de l'eau, changement climatique, services écosystémiques et biodiversité (oiseaux et poissons) en Camargue.

Résilience et analyse de cycle de vie territorialisée

La thèse de Manon Dardonville (2018-2021) a permis la réalisation d'un état de l'art des méthodes d'évaluation de la résilience, vulnérabilité ou robustesse des systèmes agricoles et de développer des méthodes d'évaluation de celles-ci. Ces méthodes ont été intégrées dans Maelia et sont actuellement appliquées pour évaluer la résilience des services écosystémiques et des performances socio-économiques des systèmes culture-élevage face aux changements climatiques. En parallèle, une collaboration a été lancée avec Éléonore Loiseau (UMR Itap) pour intégrer dans Maelia des indicateurs de cycle de vie et ainsi positionner cette plateforme dans le champ de l'ACVT spatialisée.

Systèmes de bioéconomie territorialisés et neutralité carbone

Dans le cadre du PEI Partage, coordonné par la chambre régionale d'agriculture du Grand Est, le modèle de fonctionnement de méthaniseur Sys-metha (Bareha *et al.*, 2021) a été intégré dans Maelia et appliqué sur différents cas d'étude en région Grand Est. Maelia est ainsi l'un des rares outils permettant de conduire une évaluation intégrée des projets de méthanisation agricole représentant la dynamique et les interactions entre des systèmes agricoles et un méthaniseur¹⁶. En complément, en collaboration avec l'Andra, un projet est en cours pour évaluer des scénarios de bioéconomie territoriale sur le territoire de l'Observatoire permanent de l'environnement (site de Cigeos). Le projet Legumetha (2023-2025), financé par GRDE, vise à explorer le potentiel du déploiement combiné de légumineuses et de la méthanisation pour améliorer l'autonomie azotée des exploitations et leur bilan carbone.

Enfin, le projet Slam-B¹⁷ (6,5 millions d'euros [M€], 2023-2028), du PEPR FairCarboN, vise à amplifier les fonctionnalités de Maelia pour en faire un outil opérationnel et générique d'évaluation de scénarios de stratégies bas carbone et de bioéconomie

16. Cf. <https://www.inrae.fr/actualites/methanisation-au-coeur-territoires>.

17. Scenarios Labs and integrated Assessment Modelling for Bioeconomy development (projet ciblé n° 2 du PEPR FairCarboN).

territoriale. Dans ce projet, Maelia sera appliquée dans 6 *living labs* situés en France métropolitaine (collaboration avec le CNRS), sur l'île de La Réunion (Cirad) et en Afrique de l'Ouest (IRD et Cirad). Ce projet ambitieux, qui implique plus de 40 unités de recherche et une centaine de scientifiques permanents, donnera l'occasion d'intégrer dans Maelia des modèles de bioraffineries, d'élevages, de démographie, croissance et gestion des forêts, de métabolisme urbain et des indicateurs des performances socio-économique des filières... Ce projet permettra aussi de développer une version de Maelia appliquée à l'échelle de la France entière afin d'offrir, à des acteurs comme l'Ademe, un outil pour la planification de l'agriculture et de la bioéconomie à cette échelle. Le projet Slam-B vise donc une très importante montée en généralité de Maelia vis-à-vis des enjeux de la bioéconomie territoriale pour ainsi positionner cette plateforme comme un outil incontournable en la matière, en France et à l'international. Slam-B mobilisera de nombreux post-docs et doctorants.

► Maelia, fédérer la recherche et accompagner les acteurs de l'agriculture et de la bioéconomie

Considérant la multiplication des partenaires impliqués dans la dynamique Maelia, un « club des contributeurs au développement de Maelia » a été créé en 2016. Son objectif est de faciliter le partage de connaissances sur les avancées de Maelia et la mise en réseau et l'émergence de nouvelles collaborations entre les membres des différents projets. Composé de 15 personnes de 10 organisations académiques et non académiques en 2016, le club comprend aujourd'hui plus de 60 personnes d'une trentaine d'organisations¹⁸. Il a vocation à fortement s'élargir avec le démarrage du projet Slam-B (voir ci-avant).

En parallèle de la montée en puissance des activités de recherche, dès 2014 dans le domaine de l'eau, mais particulièrement à partir de 2018 dans différents domaines, les demandes d'application ou d'utilisation de Maelia émanant d'une diversité d'acteurs publics ou privés sont devenues récurrentes et de plus en plus prégnantes. Pour faire face à cette demande croissante d'utilisation de la plateforme qui ne relevait plus des activités de la sphère académique, sur conseil de l'Ademe, la start-up Maelab¹⁹ a été créée en juillet 2021. Elle est en charge du déploiement de Maelia dans la sphère économique mais aussi de l'appui aux projets de recherche fondés sur l'utilisation de la plateforme.

► Spécificités de la plateforme Maelia

La plateforme Maelia est actuellement une des très rares plateformes de modélisation permettant de simuler finement la dynamique spatiotemporelle des systèmes de production et filières de transformation et recyclage des biomasses agricoles en interaction avec les ressources en eau dans un territoire. Alors que les autres plateformes équivalentes ont été développées, par des géographes ou par des économistes, et repré-

18. UMR INRAE : Agir, Absys, Agronomie, Bagape, Dynafor, Ecosys, EEF, Fare, G-EAU, LAE, Lessem, Lisah, Miat, SAD-APT, SAS. Autres recherches : GET, Irit, JRC, Cirad, Tour du Valat, Engées. Autres partenaires : Arvalis, Terres Inovia, Idele, Veolia, CACG, AgroTransfert-R&T, Rittmo, CRA-GE, chambres d'agriculture de France.

19. <https://www.maelab.fr/>

sentent l'espace agricole de manière très grossière, Maelia, dont le développement a été copiloté par des agronomes et informaticiens, offre la possibilité de représenter et de simuler, au pas de temps journalier, les effets des caractéristiques biophysiques et sociotechniques des multiples situations de production (pédoclimats, séquences et conduites des cultures) et des filières de transformation et recyclage des biomasses agricoles sur les ressources en eau et les cycles biogéochimiques au sein des territoires.

Maelia permet d'évaluer le niveau et la résilience d'un large panel de performances environnementales et socio-économiques des exploitations et des filières pour une large gamme de scénarios de changements de systèmes de culture, de filières de transformation et recyclage des biomasses et de modes de gestion des ressources en eau, sous changement climatique.

Maelia mobilise l'intelligence artificielle (SMA) et la science des données pour accompagner les acteurs à planifier les transitions agroécologiques et bioéconomiques adaptées aux spécificités de chaque territoire et aux changements climatiques. Ainsi, Maelia permet de structurer et d'instrumenter la conception et l'évaluation intégrées de scénarios relatifs à l'organisation des filières biomasse dans les territoires, autrement dit le développement d'une bioéconomie territorialisée.

Maelia, au fil du temps, opère comme une plateforme d'intégration des connaissances génériques sur les socio-agro-écosystèmes d'une très large gamme de disciplines, d'une part, et des connaissances locales des acteurs des cas d'étude, d'autre part. Sous « licence libre » (GPLv3), Maelia participe à la dynamique d'*open science* d'INRAE.

► Maelia pour accompagner des démarches de prospective territoriale

La plateforme Maelia a été développée pour équiper les démarches de prospective, fondées sur le développement de scénarios exploratoires, en vue d'identifier une ou des organisations territoriales répondant aux objectifs locaux et globaux des acteurs des territoires.

Dans cette logique, elle est de plus en plus utilisée pour répondre aux demandes de collectivités territoriales (Région, Intercommunalités...), chambres d'agriculture, agences et services de l'État (Ademe, agence de l'eau, OFB, Draff, Dréal...) ou coopératives pour traiter de questions relatives à l'organisation territoriales des activités agricoles et des filières de bioéconomie dans un contexte de changement climatique. Elle sera aussi utilisée, dès 2025, pour accompagner les acteurs de la région Bourgogne-Franche-Comté dans leur exercice de planification écologique de l'agriculture et la bioéconomie. Au-delà de l'accompagnement des acteurs régionaux, cet exercice est conçu comme une opération de démonstration (*proof of concept*) de ce que peut apporter ce type de plateforme de modélisation et évaluation intégrées pour la planification écologique des filières biomasse en France.

Évaluer la multifonctionnalité des élevages au pâturage au sein des territoires : exemples du Sahel et de l'Asie du Sud-Est

*Alexandre Ickowicz, Mélanie Blanchard, Vincent Blanfort,
Jean-Daniel Cesaro, Christian Corniaux, Arona Diaw, Bernard Hubert,
Jacques Lasseur, Huyen Le Thi Thanh, Jean-Pierre Müller, Liz Wedderburn*

► Introduction

Les systèmes d'élevage pâturants (SEP) sont des systèmes dans lesquels 90 % de l'alimentation des ruminants est composée de fourrage pâturé issus de prairies naturelles ou cultivées selon la FAO et l'Institut international de recherche sur l'élevage – Ilri – (Robinson *et al.*, 2011). Les SEP jouent un rôle important pour la production animale puisqu'ils concernent 39 % des effectifs mondiaux de ruminants domestiques et 30 % des protéines d'origine animale (Mottet *et al.*, 2017; Mottet *et al.*, 2018). Un milliard et demi d'hectares de terres habituellement impropres à la culture en raison de la faiblesse des précipitations, de la fertilité des sols et de la topographie sont utilisés par les SEP, soit 54 % de la surface terrestre totale. Une grande partie de ces terres (28 millions de kilomètres carrés) se trouve dans des zones désertiques ou dans des zones arbustives xériques marginales (Ilri *et al.*, 2021). La plupart de ces SEP dépendent à la fois de la mobilité des animaux et des personnes car ils tirent parti de la variabilité spatiale et temporelle de la production fourragère tout au long de l'année (systèmes socio-écologiques). Ces systèmes mobiles s'appuient sur des ressources et processus naturels, par exemple : le fourrage présent, les ressources en eau, le fumier du bétail et l'important capital humain associé. La forte empreinte foncière des SEP et la gestion du cheptel associé ont un impact sur la dynamique de l'écosystème, qui se traduit par une diversité de fonctions pour l'environnement et pour le bien-être humain à différentes échelles et dans diverses dimensions (production, économie, culture, environnement, développement local, etc.). Ces fonctions ne sont pas toujours prises en compte lors de l'évaluation de l'impact des SEP, bien que des tentatives d'adoption d'une approche globale de ces systèmes aient été entreprises en utilisant le cadre des « services écosystémiques » (Huang *et al.*, 2015). Cette sous-estimation des diverses fonctions et notamment des impacts positifs des SEP au sein des trois dimensions de la durabilité mène à des politiques foncières (accès aux ressources), économiques (chaines de valeurs, infrastructures), environnementales (climat, gestion de l'eau, biodiversité) et sociales (fournitures de services) défavorables au développement de ces systèmes d'élevage. Les nombreux débats qui ont eu lieu lors du Sommet des Nations unies sur les systèmes alimentaires en 2021 ont confirmé

que les systèmes alimentaires sont désormais un enjeu mondial et que les modèles d'élevage des pays industrialisés ne peuvent pas représenter les seules solutions pour le reste du monde. Dans cet article, nous considérons les SEP, abordés ici dans une définition plus large que celle de la FAO, dans le cadre conceptuel de la multifonctionnalité qui met au jour les nombreuses fonctions issues des SEP, et nous documentons les résultats de son application à deux situations au Vietnam et au Sénégal. L'hypothèse est que les multiples fonctions des SEP décrites ici sont nécessaires à une évaluation plus juste et équilibrée de la contribution de ces systèmes d'élevage à des systèmes alimentaires durables et permettent d'intégrer les SEP dans des scénarios prospectifs plus équilibrés pour un secteur de l'élevage plus durable.

► Pourquoi appliquer le concept de multifonctionnalité aux systèmes d'élevage pâturants ?

Les méthodes actuelles d'évaluation des différentes fonctions des SEP simplifient et sous-estiment leur impact, et sont limitées dans leur capacité à prendre en compte simultanément de multiples dimensions imbriquées et en interaction. Nous avons posé l'hypothèse que l'utilisation du concept de « multifonctionnalité de l'agriculture » qui a été développé au cours des années 1990 (Cnued, 1992; Hervieu, 2002a et 2002b; Caron *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2015) est une méthode destinée à réaliser une évaluation plus exhaustive des différentes fonctions des SEP et à exprimer les compromis potentiels entre ces fonctions en renforçant les capacités des acteurs impliqués à envisager des futurs souhaitables pour l'activité d'élevage au sein des territoires. Grâce à cette approche méthodologique de la multifonctionnalité (MF), nous cherchons à montrer que les SEP ont un rôle important à jouer dans le développement de systèmes alimentaires durables dans le monde. La MF prend en compte la diversité des fonctions nécessaires à l'évaluation des impacts de l'agriculture aux niveaux local, régional et international, notamment les performances de production, l'économie (emploi, développement des infrastructures et des services, flux financiers, etc.), l'environnement (gestion des paysages, émissions de GES, fertilité des sols, biodiversité et flux de nutriments, etc.). En raison de leur large empreinte terrestre, de l'échelle locale à l'échelle mondiale, les SEP ont un impact important sur la dynamique des écosystèmes (biodiversité, cycle des nutriments, dégradation des terres, etc.) et sur le changement climatique (émissions de GES, séquestration du carbone) (Steinfeld *et al.*, 2006). Les SEP soutiennent également des groupes sociaux et des populations importantes dans le monde entier (Ilri *et al.*, 2021), fournissant des revenus, des moyens de subsistance et des biens sociaux et culturels.

À cet égard, le cadre MF a été adopté par le réseau d'action « Restaurer la valeur des pâturages » établi dans le cadre du Global Agenda for Sustainable Livestock (Gasl), une plateforme mondiale multipartite (<https://www.fao.org/partnerships/livestock-dialogue>). Ce cadre MF constitue une approche pertinente à utiliser avec de multiples parties prenantes pour décrire, évaluer, discuter et promouvoir les différentes fonctions assurées par les SEP. Ce cadre MF s'inscrit parfaitement dans le cadre global des objectifs de développement durable (ODD) proposé par le programme Onu 2030, car les multiples fonctions des SEP sont liées à au moins 8 ODD sur les 17 existants (1 : pas de pauvreté, 2 : faim zéro, 5 : égalité des sexes, 6 : eau propre, 8 : travail décent et croissance économique, 12 : consommation et production durables, 13 : action climatique, 15 : vie sur Terre). Enfin, compte tenu de la contribution des SEP en regard des enjeux

émergents d'élaboration de systèmes alimentaires durables (SAD), tels que débattus lors de la conférence des Nations unies de septembre 2021, le cadre MF permet de caractériser des fonctions cruciales relatives aux grands principes soutenant les SAD : disponibilité des aliments, facilité d'accès à la nourriture, sécurité alimentaire, qualité des aliments et respect de l'environnement.

► Construction d'un modèle conceptuel de multifonctionnalité pour soutenir la dynamique des systèmes d'élevage pâturants locaux

Une approche de modélisation participative multipartite a été développée pour intégrer une grande diversité de contextes et perceptions à un cadre commun d'analyse de la diversité des contextes mondiaux des SEP (Ickowicz *et al.*, 2022).

Parmi les participants figuraient des chercheurs issus de disciplines diverses liées aux SEP et provenant de sept pays différents (Argentine, Brésil, France, Mongolie, Sénégal, Nouvelle-Zélande, Vietnam), ainsi que des entreprises du secteur de l'agroalimentaire, des agriculteurs et des responsables politiques. Une approche itérative a été appliquée pour assurer la robustesse du cadre, consistant en : (i) une revue de la littérature qui a créé la plateforme de base pour la construction du modèle conceptuel lors du premier atelier (mai 2016); (ii) celle-ci a été suivie d'entretiens avec dix agriculteurs français, puis avec des parties prenantes locales sur les sites de cinq pays différents (iii); deux autres ateliers (juillet 2016, décembre 2017) avec plusieurs experts des parcours se sont concentrés sur la clarification des définitions, sur les discussions sur la structure du modèle conceptuel et sur le test de sa robustesse par rapport à un ensemble d'indicateurs définis pour évaluer l'impact de l'élevage dans différentes dimensions. Le modèle conceptuel (MC) de la multifonctionnalité des SEP qui en résulte se compose de quatre dimensions (productive, sociale, développement local et environnementale) au sein desquelles opèrent des entités (agriculteurs, troupeaux, pâturages, produits, atmosphère, eau, infrastructures, organisations, etc.) à travers des processus (commerce, alimentation, production, consommation, construction, gain, etc.) qui sont décrits à l'aide du langage UML avec leurs indicateurs associés (figure 8.1 et indicateurs décrits dans les études de cas et le tableau 8.1).

La construction du MC permet d'explorer non seulement les fonctions au sein de chacune des dimensions mais aussi les interactions entre les dimensions et entre les fonctions. Par conséquent, le modèle permet aux utilisateurs d'explorer comment les changements de comportement de l'une des entités influencent les interactions au sein et entre les dimensions et les fonctions. Par exemple, l'entité « Bétail » (figure 8.1) contribue aux quatre dimensions mais est responsable de fonctions distinctes : production de lait, émission de GES, génération de revenus, fourniture de biens culturels. Lorsqu'un changement est apporté à la gestion du bétail, les fonctions liées à l'entité bétail sont modifiées. Ce processus permet d'analyser les interactions entre les fonctions à travers les dimensions considérées. Le même processus peut être décrit pour des entités comme « Agriculteur ». Cela permet ensuite à l'utilisateur du MC d'identifier les différents résultats et de rendre transparents les compromis qui en résultent et qui doivent être explorés. À partir de 2017, le MC a été appliqué à diverses études de cas, documentées ci-dessous. L'application du MC sur le terrain a permis aussi d'améliorer le modèle.

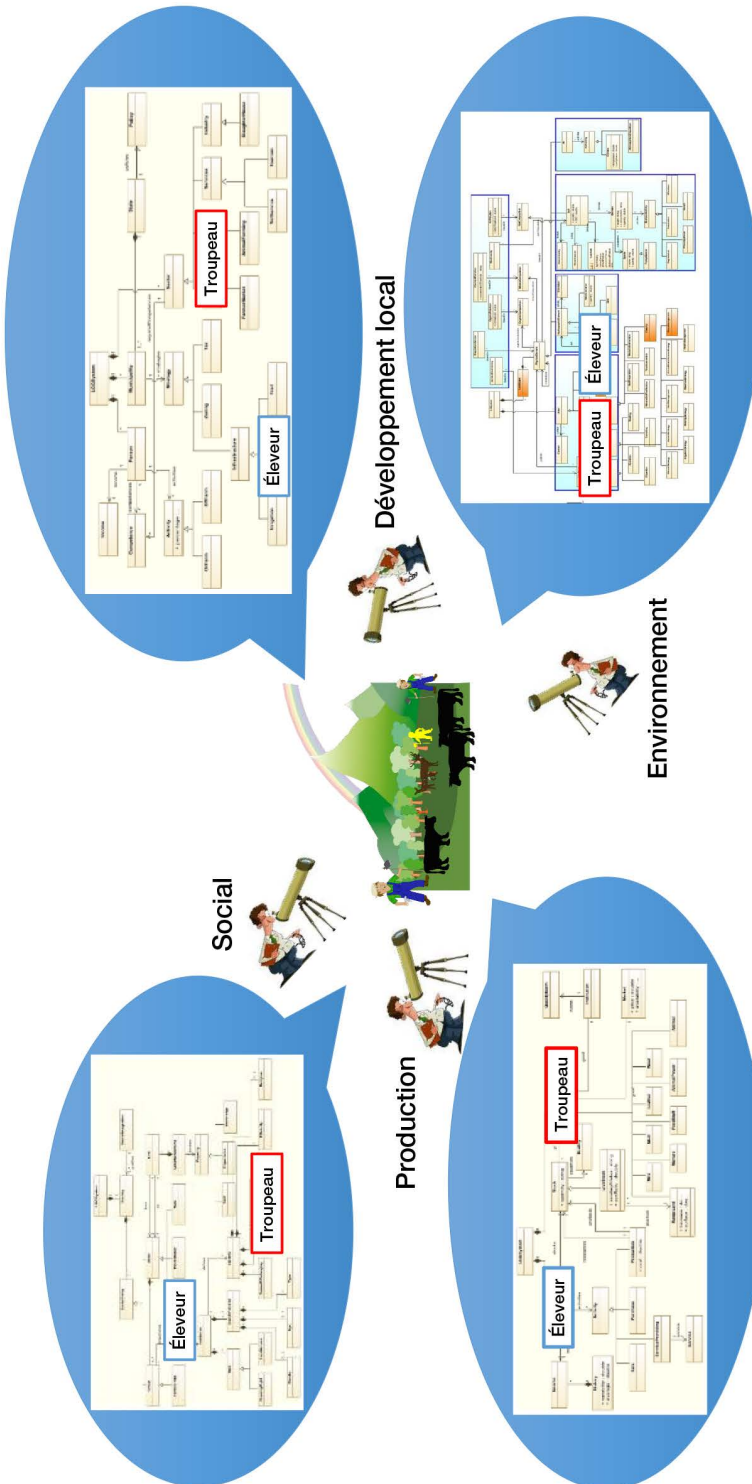


Figure 8.1. Construction d'un modèle conceptuel de multifonctionnalité pour les systèmes d'élevage pâturants organisé en quatre dimensions comprenant des entités, des processus et des indicateurs (source : Ickowicz *et al.*, 2022).

Tableau 8.1. Diversité de contextes, de problématiques et de résultats auxquels l'approche multifonctionnalité de l'élevage au pâturage a été appliquée au sein du réseau Gasl « Restoring value to grassland » (Ickowicz *et al.*, 2022).

Cas	Utilité de l'approche multifonctionnelle (MF)
Argentine, Puna	La résilience et la capacité d'adaptation des éleveurs Puna au niveau des ménages et de la communauté ont pu être explorées par l'application des quatre dimensions. La mise en œuvre réussie de l'approche a mobilisé une équipe multidisciplinaire, ce qui n'était pas la norme dans ce contexte, renforçant ainsi la capacité à aborder des questions socio-écologiques aussi complexes.
Brésil, Maranhao	L'exposition d'une série d'acteurs, notamment des étudiants, des agriculteurs et des entreprises agroalimentaires, à l'analyse holistique du système sylvopastoral à l'aide de l'approche MF a eu un impact positif sur l'adoption de pratiques agroécologiques par les agriculteurs. Les étudiants ont acquis une meilleure compréhension de la complexité du système et de son fonctionnement.
Sénégal, Ferlo	La construction et l'utilisation d'un modèle de simulation fondé sur l'approche MF ont contribué à faciliter le dialogue entre les parties prenantes afin de trouver des solutions pour partager les ressources et trouver des synergies entre les acteurs.
Mongolie, Bulgan	Le développement d'indicateurs locaux était essentiel pour garantir la pertinence de l'approche de la MF. Dans ce cas, les quatre dimensions n'étaient pas équivalentes, l'accent étant mis sur les aspects sociaux et environnementaux. L'approche a été appréciée par les planificateurs pour aider au développement de la politique.
Vietnam, Dien Bien	Le cadre de la MF a facilité le dialogue entre les acteurs sur la base d'indicateurs communs montrant la complémentarité des différents systèmes agricoles en vue du développement durable du territoire et de la réalisation de l'objectif d'approvisionnement alimentaire de la population.
Chine, Tibet	L'approche MF a montré que les prairies de Kobresia sont un paysage culturel où la nature et la société interagissent aujourd'hui au profit de l'environnement et du bien-être des personnes.
France, Paca	L'approche MF permet d'identifier les principales dimensions pertinentes des SEP mises en question par les acteurs locaux pour contribuer à la durabilité du socio-écosystème local et elle favorise l'émergence d'un dispositif local pour établir le dialogue et permettre l'identification des leviers pour favoriser la coévolution des divers systèmes à moyen terme.

» Illustration de l'application de l'approche multifonctionnalité de l'élevage à deux études de cas au Vietnam et au Sénégal

Les cas documentés ci-dessous illustrent, parmi d'autres cas étudiés dans le cadre de notre réseau GASL « Restoring value to grassland », la manière dont le cadre de multifonctionnalité a été appliqué avec différents outils et méthodologies à une diversité de contextes et de questions concernant le développement durable des SEP à travers le monde.

Système agropastoral à orientation laitière au nord du Sénégal : penser la multifonctionnalité de la production laitière en milieu semi-aride

Contexte

La production laitière au Sénégal repose principalement sur des systèmes pastoraux (Corniaux *et al.*, 2012). Cependant, cette production est trop saisonnière et dispersée

pour assurer un approvisionnement significatif des industries laitières. Elle est donc très peu collectée par les industries locales, qui préfèrent pour la plupart utiliser de la poudre de lait importée, notamment en raison du manque de compétitivité du lait local, qui reste une matière première onéreuse. Au nord du Sénégal, le département de Dagana connaît une dynamique de la filière lait local en raison du développement, depuis 2007, d'une laiterie industrielle qui utilise le lait local (Bourgoin *et al.*, 2018). Cette entreprise est confrontée à des aléas saisonniers et à une forte variabilité inter-annuelle de la production. La plateforme d'innovation lait de Dagana (PIL), créée fin 2014, réunit l'ensemble des acteurs impliqués dans la chaîne de valeur du lait local (éleveurs, agriculteurs, collecteurs, transformateurs, ONG, institutions publiques) pour travailler sur des scénarios de développement de la filière. Depuis 2018, une réflexion est menée sur les moyens d'intensifier écologiquement la production laitière en s'appuyant sur les ressources agricoles et naturelles locales. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre le potentiel local de production laitière en adoptant une posture d'analyse de la multifonctionnalité de cette filière fondée sur le système pastoral sahélien.

Matériel et méthodes

À partir du modèle conceptuel MF, ce travail a consisté à coconstruire avec les acteurs de la PIL un simulateur informatique capable de modéliser des paramètres zootechniques, écologiques, agricoles, socio-économiques et géographiques (Delay *et al.*, 2021). Ce modèle reproduit les conditions de production des éleveurs de la bande sahélienne vivant à proximité (rayon de 50-60 km) du fleuve Sénégal qui irrigue l'agriculture intensive sur ses berges. Des ateliers ont permis aux acteurs de formuler différentes hypothèses sur l'organisation de la filière et de discuter des contraintes de chaque type d'acteur. Un premier atelier largement ouvert en termes d'audience a porté sur le rôle des flux de biomasse dans la durabilité des systèmes laitiers pastoraux. Un second atelier a porté sur l'organisation du système de collecte du lait avec les acteurs locaux afin d'atteindre une plus grande efficacité et une plus grande inclusion sociale.

Résultats

Le potentiel laitier du bassin laitier de Richard-Toll a été estimé à des volumes de 2000 à 10 000 litres/jour selon différentes saisons et trois niveaux de productivité : pastoral pur, pastoral intensifié et pastoral intensifié avec stabulation (Cesaro *et al.*, 2020). Lors des discussions en atelier, les acteurs ont considéré que ces potentiels estimés étaient crédibles car suffisamment proches de la réalité du terrain (collecte variant entre 3 500 et 9 500 litres/jour entre 2018 et 2021), en tenant compte des ressources fourragères locales. À cet effet, l'objectif d'exploiter efficacement et durablement le potentiel laitier nécessite une coopération entre les acteurs de plusieurs filières (riz, canne à sucre et lait). Néanmoins, les règles d'accès aux sous-produits agricoles par les éleveurs doivent être discutées entre les acteurs pour permettre la circulation de la biomasse à l'échelle du territoire. Le scénario maximal estime le flux de matière à 4 000 tonnes de fourrage sec (pailles de riz et canne à sucre) et 2 000 tonnes de sous-produits agricoles (son de riz). Par ailleurs, l'intensification laitière peut également induire une équité dans l'allocation des ressources naturelles et économiques entre les groupes d'éleveurs et avoir aussi des conséquences sociales (concentration des ressources) et environnementales (concentration des troupeaux et donc des effluents produits et de la pression de pâturage). Les exploitations pastorales intensifiées produisent entre 3 et 4 fois plus

de lait qu'un système pastoral traditionnel mais nécessitent 8 fois plus d'intrants. La prolificité des bovins est également 3 fois plus élevée dans les exploitations pastorales intensifiées que dans les exploitations traditionnelles. Cette nouvelle répartition peut accroître la différenciation entre les éleveurs vivant à proximité des zones agricoles et ceux vivant dans les zones sylvopastorales. Plusieurs indicateurs permettant d'évaluer l'impact des différents scénarios de développement de la filière lait ont été identifiés dans les quatre dimensions lors d'ateliers de travail réunissant les différents acteurs. La figure 8.2 présente ces différents indicateurs dont la plupart, notamment dans les dimensions environnementales et sociales, restent à élaborer plus précisément sur le terrain (résilience des ménages, sécurité alimentaire, flux de nutriments et de GES, etc.).

Conclusion

L'utilisation du concept de multifonctionnalité (Ickowicz *et al.*, 2018) au cours des ateliers de simulation a permis aux acteurs de voir quels niveaux d'interdépendance doivent être considérés pour réaliser des scénarios d'intensification laitière durables et de mieux appréhender et comprendre les points de vue des autres acteurs du territoire et les compromis à rechercher. Le modèle conceptuel et de simulation a permis ici de mettre à l'épreuve des acteurs et des différents indicateurs choisis des options techniques d'intensification proposées en amont par les techniciens en élevage (type de fermes, gestion des biomasses, alimentation du bétail). Une entrée prioritaire discutée entre acteurs a porté sur les flux de biomasse en lien avec l'alimentation du bétail mais d'autres indicateurs sociaux et environnementaux ont ensuite été ajoutés aux préoccupations des différents acteurs. Les dimensions environnementales notamment liées au changement climatique ont été davantage portées par les agro-industries soucieuses de leur impact et image (utilisation d'énergie renouvelable comme la biomasse, bilan carbone), les dimensions socio-économiques (sécurité alimentaire, revenus, emplois) étant davantage portées par les éleveurs. Cela conduisant à trouver des compromis, notamment sur l'utilisation des biomasses résiduelles des agro-industries, par exemple.

Le système d'élevage pâturant des montagnes du nord-ouest du Vietnam comme option durable pour le développement local

Contexte

Dans les montagnes du nord-ouest du Vietnam, les petites exploitations d'élevage dépendent largement des pâturages naturels pour l'alimentation des animaux (bovins, buffles). Cependant, les systèmes d'élevage pâturants (SEP) sont considérés comme insuffisamment productifs pour répondre à l'augmentation de la consommation nationale de viande, pour réduire la dépendance aux importations et pour fournir un revenu suffisant aux acteurs de la chaîne de valeur afin de contribuer à la réduction de la pauvreté. L'élevage est en compétition pour l'espace et les ressources avec d'autres activités économiques (plantations fruitières et forestières) ou la conservation de l'environnement (protection des forêts). Ces systèmes restent donc faiblement soutenus par les collectivités locales, et ne sont pas pris en compte dans les stratégies de développement de l'élevage. Reconsidérer les multiples fonctions à l'échelle du paysage des élevages pâturants en montagne pourrait modifier l'évaluation de leur rôle dans les stratégies de développement durable local en modifiant la perception par les différents acteurs du territoire de l'impact de l'élevage.

Matériel et méthodes

Cette étude a quantifié les contributions multiples des SEP au développement durable des exploitations et des territoires à partir de l'exemple des exploitations d'élevage de la commune de Quai Nua dans la province de Dien Bien. Dans cette commune montagnaise, des systèmes de pâturage extensif coexistent avec des systèmes d'élevage en voie d'intensification à partir de systèmes d'alimentation à l'auge, de production de fourrage et d'engraissement. L'approche a consisté à identifier les indicateurs du cadre de multifonctionnalité dans les quatre dimensions couvrant le troupeau, la ferme, la communauté et le paysage, mais aussi les services et la chaîne de valeur (figure 8.2). Les indicateurs ont été identifiés et utilisés lors de discussions sur la contribution des SEP au développement durable avec une diversité d'acteurs locaux (éleveurs, personnel de vulgarisation agricole, représentants de la coopérative d'élevage, acteurs de la chaîne de valeur de la viande bovine).

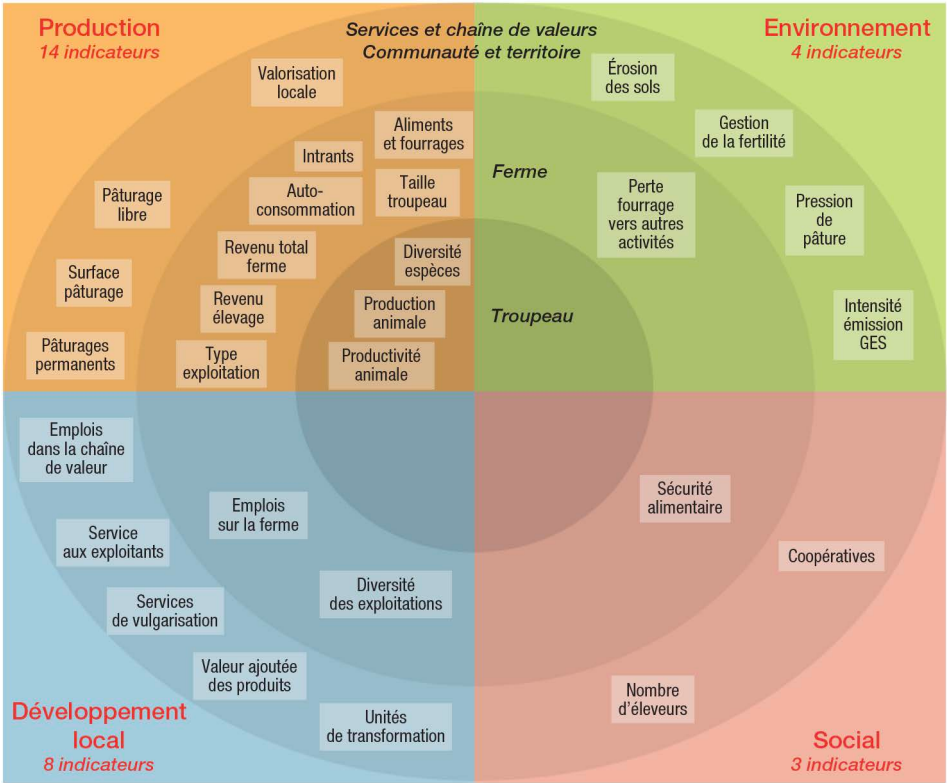


Figure 8.2. Définition participative et multi-acteur des indicateurs à trois échelles (territoire, ferme, troupeau) pour analyser la multifonctionnalité des systèmes d'élevage dans la commune de Quai Nua au Vietnam.

Résultats

Cette étude a produit des références sur la contribution des SEP au développement durable dans la commune de Quai Nua. En ce qui concerne la *dimension de production*, les systèmes pâturants produisent environ 49 % des bovins et environ 48 % de la

viande bovine intégrée dans la chaîne de valeur (viande fraîche, farine et viande séchée typique de cette région). En ce qui concerne la *dimension environnementale*, les SEP soutiennent la fertilité organique du sol et la productivité des systèmes de culture grâce à la fourniture d'environ 18 % du fumier produit au niveau communal. Le reste est fourni par la stabulation permanente du bétail. La contribution de ces systèmes à la gestion du paysage n'a pas encore pu être évaluée. Les SEP contribuent au *développement local* avec 11 % des bénéfices des acteurs de la chaîne de valeur de la viande bovine (collecteur, abatteur, restaurant et transformateur). Les autres profits proviennent des systèmes d'élevage plus intensifs et des monogastriques, et 66 % des travailleurs agricoles sont directement liés à ces systèmes. Cependant, bien que les consommateurs montrent une préférence pour la viande issue des SEP, les produits de ces systèmes n'ont pas été commercialisés de manière différenciée. L'utilisation du cadre MF a permis d'identifier différents points de vue. Les éleveurs attachent de l'importance aux revenus et à la production à faible niveau d'intrants. *Concernant la dimension sociale* de ces systèmes, les éleveurs soulignent l'importance des liens sociaux qui existent entre ceux qui pratiquent le pâturage (partage du temps pour surveiller les animaux au pâturage). Enfin, outre la fonction d'épargne bancaire (en vue d'accidents potentiels ou d'événements prévus), ces troupeaux permettent également de subvenir aux besoins lors d'événements sociaux (mariages, funérailles, etc.). Les agents de vulgarisation agricole expliquent que les SEP contribuent aux moyens de subsistance et au niveau de vie de la population, en offrant des emplois dans une région qui manque d'opportunités de travail. Bien que ces systèmes contribuent clairement à la réduction de la pauvreté, les autres acteurs de la chaîne de valeur viande bovine se concentrent principalement sur les fonctions de production de viande et de produits de qualité.

Conclusion

Ces discussions mettent en évidence toute la complémentarité, décrite par les acteurs du territoire, des contributions des systèmes d'élevage pâturants à la production et à l'économie, mais aussi à la dimension sociale et au développement local de la province. Les pâturages, essentiels pour l'alimentation animale, contribuent de manière significative à la production de viande, à la création d'emplois, aux revenus, aux bénéfices tout au long de la chaîne de valeur viande bovine ainsi qu'à la valorisation des ressources naturelles du territoire. Pour décrire, partager, co-construire cette vision intégrée de l'élevage au sein du territoire, il apparaît nécessaire de développer une approche prospective structurée et explicite sur la durabilité de la gestion des pâturages et sa contribution au développement durable des territoires en interaction avec d'autres activités parfois plus rémunératrices et économiquement visibles.

► Analyse transversale de la multifonctionnalité

La possibilité d'appliquer le cadre commun de la multifonctionnalité à un éventail international de contextes variés a montré la puissance de l'approche. Le tableau 8.1 résume les cas et la diversité des contextes et des problématiques abordées sur lesquels le réseau a développé cette approche et dont les cas Sénégal et Vietnam font partie.

La création d'un espace de dialogue et d'un processus permettant aux multiples parties prenantes d'entendre, de répondre et de décider. Dans tous les cas d'étude, le cadre de la MF a fourni un langage et un forum communs pour rendre explicites les visions

du monde des différentes parties prenantes et leur permettre ainsi de parvenir à une compréhension commune des enjeux, des perspectives de l'action publique et de l'adoption de pratiques de gestion concertées. Cela a été facilité par la définition d'indicateurs locaux attribués à chacune des quatre dimensions du cadre conceptuel de la MF pour tenir compte du contexte et des diverses visions du monde des parties prenantes. Afin d'identifier une diversité d'indicateurs, il faut recourir à une série de méthodes qualitatives et quantitatives pour obtenir une base de référence, puis tester l'impact des options d'actions publiques et de gestion des ressources.

Un modèle conceptuel des SEP multifonctionnels applicable à une variété de contextes. Les cas d'étude montrent que le cadre de la MF est opérationnel et pertinent pour une diversité de contextes et de problématiques. Les processus et les outils développés et conçus ont été aussi variés que des ateliers, des brainstormings, des enquêtes, des films participatifs, des processus de recherche-action, des modèles de simulation participative pour analyser et identifier les quatre dimensions, leurs entités et processus, et leurs indicateurs. La signification heuristique de notre approche repose sur le maintien d'une cohérence entre sa pertinence pour chaque étude de cas et sa contribution aux débats mondiaux sur l'élevage face au changement climatique, à l'érosion de la biodiversité, à la sécurité alimentaire et à la réduction de la pauvreté et des inégalités. En effet, s'inspirant du modèle d'intensification des élevages de monogastrique, de nombreux systèmes d'élevage d'herbivores ont été déconnectés des ressources locales en utilisant des aliments industriels pour le bétail, souvent constitués à partir de composants importés, et évalués sur le seul critère de leur efficacité économique. Ces systèmes d'élevage se sont distanciés de leur environnement social et écologique et sont de plus en plus critiqués par leur voisinage ainsi que par les défenseurs de l'environnement ou de la cause animale. De nombreux groupes sociaux ont ainsi perdu le lien avec les animaux domestiques. Notre objectif, en utilisant le cadre de la multifonctionnalité, est d'informer par la science les autres dimensions liées aux systèmes d'élevage pâturants dans une diversité de contextes naturels, sociaux et politiques. La diversité des cas ci-dessus montre aussi que l'intensification est à l'œuvre dans de nombreuses autres parties du monde, générant des tensions entre l'augmentation de la production, la spécialisation des travailleurs, le changement de race animale, la recherche de marchés et la place traditionnelle des animaux dans la famille ou la communauté (comme au Sénégal ou au Vietnam). Les cas argentin, tibétain et mongol illustrent l'importance de ces liens sur lesquels reposent la dimension sociale et le fait que seuls des changements légers et prudents peuvent être introduits. En revanche, lorsque des changements ont déjà eu lieu, comme au Brésil et en France, les acteurs cherchent de nouveaux arrangements entre l'élevage et leur environnement humain et écologique. Le cadre multifonctionnel permet ainsi de comprendre la complexité de chaque situation et ce qui la rend capable de changer, en mobilisant les mêmes leviers mais différemment. Il nous permet de dépasser le fait que chaque situation est différente, certes elles le sont, mais en respectant un cadre commun qui représente l'essence de l'élevage dans le monde entier.

Soutenir la durabilité à différentes échelles. Le cadre de la MF a également montré sa robustesse lorsqu'il est appliqué à différentes échelles, ferme (Brésil), ménage (Puna), territoire (Tibet, France), région (Mongolie) et secteur économique (Vietnam, Sénégal), et à différents contextes socio-écologiques allant des systèmes communautaires, trans-humains, individuels ainsi que sédentaires. Dans les processus de discussion entre

les parties prenantes, il est apparu clairement que des échelles multiples doivent être gérées et représentées pour construire une compréhension holistique et collective de la durabilité des systèmes et des territoires.

Le cadre de la multifonctionnalité pour articuler les activités dans les territoires. Notre objectif était de construire un cadre conceptuel commun robuste afin de surmonter les singularités de chaque étude de cas et de démontrer le rôle des SEP au-delà de leur fonction de production animale. Il a été confirmé dans des situations aussi contrastées que le SEP n'est pas une activité isolée; le SEP, en raison de sa grande empreinte paysagère, est étroitement lié à une zone spécifique, qui fournit des ressources mais qui est également utilisée par d'autres acteurs. La gestion durable des territoires nécessite d'articuler et de faciliter les synergies entre les activités et les secteurs, afin de concevoir collectivement l'avenir pour lequel le cadre de multifonctionnalité aide à organiser les discussions sur les priorités, sur les interactions et sur les compromis à réaliser.

Gérer les différents points de vue et les compromis. Les études de cas montrent à quel point ces différentes dimensions sont reliées entre elles et quels sont les dilemmes auxquels les divers acteurs doivent faire face pour aboutir à un certain équilibre entre les différentes dimensions. Ce qui apparaît clairement, c'est la multiplicité des fonctions que remplissent les SEP et la manière dont ces fonctions sont intermédiées par l'intervention humaine. Il n'est plus acceptable de se concentrer uniquement sur la productivité ou sur l'environnement lorsque l'on considère ces systèmes, il faut reconnaître, valoriser et respecter ces multiples fonctions et leur interdépendance.

Les multiples fonctions des SEP sont toujours présentes mais fragiles. La diversité des cas analysés montre que, dans la plupart des contextes où les SEP traditionnels sont en place, la diversité des fonctions et indicateurs au sein des quatre dimensions est réellement opérationnelle (figure 8.2) et conforte la viabilité et la durabilité des socio-écosystèmes. Mais il apparaît également que, face aux dynamiques environnementales, économiques et politiques, certaines de ces fonctions peuvent être fragilisées, remettant en question l'avenir durable d'une partie importante de la société locale et même de l'environnement.

► Conclusion

Le cadre de la multifonctionnalité appliqué à une diversité de systèmes d'élevage pâturants a montré, au niveau territorial, l'existence d'interactions fortes et opérationnelles entre la production, les impacts sociaux, environnementaux et de développement local qui soutiennent la durabilité de ces socio-écosystèmes. La mise en avant de la multiplicité des fonctions et de leur imbrication permet d'identifier les politiques et les pratiques à privilégier pour s'assurer qu'elles sont toutes réalisées simultanément et équitablement. Les personnes, leur bien-être et les institutions associées sont au cœur de la réalisation de ces fonctions. En abordant les questions liées à la souveraineté et à la sécurité alimentaire, nous pouvons ainsi adopter une approche holistique, comme le montrent ces cas, qui prennent en compte à la fois la gouvernance foncière, l'accès aux ressources, l'identité culturelle et les moyens de subsistance des habitants des espaces ruraux. C'est un moyen de garantir des systèmes alimentaires durables, incluant des systèmes d'élevage pâturants, bien ancrés dans les territoires grâce à des synergies multisectorielles, fournissant des biens et des services locaux mais orientés vers des chaînes de valeur et des échanges commerciaux qui vont bien au-delà.

Cet aperçu international illustre la diversité des SEP dans différents contextes géographiques, historiques et politiques, mais aussi leur cohérence en tant qu'activité ancestrale de l'*être humain*, fondée sur les interactions des établissements humains avec le monde naturel par la médiation des animaux domestiques. En ce qui concerne les herbivores, cette activité a généré une diversité de races, chacune d'entre elles adaptée à l'environnement dans lequel vivent leurs éleveurs. C'est ce qui leur permet, grâce à de multiples interactions avec leur environnement, d'adapter leurs pratiques à la disponibilité des ressources, à leur diversité et à leur variabilité dans l'espace et dans le temps. Cependant, dans la plupart des pays industrialisés – mais pas seulement –, on constate une forte dynamique d'homogénéisation et de standardisation des conditions d'élevage – donnant la priorité à la production de viande ou de lait, oubliant les autres fonctions de l'élevage. Ces dynamiques sont de plus en plus contestées par des mouvements sociaux (consommateurs, environnementalistes, militants du bien-être animal, etc.). Des alternatives et de nouvelles voies sont recherchées pour dépasser cette vision industrialisée de l'élevage, mais dans un contexte qui a changé. L'application de notre cadre commun de la multifonctionnalité à une diversité de systèmes d'élevage nous a permis de développer un point de vue systémique et dynamique. Le SEP est au cœur des liens entre les sociétés humaines et le monde naturel, ce qui est évident dans les situations traditionnelles comme en Argentine, au Tibet et en Mongolie; il nécessite une gestion attentive lorsque le processus de changement est en cours, comme au Sénégal et au Vietnam, et il doit être reconstruit lorsque la transformation réalisée depuis des années n'est pas considérée comme satisfaisante, comme au Brésil et en France.

Ces différentes situations illustrent que notre cadre conceptuel de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage pâturants permet, grâce à une approche systémique, holistique et intégrative à l'échelle territoriale (ressources, acteurs, activités) et en abordant les différentes dimensions de la durabilité, de proposer un outil pertinent d'analyse des dynamiques d'élevage dans les territoires. Ces analyses peuvent améliorer des diagnostics de dynamiques en cours en complétant les fonctions prises en compte pour plus de durabilité. Ces analyses peuvent aussi, en amont de stratégie de développement territorial, contribuer à alimenter des prospectives territoriales en y incluant explicitement les multiples fonctions des élevages au pâturage et leurs interactions et compromis à considérer en lien avec les autres activités dans les territoires. Les leçons qui ressortent de l'utilisation du cadre de la multifonctionnalité dans l'analyse des SEP dans nos études de cas peuvent être résumées comme suit :

- (i) Les quatre dimensions trouvent un écho chez tous les éleveurs et fournissent une approche inclusive pour une pleine participation de tous les acteurs. Dans le monde réel, les éleveurs ne séparent pas la production et les bénéfices issus des impacts sociaux et environnementaux, ils cherchent à tous les atteindre. L'approche inclusive facilite le développement des interactions sociales, ce qui renforce la résilience des communautés et la durabilité des systèmes agricoles et alimentaires au niveau territorial.
- (ii) Le cadre de la MF permet d'explorer l'ensemble du système et montre l'importance de promouvoir la diversité (espèces d'animaux d'élevage, pratiques et systèmes d'élevage, flore et faune, etc.). Rendre intelligible la complexité du contexte et des situations à la plupart de ceux qui participent au système aide également à trouver des voies d'avenir durables pour les systèmes alimentaires.
- (iii) Le fait de considérer les SEP comme faisant partie de l'écosystème, et non comme des éléments distincts, permet de les intégrer dans les programmes de conservation de

la nature et de la biodiversité. Cela renforce la dimension productive de la biodiversité et les fonctions culturelles qui lui sont liées contribuant ainsi à la durabilité des SEP tout comme des systèmes alimentaires.

– (iv) Des chaînes de valeur innovantes incluant une diversité de systèmes dont des systèmes « traditionnels » et des petites exploitations confortent l'émergence de systèmes alimentaires durables.

– (vi) Les systèmes alimentaires durables ont non seulement besoin de reposer sur la complémentarité de différents systèmes d'élevage mais également de s'appuyer sur les synergies avec d'autres activités d'usage des terres. Ainsi pouvons-nous envisager d'inverser la tendance mondiale à la standardisation et à l'intensification des systèmes d'élevage, et de tirer profit de leçons du Sud, comme illustré dans ce chapitre, pour redéfinir des SEP multifonctionnels et durables, bien intégrés et adaptés à la diversité de nos territoires.

Chapitre 9

Afterres 2050 : de la fabrique de scénarios à leur évaluation

Christian Couturier

► Historique et objectifs du scénario Afterres 2050

Le scénario Afterres 2050 est un scénario de prospective portant sur le « secteur des terres » réalisé par l'association Solagro. Il est largement inspiré du scénario négaWatt²⁰, conçu par l'association éponyme et centré sur l'énergie. Avec le scénario négaMAT, également conçu par l'association négaWatt et qui traite de la question des matériaux et des matières premières, ces trois exercices couvrent la totalité des émissions françaises de GES.

Le périmètre porte sur la France métropolitaine, mais la question des empreintes est considérée à plus large échelle : les importations et exportations de matières premières, incluant la biomasse, sont traduites en empreinte GES émis au-delà du territoire français métropolitain. Bien que centré principalement sur l'agriculture et sur la forêt, le « secteur des terres » couvert par le scénario Afterres 2050 porte sur les productions de biomasse de toutes origines – et sur leur usage : alimentation, matériaux, énergie.

Ces scénarios font l'objet d'une réactualisation régulière. La première édition du scénario négaWatt par exemple date de 2003. Il est depuis remis à jour et publié un an avant chaque élection présidentielle. Le scénario Afterres 2050 a, quant à lui, vu le jour en 2011, une seconde version ayant été publiée en 2016. Une nouvelle actualisation a été réalisée en 2022 à l'occasion de la publication d'un rapport ciblé sur la prise en compte de la biodiversité²¹.

Ces scénarios sont destinés à alimenter le débat public. Ce sont des scénarios normatifs décrivant un possible futur souhaitable, fondé sur un ensemble d'objectifs et de contraintes. La démarche est inspirée par le concept du « donut » popularisé par l'économiste Kate Raworth (Raworth, 2017). Il s'agit de définir un espace sûr et juste pour l'humanité, permettant d'assurer la vie en société (plancher) tout en respectant les différentes limites écologiques (plafond). Les conditions d'une vie en société peuvent être décrites à partir des 17 objectifs de développement durable (ODD) définis par l'Onu, et les plafonds écologiques à partir du concept de limites planétaires.

20. négaWatt, 2022. Le scénario négaWatt 2022 (incluant les éléments du scénario négaMAT)

<https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>

21. Solagro, 2022. Afterres – Biodiversité, <https://afterres2050.solagro.org/2022/11/afterres2050biodiversite/>

Le «secteur des terres» est particulièrement concerné, qu'il s'agisse du climat, de la biodiversité, de l'eau, pour ce qui concerne les limites écologiques. Mais les différentes options mobilisables présentent des scores très variables au regard des différents ODD. Ainsi, le Giec souligne qu'une même option peut présenter un ensemble de notes très élevées comme très basses au regard des ODD. Un exemple concernant différentes options de décarbonation est donné en figure 9.1. Ainsi, un programme de plantation d'arbres destinés à stocker du carbone peut s'effectuer au détriment des conditions de vie des populations locales. Inversement, un programme d'agroforesterie concerté avec les habitants peut générer des co-bénéfices socio-économiques en plus des bénéfices environnementaux.

Le cœur de la problématique du secteur des terres concerne le partage des usages de la biomasse. On trouve régulièrement le concept des 4F dans la littérature scientifique, «*Food, Feed, Fiber, Fuel*», qui explore les tensions et concurrence entre ces quatre grands usages de la biomasse. Nous pouvons y ajouter la «fertilité des sols», qui dépend du niveau de fumure organique, ainsi que la «forêt» dans son sens étymologique (un territoire soustrait à l'usage général, un terrain sur lequel on a prononcé un ban, une proscription de culture, d'habitation) pour les différents services écosystémiques fournis, et également pour exprimer le besoin de la nature pour elle-même. C'est ce concept des 6F qui désigne les concurrences mais aussi les synergies potentielles entre ces usages de la biomasse. Leur répartition actuelle est le fruit d'une organisation socio-économique, l'héritage d'une histoire et d'une culture, et n'est pas intangible. La prospective a pour objet justement de réinterroger ces équilibres et d'explorer de nouvelles répartitions des usages de ces biomasses en réponse aux enjeux d'aujourd'hui.

► Fondements de l'approche

La définition des objectifs s'appuie sur les feuilles de route nationales existantes, par exemple : atteinte de la neutralité carbone d'ici 2050, zéro artificialisation nette, respect des recommandations nutritionnelles, amélioration de la qualité de l'air et de l'eau, restauration de la biodiversité. Ces feuilles de route prennent la forme de lois, de stratégies, d'accords internationaux. D'autres objectifs tiennent compte d'aspirations sociétales qui ne s'expriment pas nécessairement sous ces formes : création d'emplois en régions rurales et équilibre des territoires, bien-être animal, paysage...

La représentation du «secteur des terres», pour employer la phraséologie du Giec, consiste à :

- représenter la demande (alimentaire et non alimentaire) et la production (systèmes de productions agricoles, végétales et animales, et forêt);
- à mettre en adéquation offre et demande;
- à évaluer les résultats obtenus à travers un jeu d'indicateurs.

Le jeu d'équilibrage s'appuie sur une approche «bilantielle» qui consiste à équilibrer les usages et les ressources, dans différentes dimensions. La dimension des «bilans d'approvisionnement» des produits agricoles est d'abord abordée : on équilibre les ressources (productions et importations) et les usages (usages alimentaires et non alimentaires, transformations, usages industriels et exportations). Le bilan d'azote et le bilan fourrager font également l'objet d'une approche bilantielle. Le premier permet de calculer les besoins en apports minéraux, qui sont la variable d'ajustement, et le second permet de vérifier s'il reste un excédent fourrager.

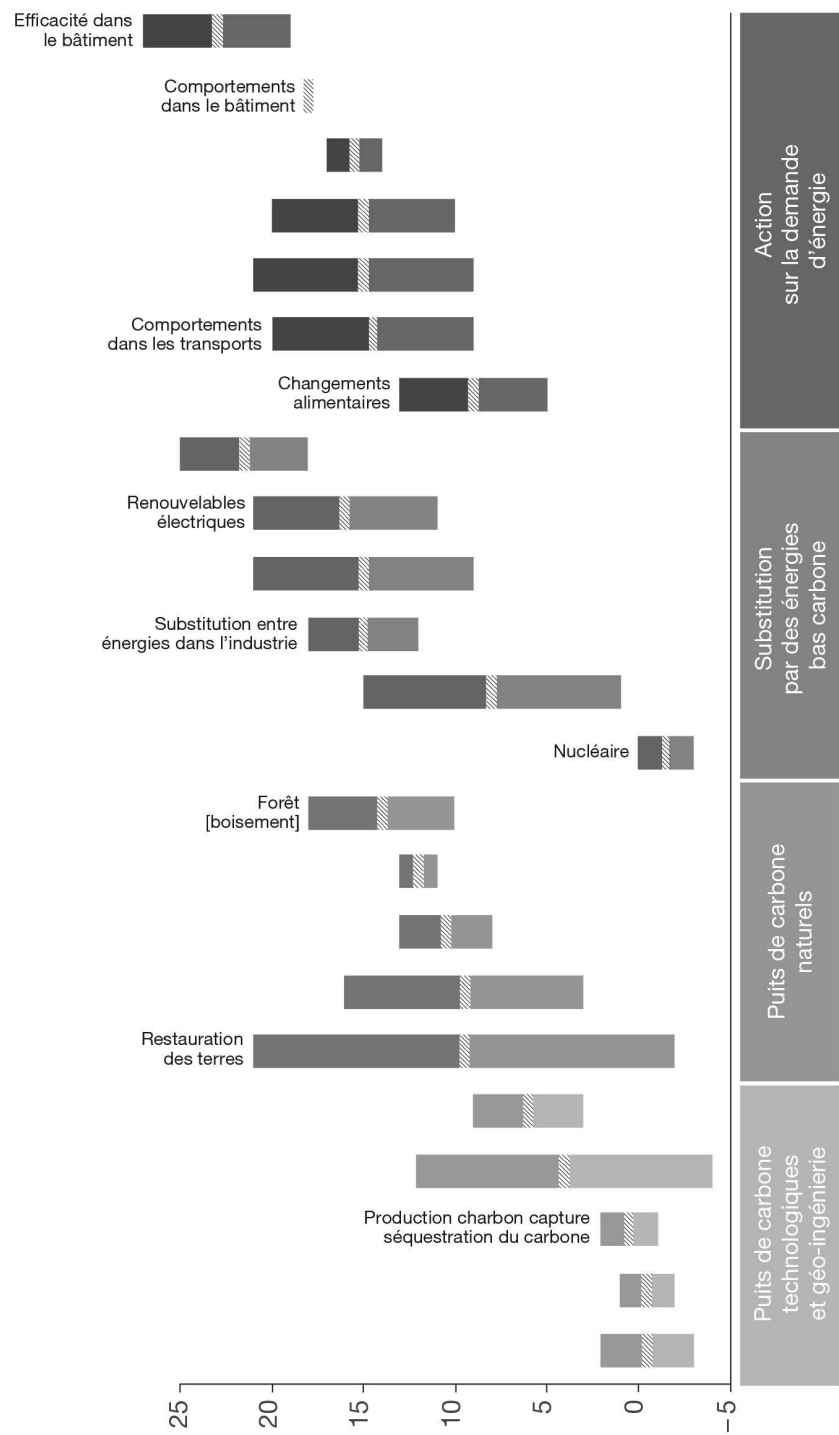


Figure 9.1. « Note ODD » construite par agrégation des notes minimales et maximales attribuées par le Giec (Rapport spécial sur les conséquences planétaires de 1,5°C, 2018) pour chaque ODD pour différentes options de décarbonation. Traitement : association négaWatt (négaWatt, 2022. Rapport complet, partie 4, page 91. <https://www.negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt-2022-rapport-complet-partie4.pdf>).

Le modèle utilisé, MoSUT, développé par Solagro, est un modèle biophysique, fondé sur des notions de masses, de surfaces, de flux d'énergie (voir encadré 6.2 et figure 12.2). La démarche est réursive, puisque la multiplicité des objectifs et des lignes directrices rend l'exercice complexe et qu'il est nécessaire de procéder à de nombreuses révisions pour aboutir à un paysage globalement acceptable par les acteurs concernés.

Enfin, la démarche est à la fois descendante et ascendante. « Descendante » dans la mesure où il s'agit de décliner localement des objectifs macroscopiques, comme typiquement le taux de réduction des émissions de GES, qui n'a de sens qu'à l'échelle mondiale. « Ascendante » dans la mesure où la scénarisation tient compte des caractéristiques du territoire et de la volonté des acteurs. Le résultat d'une telle démarche est la construction d'un scénario négocié entre les acteurs, qui reflète à la fois un niveau de prise de conscience collective des enjeux globaux, et la capacité des acteurs à assumer les orientations ainsi dessinées.

» Exploration du scénario Afterres 2050

L'approche repose sur une description assez fine des systèmes de production, et des trajectoires possibles d'évolution, ces changements étant ensuite extrapolés au niveau régional, puis à la « ferme France ».

En Picardie par exemple, la description à l'échelle des systèmes de production s'appuie sur des « fermes types » sur lesquelles ont été calculés des bilans agronomiques et environnementaux, à l'aide d'outils tels que ACCT (AgriClimateChangeTool) développé par Solagro, et qui permet d'estimer les principaux indicateurs au niveau d'une exploitation agricole. Parmi les systèmes présents, la scénarisation a consisté à imaginer, par exemple, comment pourrait évoluer un système de grande culture en adoptant une série de pratiques agro-écologiques, pour aboutir en 2050 à un système qui garderait sa capacité globale de production, mais en ayant réduit considérablement à la fois les impacts (eau, air, climat) et l'utilisation d'intrants de synthèse (engrais azotés, phytosanitaires) et en produisant de nouveaux services (services écosystémiques, énergie, matériaux). On caractérise ainsi différents systèmes de production, entre un système « conventionnel » actuel et un système futur, symbolisé très schématiquement par « agriculture biologique » ou « production intégrée », avec plusieurs variantes qui se caractérisent principalement par le recours ou non à l'agroforesterie, aux cultures intermédiaires, aux infrastructures agroécologiques et aux cultures associées. Chaque système est caractérisé par un niveau de production (rendement en grains, en résidus de culture, en cultures intermédiaires ou cultures associées, en bois), par un niveau d'intrants (engrais azotés, énergie, phytosanitaires, eau) et par un niveau de stockage de carbone dans le sol et la biomasse.

À l'échelle régionale, le travail de scénarisation consiste ensuite à choisir la proportion de ces différents systèmes, entre conventionnel, biologique et intégré. L'évolution des systèmes passe par une évolution dans les rotations, donc dans les assolements. Dans certains exercices régionaux, un travail d'identification des principaux types de rotation a été réalisé en phase de diagnostic et l'assolement projeté en 2050 cherche à tenir compte de l'évolution de ces principaux types de rotation et en introduit de nouveaux (tableau 9.1). Par exemple, en région de grande culture, dans les scénarios avec une forte proportion d'agriculture biologique mais sans développement de l'élevage, on modélise des rotations avec une part significative de légumineuses fourragères et de protéagineux, en vérifiant que le bilan azoté est cohérent.

Tableau 9.1. Exemple de projection de l'assolement (en milliers d'hectares, kha) de la région Île-de-France en 2050 en fonction du recours à 7 systèmes types en grandes cultures (agriculture biologique [AB] autonome en azote; variante avec importation d'azote; production intégrée [PI], avec ou sans betterave; systèmes conventionnels [conv.] actuels ou améliorés). Le système AB autonome en azote est bâti sur une rotation sur 8 ans, comportant 4 années de céréales, 2 années d'oléo-protéagineux et 2 années avec luzerne. Au final, les légumineuses progressent de plus de 100 000 ha et totalisent le quart de la SAU, principalement au détriment des céréales qui passent de 69 à 51 % de la SAU.

	Assolement actuel (kha)	AB autonome en N	AB importateur de N	PI sans betterave	PI avec betterave	Céréales – colza	Conv. sans betterave	Conv. avec betterave	TOTAL	Assolement 2050 (kha)
Part dans l'assolement en 2050		30 %	15 %	10 %	30 %	0 %	5 %	10 %	100 %	
Durée de la rotation (ans)		8	6	5	6	3	5	5		
Céréales	345	4	3	3	3	2	3	2	51 %	253
Oléagineux	90	1	1	1	1	1	1	1	16 %	81
Protéagineux	23	1	2	1	1		1	1	19 %	94
Luzerne	1	2							8 %	38
Cultures industrielles	44				1			1	7 %	35
Total (kha)	500									500

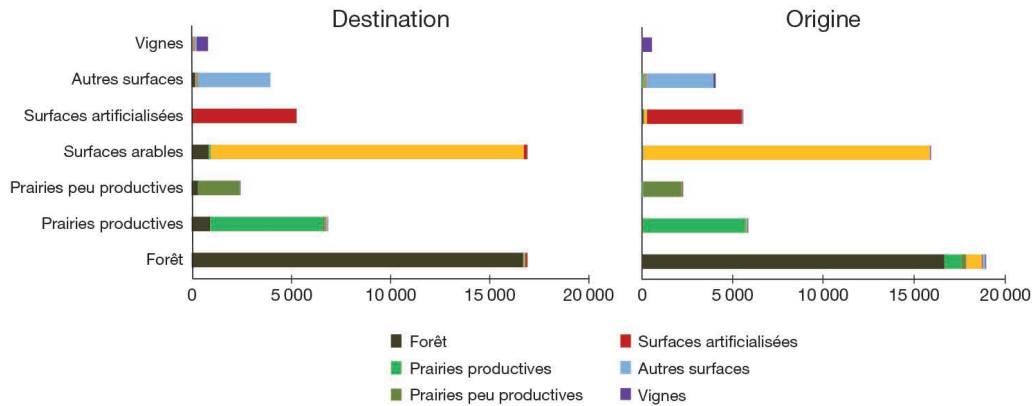


Figure 9.2 Destination (de 2020 vers 2050) et origine (en 2050 depuis 2020) des surfaces, en milliers d'hectares. La surface de forêt passe ainsi de 17 millions d'hectares (Mha) en 2020 à 20 Mha en 2050, en gagnant 1 Mha sur les prairies permanentes et 2 Mha sur les terres arables. On note que la réduction des prairies s'effectue uniquement au profit de la forêt et non des terres arables, avec une petite part jugée incompressible d'artificialisation (source : Solagro).

À l'échelle nationale, l'approche bilantielle permet tout d'abord de vérifier l'équilibre des surfaces : dans le jeu des évolutions, il est possible de choisir d'interdire de convertir, par exemple, des prairies en terres arables et d'autoriser leur conversion en forêt. Dans de nombreux scénarios, c'est le choix des acteurs que d'éviter toute perte de carbone ou de biodiversité en passant d'un usage des terres à un autre usage qui conduirait à une perte sur ces deux plans (figure 9.2).

Le choix des modes de culture et des modes d'élevage fait également l'objet d'hypothèses, chaque type d'élevage étant également caractérisé par des jeux d'indicateurs adéquats (niveau de production par animal, alimentation, mode de gestion des déjections d'élevage).

Le bilan fourrager consiste à comparer les ressources aux usages (figure 9.3). Les ressources sont constituées de l'ensemble des productions d'herbes et fourrages sur prairies permanentes ou temporaires, des cultures fourragères, ainsi que des cultures intermédiaires. En termes d'usage, on distingue l'herbe pâturée, qui dépend du temps de présence des ruminants dans les prairies, et l'herbe de conservation. On identifie également les ressources utilisées pour la production d'énergie, notamment pour la méthanisation, et au final le surplus ou le déficit.

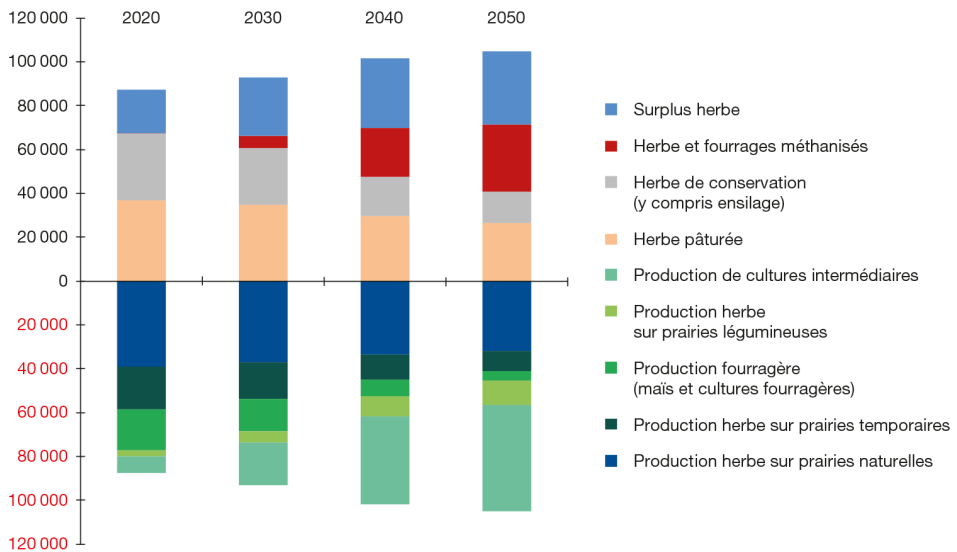


Figure 9.3. Bilan d'approvisionnement fourrager, en milliers de tonnes de matière sèche. Les productions d'herbe sur prairies naturelles diminuent peu, les prairies temporaires chutent et les graminées sont remplacées par les légumineuses. Les couverts intermédiaires fournissent une ressource supplémentaire importante, et la part de légumineuses qu'elles comportent constitue une source d'azote importante. Le système génère des surplus fourragers importants, dont une part (la moitié des couverts intermédiaires et une partie de l'herbe de fauche en surplus) est utilisée en méthanisation (source : Solagro).

Le même bilan est réalisé pour les concentrés (figure 9.4). Les différentes ressources mobilisées pour l'alimentation animale tiennent compte de l'évolution des systèmes d'élevage. L'extensification de l'ensemble des filières conduit donc à dégrader l'indicateur « Indice

de consommation». La structure des concentrés est paramétrable, avec une possibilité de réduire les importations de tourteaux de soja, par exemple, au profit d'autres types de protéines (autres tourteaux et protéagineux, cultures associées, voire insectes).

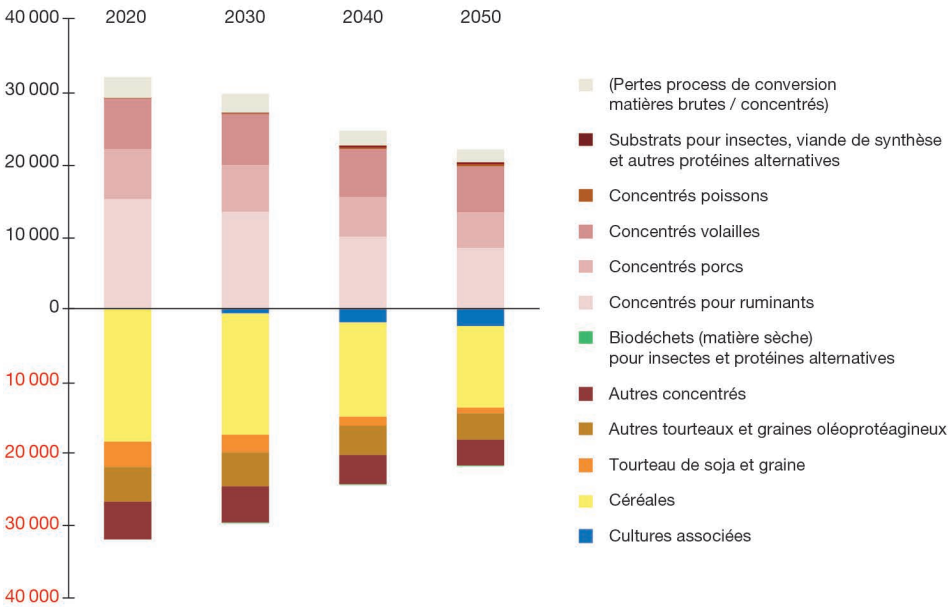


Figure 9.4. Bilan d'approvisionnement en concentrés pour les élevages, en milliers de tonnes (source : Solagro).

Les bilans d'approvisionnement réalisés pour chaque produit permettent d'identifier les évolutions des importations et des exportations (figure 9.5). Fondés sur les bilans de la FAO, ils permettent d'identifier les ressources (production et importation), les origines (exportations et demande intérieure) et, dans la demande intérieure, les différents usages : alimentation humaine, animale, transformations, usages industriels. On note que la production de blé est réduite : les surfaces diminuent légèrement (pour laisser plus de place aux légumineuses) et les rendements diminuent avec la massification des systèmes à bas et très bas intrants. La consommation humaine évolue peu, un moindre gaspillage compensant l'augmentation de la population. La consommation animale est divisée par deux, en lien avec la diminution des différents cheptels et malgré leur extensification. Les exportations diminuent mais restent à un niveau élevé. On considère qu'elles sont destinées principalement aux marchés de l'alimentation humaine vers l'Afrique et vers le Moyen-Orient, en augmentation, alors que les marchés des céréales fourragères vers l'Europe sont divisés par deux, en considérant que le reste de l'Europe opère une transition alimentaire similaire. Le solde exportateur des produits animaux reste positif, la diminution de la production étant plus que compensée par la diminution de la consommation. Enfin, les importations de fruits et de légumes diminuent, sans atteindre pour autant l'autosuffisance. La production augmente significativement, la consommation de légume également, celle de fruits stagne (réduction des jus de fruits mais augmentation des fruits frais, et surtout réduction des pertes).

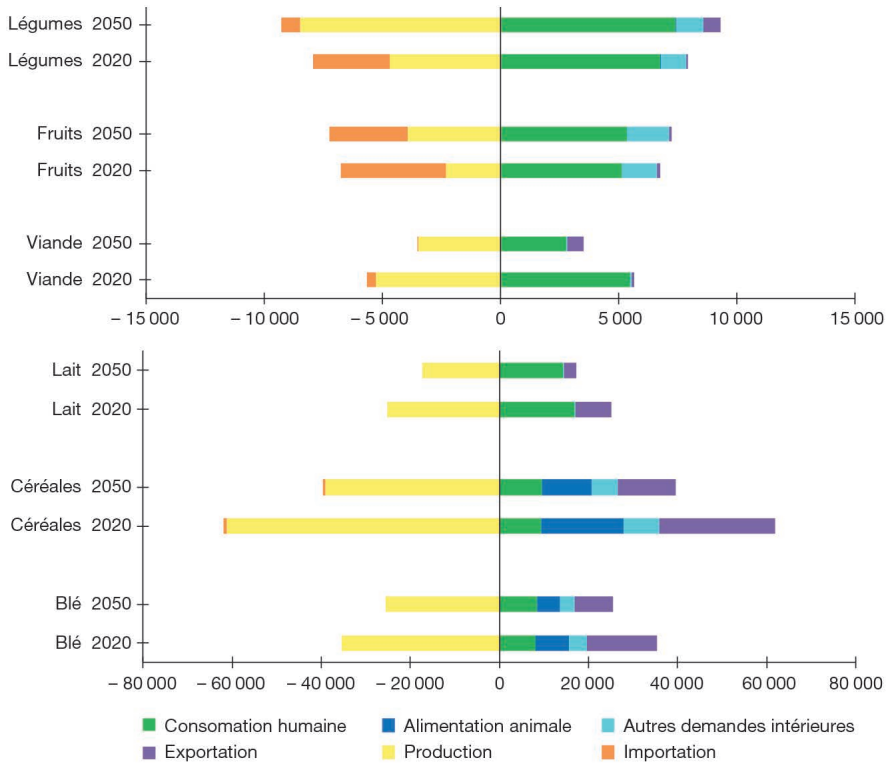


Figure 9.5. Bilan d'approvisionnement pour quelques produits et groupes de produits emblématiques, en milliers de tonnes. Nomenclature FAO (source : Solagro).

Les émissions de GES passent de 95 à 38 millions de tonnes équivalent CO_2 (figure 9.6). Il s'agit ici du périmètre « Climagri », qui compte les émissions directes de l'agriculture, incluant les émissions liées à l'utilisation d'énergie à la ferme (format Secten²²) et les émissions indirectes, qui intègrent la production des intrants, notamment les engrais azotés. La diminution des émissions se répartit entre les trois gaz : celle du dioxyde de carbone (CO_2) est due aux économies d'énergie et à la décarbonation des énergies ; celle de protoxyde d'azote (N_2O) est permise par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'azote et la diminution du méthane (CH_4) repose principalement sur la diminution du nombre de ruminants, et secondairement sur des gains liés à différents facteurs, comme l'alimentation du bétail. La gestion des effluents d'élevage joue aussi un rôle important sur la réduction des émissions de CH_4 et de N_2O .

Le gain sur les émissions de N_2O n'est pas lié à une diminution des flux d'azote, les flux globaux changeant assez peu. La principale modification est liée à la substitution partielle de l'azote d'origine synthétique par de l'azote d'origine symbiotique, avec un apport total d'azote primaire légèrement diminué. Mais les flux d'azote secondaires, c'est-à-dire la recirculation de l'azote *via* les matières végétales (résidus de cultures, cultures intermédiaires) et les déjections d'élevage, sous différentes formes (brute ou méthanisée), restent proches du niveau actuel. Au contraire, les facteurs d'émissions

22. Citepa. <https://www.citepa.org/fr/secten/>

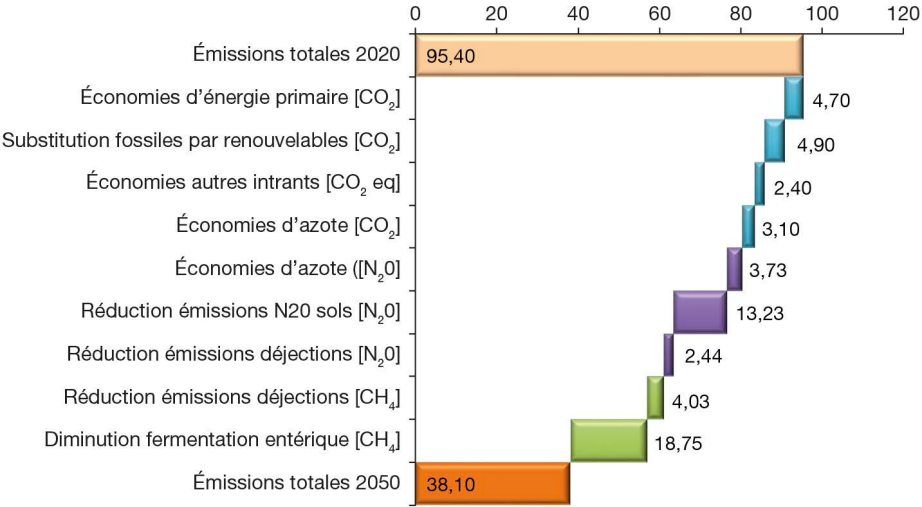


Figure 9.6. Émissions de GES en 2020 et en 2050, en millions de tonnes équivalent CO₂ (CO₂ eq), et attribution des gains par poste (source : Solagro).

de l'azote d'origine organique peuvent être supérieurs aux facteurs d'émission de l'azote minéral. La réduction des émissions de N₂O est donc moins liée à la réduction des flux qu'à des gains d'efficacité.

Le calcul des émissions territoriales est doublé par une estimation de l'empreinte, qui tient compte des exportations et des importations de produits agricoles et alimentaires (figure 9.7). En effet, la figure 9.6 n'intègre pas les importations d'aliments pour

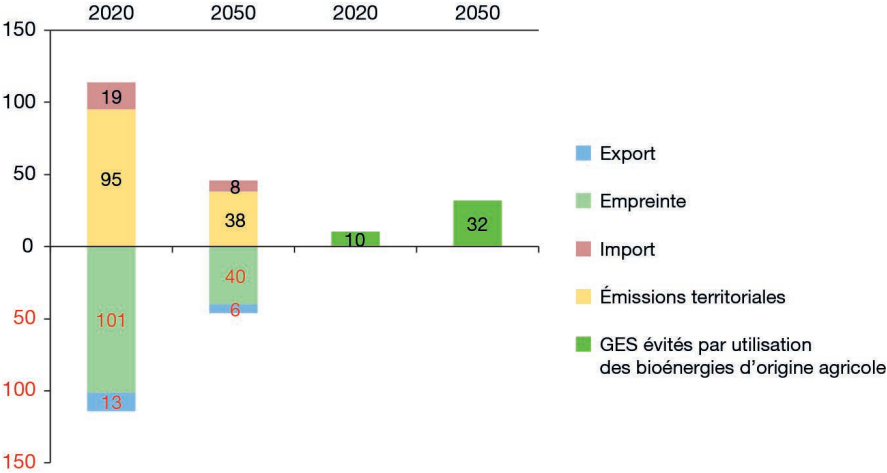


Figure 9.7. Empreinte GES de l'agriculture, en millions de tonnes équivalent CO₂. Le graphique indique la valeur des production (c'est-à-dire les émissions territoriales au format ClimAgri®), des importations, des exportations, et par différence la valeur GES des consommations, c'est-à-dire l'empreinte des consommateurs français. À droite, est indiquée l'économie de GES liée à la production des bioénergies agricoles, en substitution à une énergie fossile de type gaz naturel. On notera qu'elles sont en ordre de grandeur comparables aux émissions territoriales (source : Solagro).

le bétail, notamment le soja, et ne tient pas compte des exportations. Pour s'assurer que le scénario retenu ne repose pas sur un simple transfert des impacts hors des frontières, donc hors du périmètre de travail, on estime ainsi les flux de GES associés aux importations et aux exportations, l'empreinte étant obtenue en additionnant les émissions à la production et les émissions du solde net des échanges internationaux. On voit que si les exportations diminuent, les importations diminuent encore plus et le solde exprimé en GES s'améliore.

Outre un jeu de nombreux indicateurs agroécologiques – émissions d'ammoniac, solde azote, consommation d'eau d'irrigation et surfaces irriguées, détail des infrastructures agroécologiques, stockage de carbone par les écosystèmes agricoles, consommation de produits phytosanitaires, etc. –, une évaluation macroéconomique du scénario Afterres 2050 a été également réalisée (figure 9.8).

Elle porte sur un horizon de 10 ans seulement, donc avec une transition qui ne fait que commencer. On considère en effet que la vitesse de ces transitions évolue dans le temps : pour simplifier, 10 ans d'apprentissage, 20 ans d'accélération et 10 ans d'atterrissage. La visualisation de la variation des flux monétaires entre les grands secteurs de l'économie nationale est riche en enseignements. Pour le secteur agricole, la production en volume diminue de 4 milliards d'euros (Md€), mais les consommations intermédiaires diminuent de 5 Md€, soit un gain pour le secteur agricole de 1 Md€. Ce sont les ménages qui obtiennent le gain le plus important, avec comme principaux facteurs explicatifs la diminution des pertes et gaspillage, et la végétalisation de l'alimentation. Ces valeurs reposent sur l'hypothèse d'une augmentation des prix unitaires, liés notamment à la massification des modes de production à bas et très bas intrants. Ce gain de

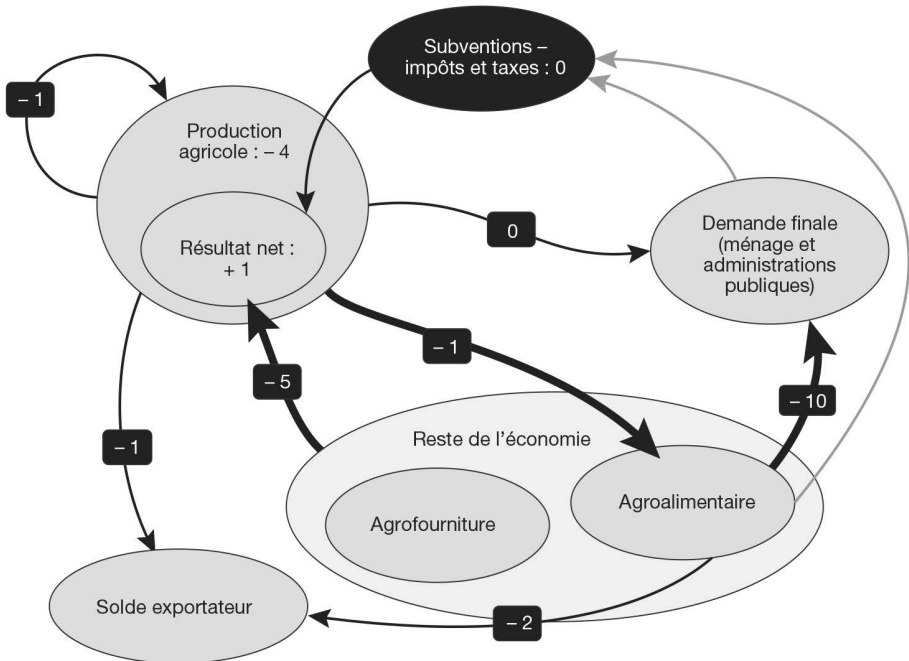


Figure 9.8. Évolution des flux monétaires entre les principales familles d'acteurs économiques, en milliards d'euros, 10 ans après la mise en œuvre du scénario Afterres 2050 (source : Solagro).

10 Md€ est à rapprocher du volume actuel de la Pac, et surtout de la valeur des externalités. Les gains permis par la transition écologique dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation représentent plusieurs dizaines de milliards d'euros par an. Ces gains seraient à répartir entre les consommateurs, les agriculteurs et le système de santé, grand bénéficiaire indirect d'une politique agricole et alimentaire qui agirait comme un très puissant moyen de prévention des risques sanitaires.

» Cibles

Les acteurs qui font appel à ce type de démarche sont divers. La stratégie nationale bas carbone, pilotée par le ministère de l'Écologie, a pour objet de définir des « budgets carbone » par secteur et par période. La scénarisation permet de mieux identifier les efforts à engager sur chaque secteur, et c'est par cette méthode que le taux de réduction des GES assigné à l'agriculture est ainsi estimé. L'Ademe explore plusieurs trajectoires de neutralité climatique, avec quatre scénarios contrastés faisant appel plutôt au levier de la demande, ou plutôt au levier de la production, de manière à borner le débat public entre l'approche sobriété et l'approche pari technologique. L'association EpE (Entreprises pour l'Environnement) imagine un scénario « Zéro émissions nettes » porté par le monde de l'entreprise. Le WWF, avec Pulse Fiction, souhaite promouvoir les légumineuses dans le cadre d'une vision plus globale du système alimentaire. Les régions et collectivités territoriales comme Grenoble Alpes Métropole ou le Grand Genève souhaitent définir leurs projets alimentaires territoriaux en les inscrivant dans une vision prospective de long terme.

Chapitre 10

Une Europe agroécologique en 2050, scénario « Ten Years For Agroecology » (Tyfa)

Pierre-Marie Aubert et Xavier Poux

► Introduction

Le manque de durabilité du système alimentaire européen sur la plupart des dimensions ne fait plus débat (EEA, FOEN, 2020; stratégie Farm2Fork du Green Deal européen, CE, 2020). Plusieurs scénarios ont été publiés ces dernières années à différentes échelles (du niveau national au niveau de l'Union européenne [UE], en passant par des approches régionales), proposant des moyens de ramener le système alimentaire de l'UE dans les limites durables à l'échelle planétaire (Couturier *et al.*, 2016; CE, 2018; ECF, 2018; Karlsson *et al.*, 2018; Springmann *et al.*, 2018; Lóránt, Allen, 2019; Willett *et al.*, 2019; Billen *et al.*, 2021; Searchinger *et al.*, 2021; van Selm *et al.*, 2022). Dans la plupart de ces scénarios, l'accent est mis sur l'atténuation du changement climatique, bien que la biodiversité puisse également être prise en compte. Duru *et al.* (2021) montrent que, pour atteindre leurs objectifs climatiques, la grande majorité des scénarios s'appuient sur (a) une réduction du bétail – y compris des ruminants –; (b) des augmentations de rendement; (c) d'importants changements d'utilisation des terres par le boisement des terres libérées, grâce à la fois aux augmentations de rendement et à la réduction de l'utilisation des prairies permanentes par les ruminants.

En tant que telles, les prairies permanentes (PP) – définies ici comme une végétation herbacée et non herbacée (ligneuse) utilisée pour le pâturage et/ou la fauche, qui n'ont pas été labourées au cours des cinq dernières années ou plus – sont généralement considérées comme des terres à prendre pour le reboisement. Si les services écosystémiques qu'elles rendent peuvent être reconnus (Couturier *et al.*, 2016; Ryschawy *et al.*, 2017; Karlsson *et al.*, 2018; Simoncini *et al.*, 2019; Schils *et al.*, 2022), ils ne sont pas explicitement traités dans les modèles qui sous-tendent les scénarios (Bengtsson *et al.*, 2019). De plus, si les PP peuvent être bien considérées, les ruminants qui les pâturent sont généralement considérés comme des convertisseurs inefficaces d'aliments par rapport aux volailles et aux porcs (Herrero *et al.*, 2013), et responsables d'importantes émissions de méthane (Steinfeld *et al.*, 2006). Un rapport récent issu d'un atelier conjoint entre l'Ipbes et le Giec (Pörtner *et al.*, 2021) présente la situation de manière similaire : la PP doit être conservée et non convertie pour produire de la bioénergie, mais la consommation de viande bovine et de produits laitiers doit être réduite au minimum. La façon dont les PP seront ensuite gérées pour fournir une variété de services écosystémiques (relatifs, par exemple, à la régulation des cycles de l'azote et du carbone, à la fourniture d'aliments nutritifs, à la régulation de la qualité/

du cycle de l'eau, à la conservation du paysage ou à la fourniture d'habitats à un large éventail d'espèces, voir l'étude de D'Ottavio *et al.*, 2018) reste une question ouverte dans une telle perspective.

Dans ce contexte, un scénario a été explicitement développé pour explorer dans quelles conditions une Europe agroécologique pourrait nourrir durablement et sainement 530 millions de citoyens européens d'ici 2050 tout en restaurant la biodiversité et en réduisant les émissions de GES : le scénario «Ten Years For Agroecology in Europe» (Tyfa). Le scénario vise également à mieux prendre en compte le rôle des PP et des ruminants dans la transition vers un système alimentaire européen plus durable. Le scénario Tyfa repose sur un modèle d'équilibre de la biomasse (Tyfam, encadré 10.1) organisé autour de compartiments entre lesquels circulent la matière et l'énergie, connectés de manière systémique (figure 10.1).

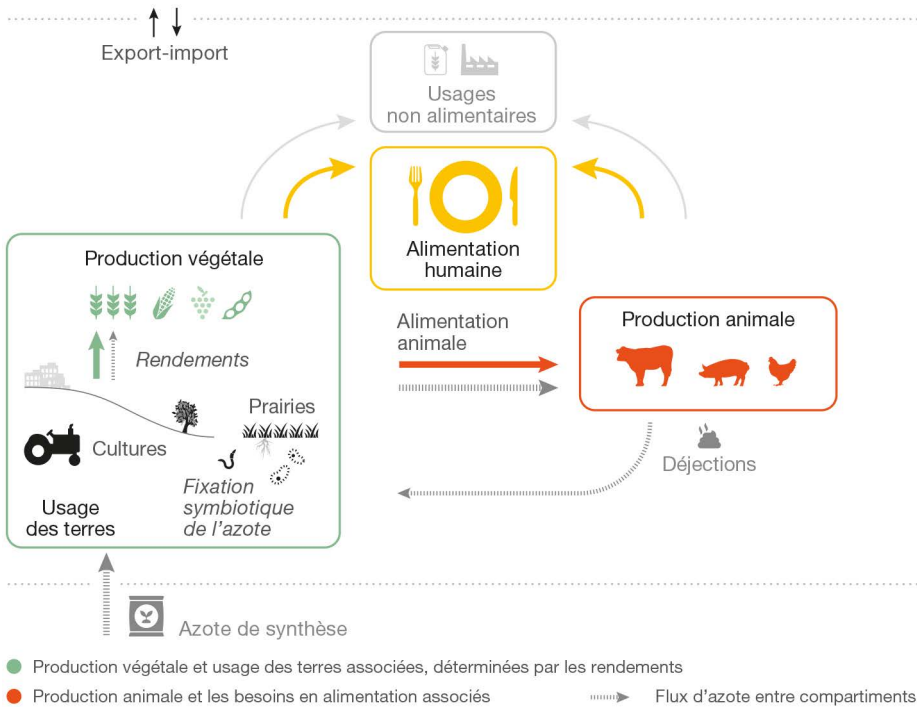


Figure 10.1. Structure logique du modèle qui sous-tend le scénario Tyfa (source : Poux, Aubert, 2018).

Encadré 10.1. Spécification du modèle Tyfam et sources de données

Compartiments du modèle Tyfam :

– La *production végétale*, résultant d'une certaine *utilisation des terres* européennes (répartie entre les terres arables, les cultures permanentes, les prairies permanentes et les infrastructures agro-écologiques : haies, arbres, étangs, habitats pierreux, chemins creux) et les *rendements* moyens associés au niveau de l'UE. Le modèle Tyfam prend en compte 36 types de cultures annuelles (base Eurostat), de cultures

permanentes (oliviers, fruits), de prairies (permanentes et temporaires) et d'autres infrastructures agro-écologiques;

- la *production animale*, alimentée par une fraction de la production végétale, dont une partie peut entrer en concurrence avec l'alimentation humaine (par exemple : les céréales), tandis que le reste n'entre pas en concurrence (prairies et coproduits). Pour chaque type d'animaux, un ou deux systèmes d'élevages types sont considérés;

- la *demande alimentaire*, qui résulte des *habitudes alimentaires* individuelles, du *coefficient de gaspillage* et d'un niveau donné de *croissance démographique en Europe*, et qui est couverte à la fois par la production européenne et les produits importés. La consommation alimentaire est exprimée à la fois en termes d'équivalent produit brut (pour chaque catégorie de produits), et de sa traduction en macronutriments (glucides, lipides, protéines, fibres et sucre) – afin de la comparer aux recommandations nutritionnelles;

- la demande *non alimentaire/industrielle* de biomasse (énergie et biomatériaux), qui peut à nouveau être couverte par un mélange de production européenne et d'importations.

Les flux d'azote associés au fonctionnement et aux interactions entre les quatre premiers compartiments déterminent en grande partie le niveau de fertilité des sols. L'analyse des flux d'azote prend en compte les différents types d'intrants (azote de synthèse, importations d'aliments pour animaux, fixation symbiotique et transferts par les fumiers) et d'exportations (productions animales et végétales).

La demande alimentaire et non alimentaire est exogène au modèle; les rendements et les ratios entrées/sorties pour les systèmes d'élevage sont également déterminés par l'utilisateur. Les niveaux de production pour chaque catégorie de produits agricoles et d'élevage, l'utilisation des terres et le bilan azoté sont calculés par le modèle Tyfam. Ce dernier est également couplé au calculateur ClimAgri® pour calculer les émissions de GES du système alimentaire, à la fois pour la ligne de base et le scénario Tyfa.

Le modèle Tyfam est paramétré au niveau de l'UE, en utilisant des valeurs moyennes calculées à partir de la base de données d'Eurostat et de l'Efsa pour la ligne de base (calibrée sur les données de 2010); elles sont dérivées de nos hypothèses pour le scénario Tyfa. Le calibrage du modèle au niveau de l'UE (similaire à cet égard à GlobAgri, tel que présenté dans Mora *et al.*, 2020, voir encadré 5.1) est suffisant pour donner un ordre de grandeur de la probabilité du scénario, mais pas bien sûr pour fournir une analyse détaillée des implications du scénario pour chaque région.

» Hypothèses du scénario Tyfa

Les hypothèses qui sous-tendent le scénario Tyfa visent à rendre aussi explicite que possible une approche systémique de l'agroécologie – entendue ici dans sa dimension technique (et par opposition à sa dimension de mouvement social et de pratique – voir Wezel *et al.*, 2009). Cela revient à appliquer les concepts et principes de l'écologie à la gestion des agroécosystèmes, en tenant compte notamment des flux biogéochimiques (même si seul l'azote est modélisé dans Tyfam) et des interactions fonctionnelles entre organismes au niveau des agroécosystèmes complexes (Gliessman, 2007). L'ensemble des hypothèses retenues pour le scénario Tyfa est présenté de manière synthétique dans la figure 10.2.

- 1** Une gestion de la fertilité au niveau territorial qui passe par :

 - arrêt des importations de soja/protéines végétales
 - réintroduction des légumineuses dans les rotations
 - reterritorialisation de l'élevage dans les zones de culture
- 2** Abandon des pesticides et extensification de la production végétale : l'agriculture biologique comme référence


- 3** Redéploiement des prairies naturelles sur l'ensemble du territoire européen et développement des infrastructures agroécologiques à hauteur de 10 % de la sole cultivée


- 4** Extensification de l'élevage (ruminant et granivore) et limitation de la compétition feed / food, entraînant une forte baisse du cheptel de granivores et modérée de celui des herbivores


- 5** Adoption de régimes alimentaires moins riches et plus équilibrés suivant les recommandations nutritionnelles

 - réduction de la consommation de produits animaux
 - et augmentation des protéines végétales
 - augmentation des fruits, légumes
- 6** Réduction des usages non alimentaires et énergétiques



Figure 10.2. Principales hypothèses du scénario Tyfa (source : Poux, Aubert, 2018).

Ces hypothèses accordent un rôle central aux prairies permanentes (figure 10.3) et aux ruminants, suivant quatre axes de réflexion centraux.

– Le premier concerne le rôle central de la PP dans la fourniture de fourrage et donc de nourriture humaine *in fine*. La question de la production de biomasse soutenant cette fonction d'approvisionnement en fourrage est alors primordiale. Pourtant, Huyghe *et al.* (2014) indiquent à quel point les données sur la productivité et sur la répartition des prairies en Europe sont rares. Il n'existe pas de statistiques uniques et centralisées sur cette production dans Eurostat. Smit *et al.* (2008) et Tóth *et al.* (2013) ont mené des recherches visant à évaluer la productivité de l'herbe, en tenant compte de la distribution spatiale des PP et des rendements associés. La modélisation de la productivité inhérente des prairies (c'est-à-dire expliquée par la fertilité naturelle du sol, sans tenir compte de l'apport en engrais) donne un rendement moyen de 6,3 tonnes de matière sèche par hectare (tMS/ha). Dans Tyfa, nous avons supposé une productivité moyenne de 4,5 tMS/ha afin de refléter une perte de production par rapport à la PP actuellement fertilisée et des pertes potentielles dues au changement climatique (par exemple : Dibari *et al.*, 2021 pour l'Italie).

– Les processus à long terme ont rendu les PP indispensables pour la préservation de la biodiversité en Europe (Pärtel *et al.*, 2005), et un peu moins de 30 % de

tous les habitats que l'UE s'est fixé de conserver conformément à la Convention sur la biodiversité dépendent aujourd'hui des systèmes d'élevage extensif – et donc des PP (Halada *et al.*, 2011). Comme les PP contribuent à maintenir des niveaux élevés de biodiversité dans les agroécosystèmes, elles jouent un rôle déterminant dans la fourniture de services écosystémiques fondamentaux, parmi lesquels la pollinisation et la lutte contre les parasites (Dainese *et al.*, 2019). Le maintien de ces services écosystémiques apparaît, quant à lui, déterminant pour assurer la capacité productive à long terme des agro-écosystèmes européens dans un contexte de stagnation des rendements et de variabilité accrue (Brisson *et al.*, 2010; Ray *et al.*, 2012; Wiesmeier *et al.*, 2015; Schils *et al.*, 2018), qui n'est que partiellement imputable à l'impact du changement climatique (Moore, Lobell, 2015).

– Lorsqu'elles sont gérées de manière extensive (*i. e.* ni semées ni fertilisées), les légumineuses peuvent représenter jusqu'à un tiers de la composition floristique et permettre ainsi une importante fixation biologique de l'azote. Dans les PP à faible pourcentage de légumineuses, l'insuffisance apparente de l'apport d'azote par la fixation symbiotique peut être couverte par l'azote fourni par les dépôts aériens et par la fixation de l'azote par des bactéries libres, qui s'avère plus élevée dans les prairies naturelles (Roper, Gupta, 2016). Jeffrey (1988) affirme que « l'existence de prairies naturelles avec peu de légumineuses, et pourtant une production durable, indique que cette source d'apport d'azote [par les bactéries libres] peut être d'une grande importance écologique et économique ». Des expériences à long terme durant une ou plusieurs saisons indiquent des gains pour les prairies de 5-90 kg N/ha/an (Dobereiner, De-Polli, 1980). En tant que telles, les prairies peuvent devenir des fournisseurs fondamentaux d'azote pour le système alimentaire, bien qu'elles soient aujourd'hui des puits nets d'azote en raison de leur gestion intensive (Einarsson *et al.*, 2021). Dans une telle perspective, les systèmes mixtes extensifs de ruminants peuvent devenir des transporteurs uniques de cet azote organique vers les terres arables – dont l'impact sur le climat est, dans les zones tempérées, bien moins important que celui des engrais minéraux (Buendia *et al.*, 2019). Le troupeau de ruminants de Tyfa a donc été ajusté de manière à faire pâturer les 60 millions d'hectares de PP à travers l'Europe avec une moyenne d'une unité de bétail par hectare.

– Les produits laitiers et carnés issus des systèmes d'élevage extensifs ont en général une valeur nutritionnelle bien supérieure à ceux obtenus par les systèmes conventionnels, notamment en termes de teneur en oméga 3 (par exemple : Daley *et al.*, 2010).

► Résultats

Les principaux impacts du scénario concernent l'utilisation des terres, la production et la consommation alimentaire et les émissions de GES.

Une Europe agroécologique pourrait nourrir 530 millions d'Européens tout en restaurant la biodiversité et en réduisant les émissions de GES

Le premier constat de Tyfa selon les hypothèses énoncées ci-dessus est que la production agricole (production végétale et production animale) est suffisante pour répondre à la demande alimentaire européenne en 2050 malgré une baisse significative de la production totale (– 30% en équivalent kilocalorie [kcal]). Ce résultat est obtenu par l'adoption généralisée d'un régime alimentaire moins calorique, plus végétal, et donc

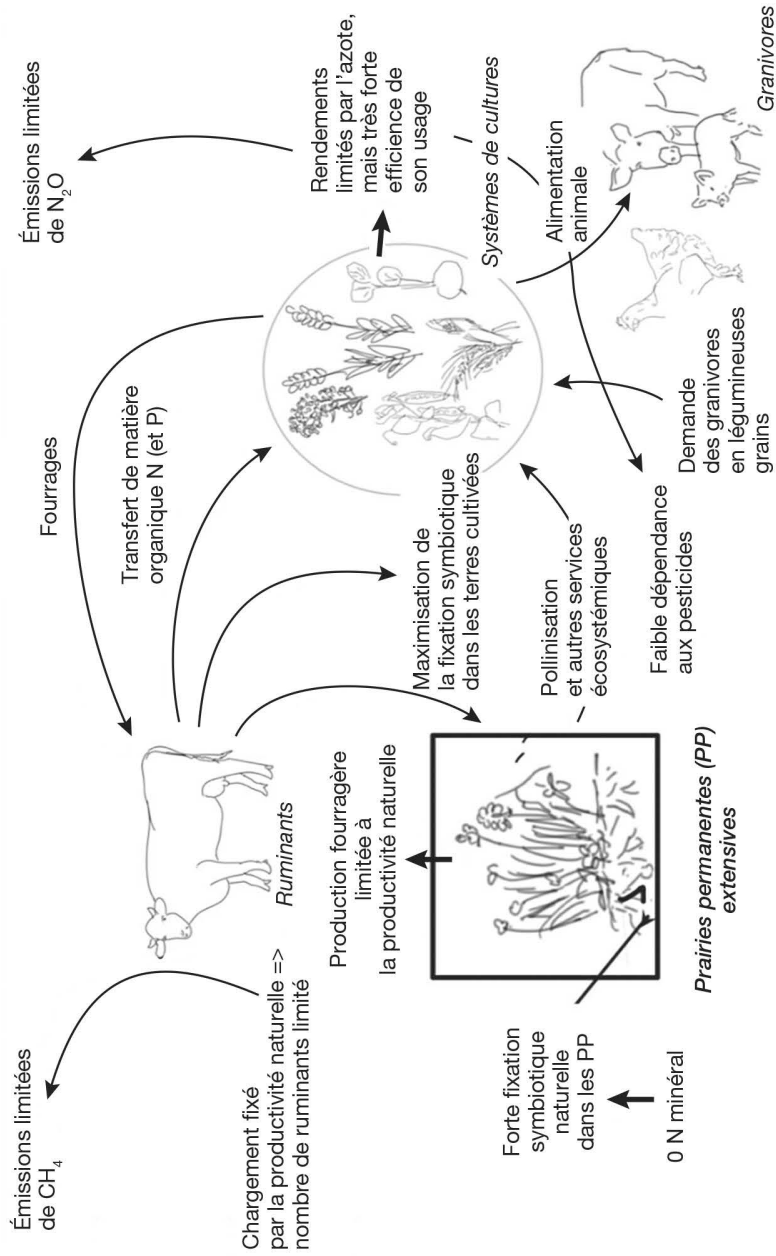


Figure 10.3. Synthèse du rôle des prairies permanentes extensives de Tyfa dans le système agricole global. Les flèches montrent les principales composantes et la relation de cause à effet du raisonnement.

ayant moins recours à l'agriculture intensive. Plus précisément, la production animale diminue de 45 % en calories, en grande partie à cause de la baisse de la production des granivores et des porcs en particulier, mais aussi des produits laitiers (– 31 % entre 2010 et 2050). La réduction du cheptel de granivores est également amplifiée par le retour à une balance commerciale nulle pour ces produits – qui représentaient, en 2010, 10 % de la production pour les porcs et 3 % pour les volailles). Au contraire, le niveau de la production de viande bovine est maintenu à un niveau similaire à l'horizon 2050 grâce à l'extensification de la production laitière herbagère. Deux facteurs explicatifs se combinent : une plus faible productivité des vaches laitières (nécessité d'un plus grand nombre d'animaux pour produire la même quantité de lait) et des changements dans la gestion du troupeau laitier associés à l'augmentation du nombre de lactations. Globalement, le ratio « viande bovine laitière par kilogramme de lait produit » augmente en raison de l'augmentation de la descendance laitière.

La production végétale diminue de 30 % en moyenne exprimée en kilocalories, la production céréalière étant fortement réduite (– 50 %), alors que la production de protéagineux est multipliée par plus de quatre. Ces évolutions doivent être appréhendées dans le contexte des changements respectifs de la consommation alimentaire humaine et de la consommation alimentaire animale – qui représente la plus grande partie du volume. Cette consommation animale dépend elle-même des hypothèses concernant les systèmes d'élevage, en particulier l'utilisation des ressources fourragères des prairies temporaires et permanentes, ainsi que celles concernant les rendements de ces prairies. L'évolution vers une production de ruminants nourris à l'herbe et moins de monogastriques réduit l'utilisation de maïs grain et, par conséquent, de protéines végétales (soja importé ou autres).

Selon les hypothèses retenues dans Tyfa, la réduction globale des émissions de GES pourrait atteindre 36 % au total, répartis entre les émissions directes et indirectes. De plus, compte tenu du fait que le modèle Tyfa repose sur la suspension des importations de protéines végétales, dont une grande partie provenait de terres déforestées en Amérique latine en 2010 (Cuyppers *et al.*, 2013), le potentiel de réduction des émissions de GES dans Tyfa 2050 pourrait atteindre, voire dépasser, 40 %. Cette performance climatique repose sur quatre leviers principaux : (i) la réduction du cheptel, tant des ruminants (vaches laitières, bovins et petits ruminants) de 18 % que des monogastriques de 56 % – ce qui réduit les niveaux de fermentation entérique et les émissions associées à la gestion du fumier – ; (ii) une réduction globale de l'application d'azote (de plus de 20 millions de tonnes d'azote sous forme d'azote synthétique et de fumier en 2010 à 3,3 millions de tonnes d'azote organique sous forme de fumier en 2050) en raison de l'extensification de la production végétale et d'une plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote ; (iii) le passage intégral des engrais minéraux aux engrais organiques et (iv) l'augmentation significative des légumineuses dans les rotations de cultures, permettant un effet de report à un niveau élevé (figure 10.4).

En raison des importantes baisses de rendement liées à la transition vers des systèmes biologiques, la quantité de biomasse utilisable à d'autres fins que l'alimentation dans le cadre du scénario Tyfa est limitée aux biomatériaux, conformément aux niveaux de production de 2010. En particulier, il n'existe aucun potentiel, ou un potentiel limité, pour la production de bioénergie à partir de la biomasse (que ce soit par digestion anaérobie ou par biocarburant).

Le rôle des prairies permanentes dans le scénario Tyfa : fournir de l'azote, maintenir la biodiversité, produire des aliments nutritifs

En raison des hypothèses formulées, les PP et les ruminants jouent un rôle prépondérant dans le scénario Tyfa à trois égards : ils contribuent à l'approvisionnement en azote du système alimentaire global, au maintien de l'agrobiodiversité et à la fourniture d'aliments nutritifs aux humains. Leur rôle dans le maintien d'un haut niveau de biodiversité résulte de l'hypothèse selon laquelle les PP sont redéployées dans les paysages de l'UE et permettent d'atteindre un seuil de 20 % de végétation semi-naturelle dans chacune des petites régions (Benton *et al.*, 2003 ; Garibaldi *et al.*, 2020).

Il en va de même pour l'apport d'aliments nutritifs, qui est la conséquence directe des hypothèses faites sur les systèmes de ruminants : deux systèmes laitiers sont paramétrés sous Tyfa. Le premier, qui représente 30 % de la production laitière, est principalement nourri à l'herbe, avec seulement 100 kg de concentré/vache laitière (VL)/an et avec un rendement moyen de 5 000 l/VL/an. Le second, qui représente 70 % de la production laitière, a un rendement moyen de 5 700 l/VL/an et repose sur l'hypothèse de 700 kg de concentré/VL/an. Les deux systèmes sont associés à la production de viande par l'engraissement des génisses non destinées au renouvellement et de tous les mâles. Dans tous les cas, la part d'herbe dans la ration globale conduit à une qualité nutritionnelle supérieure à celle des produits laitiers et carnés nourris aux céréales (Daley *et al.*, 2010).

Le bilan azoté de Tyfa (figure 10.4) montre tout d'abord que l'apport en azote des cultures fixatrices d'azote en rotation (y compris les cultures intercalaires et les prairies temporaires) couvre 70 % des besoins des cultures.

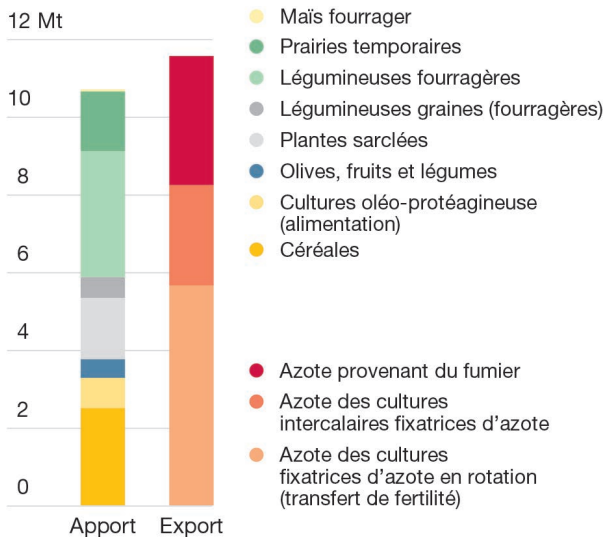


Figure 10.4. Bilan d'azote dans le scénario Tyfa (source : Tyfam).

Les 30 % des besoins en azote restants sont couverts par le fumier, déduction faite des pertes dues aux émissions d'ammoniac. Sur ce total, 20 % proviennent des systèmes monogastriques et 80 % des systèmes ruminants. Ces valeurs dépendent (i) du nombre

total d'animaux et (ii) du temps passé à l'intérieur et à l'extérieur pour chaque catégorie d'animaux. Le tableau 10.1 explicite les hypothèses faites à cet égard pour chaque système d'élevage.

Tableau 10.1. Hypothèses concernant le temps passé dans le logement pour les animaux et la fraction d'azote (N) gérable qui en résulte.

Type d'animal	Part du temps passé dans le logement par an (N gérable)	Commentaires
Vaches laitières	90 %	Les vaches laitières restent dans ou à proximité du logement
Vaches allaitantes, génisses, veaux de 1 à 2 ans, moutons et chèvres	50 %	Les pâturages en saison chaude et les logements en hiver
Génisses, veaux 3 ans	70 %	L'engraissement nécessite plus de temps dans le logement
Granivores	100 %	Systèmes intérieurs

À partir de là, le transfert net d'azote des PP vers les terres cultivées dépend finalement de la part d'herbe des PP dans la ration alimentaire globale. Ici, les hypothèses de Tyfa sont qu'en moyenne, les PP fournissent 70 % de l'alimentation nécessaire (en matière sèche) pour tous les ruminants (systèmes laitiers, bovins, petits ruminants). Cela signifie un transfert net d'azote des PP vers les terres cultivées d'un peu moins de 20 % des besoins en azote des cultures, alors que la principale source d'azote du système repose sur l'effet de report des légumineuses dans les rotations de cultures.

Dans l'ensemble, le rôle clé joué par les PP dans la fermeture du cycle organique de l'azote dans Tyfa a des conséquences positives en cascade sur la production (plus faible qu'actuellement, mais reposant sur des services écosystémiques robustes), sur la biodiversité, sur la gestion des ressources naturelles et sur le climat. Cet ensemble de services clés repose en grande partie sur le cycle de l'azote durable induit par la complémentarité entre PP et cultures arables, qui doit donc être appréhendé dans son ensemble.

» Discussion

Le scénario soulève d'importantes interrogations tant d'un point de vue scientifique que politique. Elles couvrent la contribution des PP à la fourniture et au cycle de l'azote, le potentiel de redéploiement des PP à travers les territoires européens (contre la tendance actuelle à la spécialisation), la place des aliments à base de ruminants dans les régimes alimentaires de l'UE et les compromis potentiels entre la conservation de la biodiversité et la neutralité carbone.

Capacité à fournir de l'azote à partir des prairies permanentes

Globalement, la capacité des PP extensives à fournir durablement des aliments et des services écosystémiques est déterminée par l'équilibre entre : (a) la quantité maximale d'azote qu'elles peuvent fixer par fixation symbiotique et non symbiotique, ainsi que la quantité d'azote résultant des dépôts aériens et (b) l'exportation nette ultérieure d'azote par les ruminants sous forme de lait, de viande et de fumier.

Dans les scénarios de systèmes alimentaires récemment publiés, l'hypothèse implicite est que les PP sont des puits nets d'azote et ne peuvent donc pas fournir d'azote au reste du système alimentaire – car elles sont fondées sur des données empiriques concernant le fonctionnement actuel des PP (Einarsson *et al.*, 2021). Dans les scénarios de systèmes alimentaires biologiques publiés par Barbieri *et al.* (2021) ou Karlsson et Røos (2019), la pénurie d'azote s'élève respectivement à 40-60 % pour Barbieri *et al.* (2021) au niveau mondial, et à 21-28 % pour Karlsson et Røos (2019) en considérant les régions nordiques. Pourtant, dans les deux cas, les PP sont modélisées comme des puits nets d'azote, et non comme des sources potentielles, comme l'illustre la figure 10.5 ci-dessous – et contrairement à Tyfa.

Dans le scénario Tyfa, du fait des hypothèses d'exportations nettes, de structure moyenne de troupeau et des hypothèses sur l'exportation de fumier (40 % de restitution d'azote aux PP tout au long de l'année), un besoin net d'azote d'environ 90-130 kg d'azote/ha/an doit être couvert par des intrants naturels. Du côté de l'offre, la modélisation suppose un rendement de 4,5 tMS/ha de PP ; cette contribution est prise en compte en tant que « boîte noire » dans le modèle et supposée, sur une base empirique, être suffisante pour couvrir les besoins en fourrage de la production laitière extensive (à la suite des résultats empiriques et d'une méta-analyse présentés respectivement dans Bignal, 2000 et Smit *et al.*, 2008). Néanmoins, la question se pose de savoir si une gestion extensive des PP selon ces hypothèses de rendement permettrait de boucler le cycle de l'azote, ou bien si elle conduirait plutôt à son exploitation, en raison des niveaux beaucoup plus faibles de fourniture d'azote vers les PP par rapport à la fourniture minérale actuelle et aux importations d'aliments pour animaux (par exemple : par le soja). Nous avons supposé une part de 30 % de légumineuses dans les PP, permettant une fixation de 180 kg d'azote par les légumineuses en moyenne (hors-sol et souterrain), et donc suffisante pour couvrir les besoins. Cette valeur de 30 % a été discutée comme étant trop optimiste car la moyenne n'est que de 10 % dans un large échantillon de PP françaises (Jeuffroy *et al.*, 2015). Les modèles actuels suggèrent également un apport d'azote par la fixation symbiotique autour de 70-80 kg/ha, ce qui est nettement inférieur à notre hypothèse d'exportation nette. Cependant, ces modèles sont statistiques et calibrés sur des données couvrant une grande variété de prairies, parmi lesquelles certaines sont fertilisées (Einarsson *et al.*, 2021) et ne reflètent donc pas la spécificité des prairies véritablement semi-naturelles. Selon Jeuffroy *et al.* (2015), une part plus importante de légumineuses est en effet rencontrée dans les prairies extensives de l'échantillon, reflétant l'antagonisme entre la fertilisation azotée et l'abondance des légumineuses. Cette affirmation soutient l'hypothèse d'une augmentation des légumineuses en moyenne dans les PP, alors que la fertilisation diminuerait selon le scénario Tyfa. Cependant, ces PP étendues ont été sous-étudiées et quantifiées en tant que telles, alors que les mécanismes biologiques en jeu sont intrinsèquement différents de ceux des systèmes fertilisés (Jeffrey, 1988). Nous réitérons ici le rôle potentiel des bactéries libres dans la fixation de l'azote évoqué plus haut (Dobereiner, De-Polli, 1980 ; Jeffrey, 1988 ; Roper, Gupta, 2016). En résumé, l'hypothèse du scénario Tyfa sur l'approvisionnement en azote par les PP est qu'un écosystème PP à faible apport développe un mécanisme de fixation d'azote – et d'autres fonctions biologiques – intrinsèquement différent d'une PP avec un héritage ou un apport élevé d'azote minéral, et que l'extensification peut maintenir des niveaux suffisants d'azote (Loiseau *et al.*, 2005). Une telle hypothèse devrait être confrontée à des données empiriques qui sont aujourd'hui limitées, comme

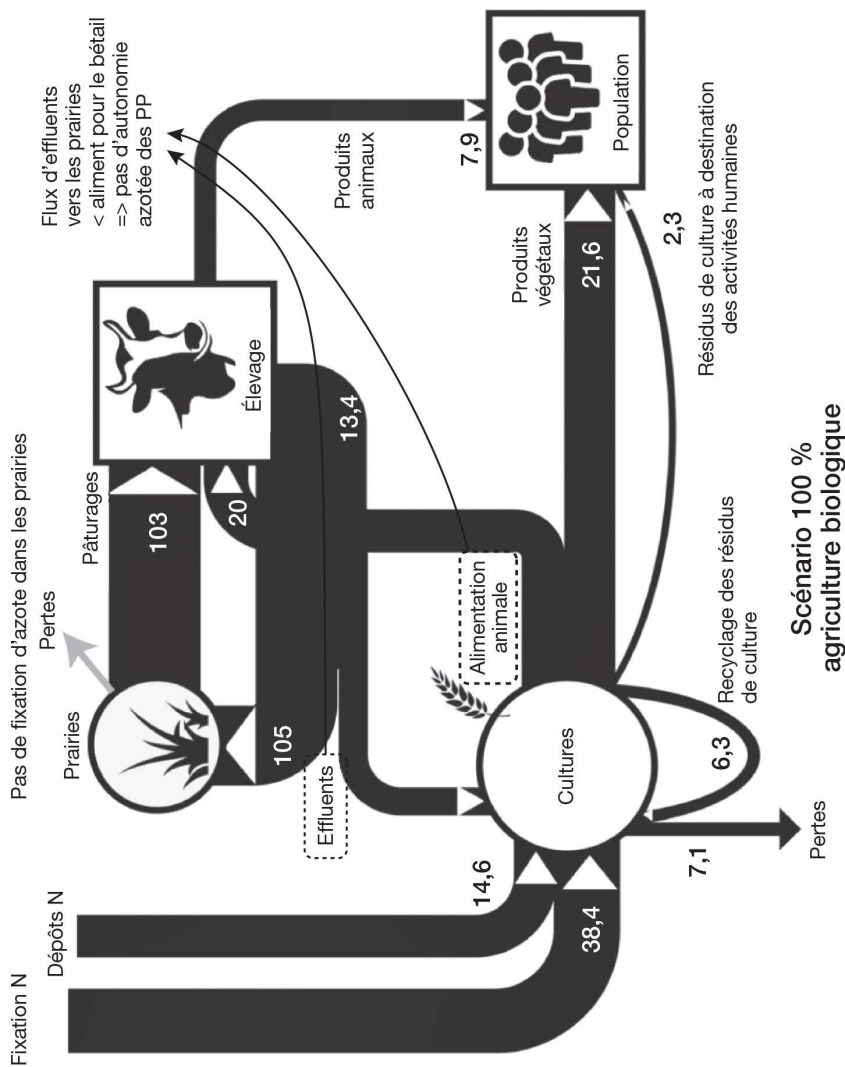


Figure 10.5. Représentation des flux d'azote (N) dans Barbieri *et al.* (2021), exprimés en tétragrammes d'azote (TgN). Les italiques, les flèches et les boîtes en pointillé sont nos ajouts. Dans cette figure, il n'y a pas de fixation d'azote comptabilisée dans les PP, et donc pas de transfert vers les terres cultivées, contrairement à Tyfa.

évoqué ci-dessus. Cependant, nous pouvons noter que Tilman *et al.* (1996) a mené une recherche en accord avec nos hypothèses générales sur la biodiversité soutenant une productivité élevée de l'herbe.

Le fait que le scénario Tyfa ne tient pas compte des flux de phosphore (P), en raison de l'absence de modèle capable de modéliser son cycle dans le système alimentaire en comparaison avec l'azote par exemple, soulève une discussion sur cette perspective. En effet, une analyse plus approfondie devrait être faite dans cette perspective, car la pénurie de phosphore pourrait être un facteur limitant pour la fixation de l'azote qui est au centre du raisonnement selon le scénario Tyfa. Bien que cet élément ne soit pas limitant à l'heure actuelle, il est identifié comme potentiellement manquant dans un futur proche, du moins sous sa forme de minéral extrait (Cordell *et al.*, 2009). Bien que nous n'ayons pas approfondi cette discussion, nous trouvons inspirantes les perspectives ouvertes par Faucon *et al.* (2015) dans la gestion et l'approvisionnement du phosphore dans les systèmes agroécologiques. Il rapporte notamment l'importance de la matière organique du sol dans l'activité microbienne et rhizosphérique du sol, en relation avec la mobilisation du phosphore dans le sol et la rétroaction positive plante-sol sur la disponibilité du phosphore dans les systèmes de culture et de prairie multi-espèces. En outre, les hypothèses formulées concernant la couverture des sols en hiver et la présence de caractéristiques agro-écologiques dans le paysage sont des éléments clés pour prévenir l'érosion, principale cause des pertes de phosphore.

De l'approvisionnement en azote au transfert d'azote : rôle et défis du redéploiement spatial des PP

Non seulement le scénario Tyfa repose sur un apport net d'azote par les PP, mais il est également supposé que cet azote puisse être transféré aux terres cultivées. Au-delà de la question de la gestion du fumier – pour laquelle des hypothèses ont été présentées ci-dessus –, l'une des principales questions soulevées par le scénario Tyfa est de savoir dans quelle mesure il serait possible de redéployer spatialement les PP à travers l'Europe. Cela impliquerait une double dynamique de « déspecialisation » : des régions dominées par les cultures, d'une part, où les PP peuvent ne représenter que 1,5 % de la surface agricole utile, et des zones de prairies vers des systèmes mixtes, d'autre part. Une alternative, qui existe encore dans les régions méditerranéennes, consiste en des transferts d'azote par transhumance dans des régions pourtant dominées par les cultures (par exemple : Castilla y León en Espagne). Trois points permettent de préciser la faisabilité de cette double dynamique de redéploiement des prairies et de déspecialisation des surfaces de grandes cultures :

- les régions tempérées d'Europe (hors zone méditerranéenne) très spécialisées dans la production de grandes cultures sont en fait l'exception. Ailleurs, un seuil de prairies permanentes de 8 à 15 %, voire de 15 à 24 %, est plus courant ;
- dans les régions méditerranéennes, où les prairies permanentes herbacées sont peu fréquentes, certaines formes de végétation semi-naturelle existent, permettant d'envisager des complémentarités par la transhumance (mais la part d'azote assimilable doit alors être précisée) ;
- à l'inverse, les régions véritablement spécialisées dans l'élevage à l'herbe sont mineures (les îles britanniques et le Massif central en France) et présentent un potentiel agricole de retour partiel aux cultures, comme le suggèrent les données historiques.

Le redéploiement des systèmes de polyculture-élevage au niveau territorial (Martin *et al.*, 2016; Ryschawy *et al.*, 2017) à travers l'Europe n'est donc pas toujours aussi difficile que dans les régions spécialisées en grandes cultures. Pourtant, les défis socio-économiques d'une telle déspecialisation ne peuvent être négligés, car cela irait à l'encontre des tendances massives qui ont affecté l'UE au cours des dernières décennies : l'abandon des PP dans les zones marginales, le labour des PP dans les zones favorables aux cultures et la forte intensification des PP dans les zones favorables aux graminées (Peeters, 2009).

Implications nutritionnelles de la valorisation des PP et des ruminants

La nécessité de réduire de manière significative l'apport en protéines animales pour les humains des pays de l'OCDE à des fins d'atténuation du changement climatique est largement reconnue (Clark *et al.*, 2020). Le débat sur le régime alimentaire est donc devenu une question clé dans les scénarios traitant de ce sujet, et Tyfa ne fait pas exception : il suppose une réduction de moitié de la consommation de viande et de produits laitiers. Pourtant, le rôle des PP selon Tyfa accorde une importance relativement plus grande aux aliments d'origine animale provenant de ruminants que de monogastriques – en cohérence avec l'approche systémique adoptée (Frehner *et al.*, 2020). À ce titre, cette dernière considère qu'un avantage majeur des ruminants est leur capacité à se nourrir de végétation non comestible, autrement dit des produits de la PP, qui est au cœur de ce chapitre (Van Zanten *et al.*, 2016; Van Zanten *et al.*, 2018). Dans cette perspective, alors que toutes les terres agricoles ne sont pas cultivables, la production de viande et d'aliments laitiers à partir de PP n'est pas une utilisation inefficace des terres mais est, au contraire, la meilleure utilisation des terres non arables (Van Kernebeek *et al.*, 2016). Dans une perspective plus large, cette source complémentaire de calories réduit le besoin de produire de la nourriture sur la surface limitée des terres arables, et réduit donc le besoin d'intensifier sur cette zone. En effet, si l'on tient compte de la différence fondamentale entre l'alimentation des animaux avec des céréales et celle avec des aliments non comestibles, les ruminants deviennent les utilisateurs de terres les plus efficaces, à condition qu'ils soient effectivement nourris grâce aux PP (Wilkinson, 2011; Mottet *et al.*, 2017). Ces hypothèses sont cohérentes avec les conclusions de van Selm *et al.* (2022), qui proposent de prendre en compte le recyclage des ressources dans les scénarios. Une part équilibrée de ruminants/PP conduit à de meilleures performances, y compris en termes d'émissions de GES, par rapport aux régimes minimisant cette part, par exemple : celui de référence EAT-Lancet (Willett *et al.*, 2019).

Dans le scénario Tyfa, l'objectif de conserver la surface globale en PP et de réduire leur productivité moyenne à 4,5 tMS/ha (en supposant que cela corresponde à la productivité des PP semi-naturelles sans intrants) conduit à une réduction de la production laitière de 34 % et au quasi-maintien de la viande de ruminants. Ce dernier résultat provient de l'extensification du cheptel laitier, ce qui signifie plus de viande sous-produite par tonne de lait (par exemple : remplacer une vache à 10 000 l de lait/an par deux vaches à 5 000 l/an double le nombre de veaux produits à niveau de production laitière équivalente). Il faut noter que, si la part d'herbe dans l'alimentation des ruminants augmente, les vaches laitières sont complémentées par des aliments issus de systèmes de cultures et de compléments alimentaires concentrés. Dans l'ensemble, le régime alimentaire qui en résulte fait passer la part de la viande de ruminants de 15 % en 2010 à 35 %, laissant ainsi la majorité de l'offre de viande aux porcs et aux

volailles, tant en termes absolus que relatifs : la viande des monogastriques s'élève à 56 g/personne/jour dans le scénario (contre 140 g aujourd'hui), ce qui représente environ 65 % de l'ensemble de la consommation carnée (contre 80 % aujourd'hui). Les monogastriques sont en effet essentiels pour « transformer » les légumineuses en rotation en azote organique – en bref : remplacer le soja importé par des légumineuses cultivées dans l'UE – et contribuer ainsi à la fixation symbiotique de l'azote sur la part arable des terres agricoles de l'UE. En tant que tel, le régime alimentaire de Tyfa (figure 10.6) – et d'autres régimes dans une modélisation similaire – n'est pas végétalien mais « flexitarien », avec une part relativement élevée de viande rouge par rapport à d'autres régimes alimentaires sains.

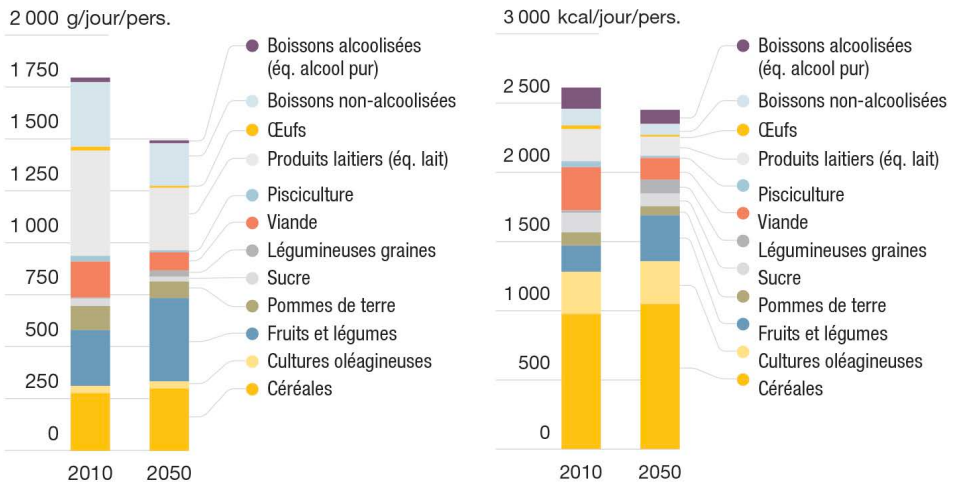


Figure 10.6. Hypothèses de Tyfa sur les régimes alimentaires par rapport à 2010 (moyennes de l'UE) (source : Poux, Aubert, 2018; d'après les données Tyfam pour 2050 et Efsa pour 2010).

Prairies permanentes, ruminants et changement climatique

Une hypothèse centrale de Tyfa est que, pour que les PP fournissent pleinement le potentiel des services écosystémiques, elles doivent être pâturées/fauchées autant que possible par/pour des ruminants, selon des modèles extensifs. Par conséquent, la réduction du troupeau de ruminants dans Tyfa est modérée par rapport à la plupart des scénarios de systèmes alimentaires durables (Couturier *et al.*, 2016; Lóránt, Allen, 2019; Willett *et al.*, 2019). Cela contribue à son tour à expliquer le potentiel de réduction des émissions de GES de Tyfa, qui varie – exprimé en GWP100 – de –36 à –40 % par rapport à 2010. Dans le même temps, l'utilisation potentielle de la biomasse pour d'autres usages que l'alimentation reste limitée par les baisses de rendement et le maintien des PP. Ces deux aspects rendent Tyfa peu compatible avec l'objectif de neutralité carbone au niveau de l'UE d'ici 2050 (CE, 2018; ECF, 2018; Aubert *et al.*, 2019). Il convient toutefois de replacer ce constat dans une perspective plus large en accordant plus d'attention à trois aspects au moins.

Le premier concerne l'évolution de l'impact climatique des ruminants – provenant principalement des émissions de méthane. La plupart des raisonnements s'appuient sur l'utilisation d'un PRG100 exprimé en tonnes équivalent CO (tCO₂eq). Cette

approche ne tient pas compte de la courte durée de vie du méthane (CH_4), dont l'impact sur la température est très fort mais ne dure pas, du fait que la moitié des molécules se décomposent en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O) après une période de 12 ans. Lorsque le méthane provient d'un cycle biogénique (par opposition à la libération de méthane fossile), ce qui est le cas de l'agriculture, la décomposition du CH_4 en CO_2 en fin de cycle est « compensée » par le CO_2 fixé initialement dans le cycle par la photosynthèse. Cette particularité modifie complètement la compréhension de l'impact des émissions de méthane sur le changement climatique : un niveau stable d'émissions de méthane biogénique d'un secteur n'augmente pas la température du globe (l'élevage dans notre cas, mais il en va de même pour les cultures irriguées comme le riz). Réciproquement, une augmentation ou une diminution des émissions conduira respectivement à une augmentation de la température (augmentation du puissant effet flash du CH_4) ou, en cas de diminution, à un effet dit de « refroidissement » (Allen *et al.*, 2018; Lynch *et al.*, 2021). Une analyse plus fine prenant en compte le pouvoir réchauffant de l'effet flash du méthane sur les océans fait que l'impact neutre des émissions de méthane est obtenu pour des changements de -10 à -15% en 12 ans (Allen *et al.*, 2022). Pour appréhender pleinement le potentiel d'atténuation de Tyfa, il faut donc considérer la réduction relative de tous les gaz, en tenant compte du comportement atmosphérique différentiel. Dans cette perspective, le remodelage complet du cycle de l'azote a des effets importants qui pourraient l'emporter sur la réduction limitée des émissions de méthane : une élimination des émissions de CO_2 associées à la production d'azote synthétique par Haber-Bosch, une forte réduction de N_2O car l'application directe d'azote est divisée par plus de 2 (de plus de 20 millions de tonnes sous forme d'azote synthétique et de fumier en 2010 à 3,3 Mt d'azote organique sous forme de fumier en 2050) et le passage intégral des engrais minéraux aux engrais organiques, dont le facteur d'émission est 2,6 fois inférieur (Buendia *et al.*, 2019).

Un deuxième aspect à mieux prendre en compte est la possibilité d'utiliser une partie de l'herbe produite sur les prairies pour produire du biogaz par digestion anaérobie (Aubert *et al.*, 2019). L'intérêt est triple : réduire le nombre de ruminants nécessaires au pâturage de 60 millions d'hectares de prairies (réduction de 34% des unités gros bétail (UGB) de ruminants par rapport à 2010, contre 18% dans le scénario Tyfa initial); maintenir les prairies et leurs services écosystémiques associés en les utilisant pour la production de biogaz une année sur cinq seulement; et produire de la bioénergie pour remplacer les énergies fossiles. Cette option a également été explorée par Kizeková *et al.* (2018) en Slovaquie. Sans pouvoir fixer une limite précise à partir de laquelle le développement de la méthanisation à partir de prairies conduirait à un passage à une logique bioénergétique qui changerait la nature même de l'agroécologie envisagée, il convient de rappeler que l'échelle change la nature même de la filière et doit alors être envisagée avec précaution.

Le dernier aspect concerne la question de l'adaptation. Si la compatibilité du scénario Tyfa avec l'objectif de neutralité carbone est effectivement discutable, le scénario conduirait à une capacité d'adaptation grandement améliorée de la plupart des agroécosystèmes à travers l'Europe grâce à la rediversification significative des systèmes végétaux (Lin, 2011; Muneret *et al.*, 2018), à la reconnexion des systèmes de culture et d'élevage et à l'amélioration de la santé des sols (Mäder *et al.*, 2000; Gattinger *et al.*, 2012). Ce sont des aspects clés qui contribueraient à augmenter la capacité d'adaptation du secteur agricole aux impacts du changement climatique comme

l'augmentation du stress hydrique, l'émergence de nouveaux parasites/maladies, ou encore l'irrégularité des précipitations. En résumé, les questions portant sur la capacité du scénario Tyfa à atteindre la neutralité carbone par rapport à d'autres scénarios interrogent en retour ces scénarios sur leur capacité à faire face à l'adaptation au changement climatique et donc sur leur résilience globale.

► Conclusion : révision du rôle des prairies permanentes et des ruminants dans l'agenda de la durabilité

Dans les scénarios actuels du système alimentaire de l'UE, les PP sont davantage considérées comme un problème que comme une solution. Dans le meilleur des cas, elles sont limitées aux zones où elles constituent la seule utilisation possible des terres, et où une certaine densité de ruminants peut être acceptée. Dans le pire des cas, les PP et les ruminants sont remplacés par des forêts ou des cultures pour la production de bioénergies. Nous avons discuté des limites conceptuelles de ces approches et proposé un scénario s'appuyant sur un cadrage alternatif des problèmes, combinant un lien original entre biodiversité, PP, ruminants, et changement climatique. En utilisant le modèle de biomasse développé dans le scénario Tyfa, nous avons intégré un scénario pour l'UE qui conduit à des résultats positifs pour une alimentation saine, pour la biodiversité, les ressources naturelles et le climat. Nous insistons sur la nécessité d'adopter un régime alimentaire plus sain, en réduisant de moitié les apports en viande et en produits laitiers pour y parvenir.

Le rôle des PP et des ruminants dans ce modèle doit être compris en relation avec ce qu'ils apportent aux systèmes de culture. Une idée clé est que le fonctionnement semi-naturel des PP fournit une série de services (fixation de l'azote, matière organique, auxiliaires biologiques) qui peuvent être transférés aux systèmes de culture par les ruminants. Nous avons également discuté de la manière dont l'impact des ruminants sur le changement climatique devrait être révisé et placé dans une analyse plus large, dans laquelle le compromis avec la gestion de l'azote et les émissions de protoxyde d'azote associées devraient être pris en compte.

Au-delà des éléments d'argumentation de nature biotechnique que nous souhaitons apporter dans l'éventail des études futures traitant des systèmes alimentaires durables avec Tyfa, il est clair que les changements sociaux et économiques induits par un tel scénario ne sont pas abordés sur de nombreux aspects. Pour n'en citer que quelques-uns : la reconnexion entre les cultures et l'élevage au niveau des exploitations et les besoins en main-d'œuvre dans un contexte de concentration des exploitations ; les changements dans les flux gérés dans la chaîne alimentaire et donc le modèle économique des industries alimentaires et des détaillants et, enfin, la volonté de payer des consommateurs. Bien que ces questions clés n'entrent pas dans le cadre de la modélisation biophysique de Tyfa présentée ici, elles doivent être examinées plus en détail pour assurer la cohérence de l'approche globale du scénario. Certains aspects étudiés par Aubert *et al.* (2021) ne sont pas développés dans ce chapitre, mais rappelons que les difficultés et les défis d'un tel scénario ne doivent pas être comparés à la situation actuelle, mais à d'autres futurs plausibles pour la production et la consommation alimentaire en 2050. Dans cette perspective, Tyfa doit être compris comme une alternative à une crise de production possible et plausible de l'agriculture européenne causée par la combinaison du changement climatique, de l'effondrement de la biodiversité au

niveau des paysages et des sols et de l'épuisement des ressources énergétiques et/ou minérales. Ainsi, les défis dans les domaines socio-économique et politique pourraient être d'une ampleur comparable à ceux induits par nos hypothèses. En comparaison, les conditions socio-économiques et politiques pour Tyfa pourraient devenir plus crédibles qu'elles ne le sont aujourd'hui.

Partie 3

Analyse transversale des travaux de prospective et de modélisation- évaluation de scénarios

Chapitre 11

Une grille d'analyse des approches de couplage pour mieux associer prospective et évaluation

Mathieu Vigne et Jonathan Vayssières

► Pourquoi une grille d'aide au choix de types de couplage ?

Si les travaux couplant prospective et modélisation-évaluation sont multiples, ils répondent tous à un objectif de praticabilité pour un large panel d'acteurs afin de favoriser l'aide à la décision et à l'action face à des problématiques. La littérature et les exemples abordés dans cet ouvrage et lors de l'école chercheurs offrent, au premier abord, une grande diversité de méthodes de prospectives et d'outils de modélisation-évaluation qui sous-entendent par conséquent une multitude de combinaisons possibles, c'est-à-dire un large panel de façons de mettre en œuvre le couplage. Face à ce large panel, les praticiens voulant mener une démarche couplant prospective et évaluation peuvent donc se sentir démunis, quelle que soit la commande. Est-il donc envisageable de construire un cadre théorique d'analyse du couplage qui guiderait ces praticiens vers le choix du type de couplage le plus pertinent selon la question posée initialement ?

La littérature offre de nombreuses revues des méthodes et outils, soit pour la prospective, soit pour l'évaluation, mais elles sont parfois parcellaires et aboutissent rarement à des recommandations. Par exemple, concernant les démarches de prospectives, le collectif Futuribles propose une boîte à outils qui recense les démarches, outils et logiciels disponibles²³. La difficulté de proposer un arbre de décision réside toutefois dans les nombreuses options qui s'offrent aux praticiens lors des différentes étapes d'une démarche de prospective. Concernant les méthodes d'évaluation, quelques références proposent une démarche d'aide à la décision pour la sélection d'une méthode d'évaluation de la durabilité de systèmes, dont des systèmes agricoles. Ainsi, l'Ademe (2020), à partir d'une cartographie de 17 méthodes d'évaluation environnementale, propose un logigramme décisionnel afin d'aider les praticiens à sélectionner une ou des méthodes adaptées à leur besoin. Celui-ci se décompose en 5 étapes durant lesquelles le praticien est invité à répondre à une question sur l'objectif de l'étude, sur son périmètre ou sur la présentation des résultats obtenus (figure 11.1). Toutefois cela ne concerne qu'une seule dimension parmi les nombreux critères possibles de l'évaluation. Lairez et Feschet (2016) proposent des arbres de classification sur la base de 42 méthodes et outils d'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles, traitant indifféremment de la durabilité dans son ensemble ou selon une seule dimension (environnement, bien-être

23. <https://www.futuribles.com/la-prospective/methodes-et-outils/la-toolbox/>

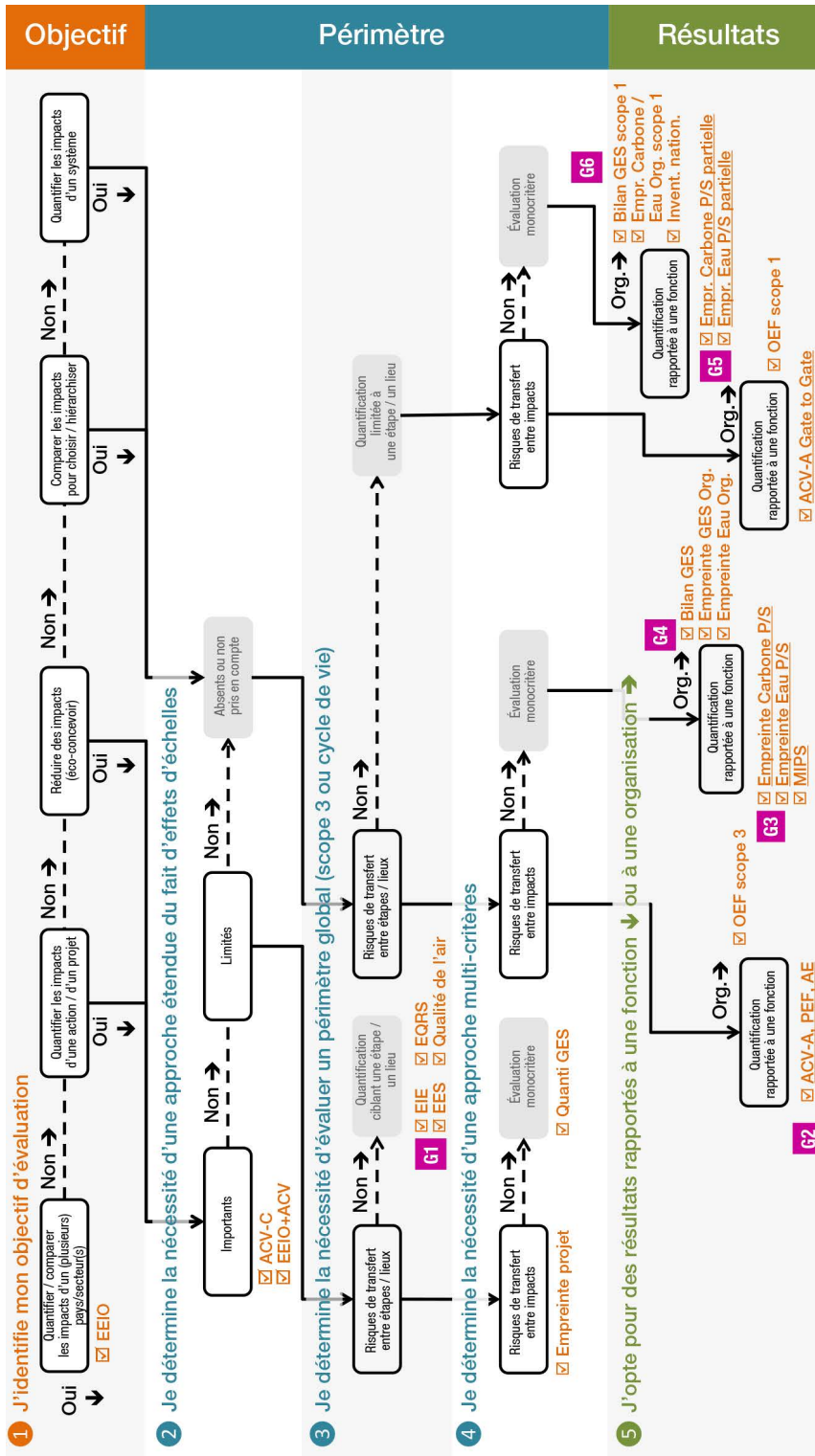


Figure 11.1. Représentation schématique d'un logigramme d'aide à la sélection des méthodes d'évaluation environnementale (source : Ademe, 2020).

animal ou technico-économique). Ces arbres ont pour objectif de guider le praticien dans son choix de méthodes. Ils sont ainsi tout d'abord déclinés selon l'objectif de l'évaluation, puis se décomposent en fonction de différents critères de différenciation selon l'objectif (figure 11.2) et s'avèrent en cela très utiles.

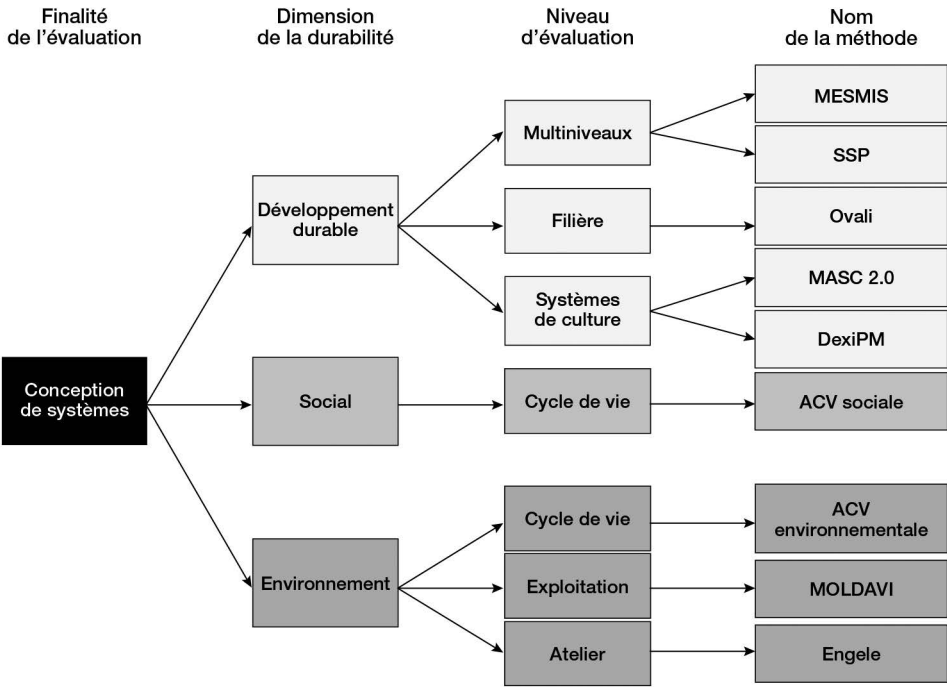


Figure 11.2. Arbres décisionnels guidant le choix de méthode d'évaluation multicritère selon Lairez et Feschet (2016).

Le couplage de deux approches (prospective et évaluation) qui peuvent être conduites indépendamment complexifie la démarche d'élaboration d'un outil d'aide à la décision. Un tel outil doit d'abord s'appuyer sur les critères de différenciation propres à chacune des deux approches. Les différentes méthodes de prospective et leurs critères de différenciation ont été abordés dans le chapitre 1. Pour rappel, les méthodes se différencient selon des critères tels que la construction ou non de scénarios, la nature des scénarios quand ils sont construits (exploratoires ou normatifs) ou encore la méthode de construction du scénario le cas échéant, le type d'acteurs impliqués et leur niveau d'implication notamment. Les critères de différenciation des méthodes d'évaluation des systèmes et du secteur de l'élevage sont au moins aussi nombreux, comme indiqué dans la partie 2. On peut noter par exemple l'échelle d'évaluation, si l'évaluation s'appuie ou pas sur un modèle de simulation, la nature de ce modèle (empirique ou mécaniste), le nombre d'indicateurs considérés (analyse monocritère ou multicritère), les dimensions de l'évaluation (technique, sociale, environnementale, économique, etc.) ou encore la nature des indicateurs produits (quantitatifs ou qualitatifs) ainsi que leur forme de représentation (indicateurs agrégés ou exprimés en valeurs brutes).

Toutefois, l'analyse ne peut se limiter aux uniques critères de différenciation propres à chacune des approches. Afin d'élaborer un outil d'aide à la décision pertinent, il s'agit maintenant de mieux comprendre quels sont les grands principes qui régissent les démarches de couplage et les différences dans leur mise en œuvre.

► Diverses places de l'évaluation dans la démarche de couplage

Parmi ces principes, Jahel *et al.* (2023) estiment que l'objectif et l'enchaînement sont des dimensions clés pour classer les démarches articulant des méthodes d'anticipation qualitatives et quantitatives. Concernant le couplage de la prospective et de l'évaluation, la place de l'évaluation dans la démarche nous apparaît être un critère de différenciation majeur de classification des types de couplage. Comme c'est le cas pour la démarche de prospective ou d'évaluation quand elles sont menées à part, une démarche couplant ces deux volets est guidée par une demande formulée par un acteur ou par des collectifs d'acteurs. Elle obéit au minimum à une démarche d'informations sur une problématique et de ses futurs possibles, mais elle est le plus souvent motivée par le désir d'actions et de transformation du système ou territoire étudié. Elle aboutit ainsi à un cycle, ou « boucle », qui peut être répété à de multiples reprises et de manière itérative pour améliorer et préciser les résultats et mieux répondre à la demande initiale (figure 11.3). Or, dans ce cycle et en terme chronologique, l'évaluation peut se situer en amont, en parallèle ou en aval de la prospective. Elle ne répond pas alors aux mêmes objectifs, même si elle peut mobiliser les mêmes outils.

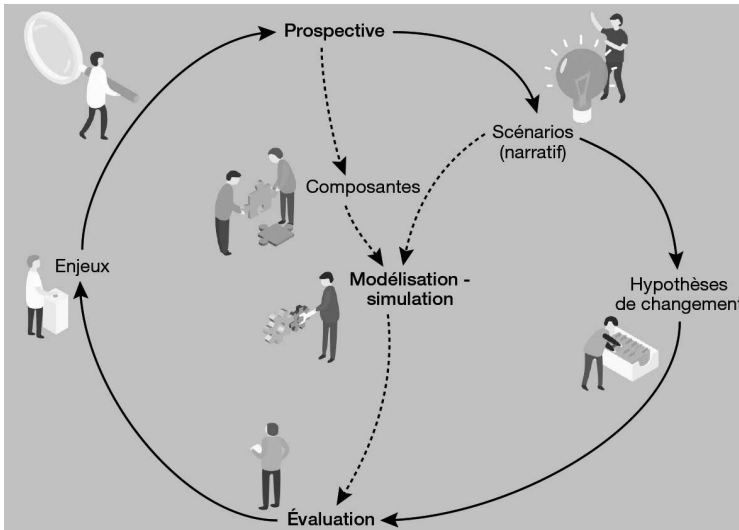


Figure 11.3. Représentation générique de démarches couplant prospective et évaluation.

Lorsqu'elle est située en amont de la prospective, l'évaluation peut servir à identifier et à informer les acteurs sur les enjeux. Elle peut alors être qualifiée d'« état des lieux » dans le cadre de l'étude prospective exploratoire à l'échelle de la région Bretagne (Marguet, chapitre 2) ou de « diagnostic » comme dans le cas de l'étude sur la transhumance

transfrontalière entre le Burkina Faso et le Togo (Sourisseau *et al.*, chapitre 3). Elle est alors mise à disposition des acteurs impliqués dans la démarche de construction des scénarios, en amont de celle-ci, favorisant l'appropriation de la problématique et des enjeux. Elle peut également permettre de les hiérarchiser, contribuant ainsi à recentrer la problématique autour de certains de ces enjeux, *via* la pré-sélection ou la construction d'indicateurs qui font sens pour les parties prenantes (Pierart, chapitre 4).

Lorsqu'elle est située en parallèle, elle permet le plus souvent de s'assurer de la pertinence des scénarios construits, au regard par exemple d'une limite de ressources disponibles. Dans le cas du scénario Afterres 2050 par exemple, une approche bilantielle à l'échelle nationale permet tout d'abord de vérifier l'équilibre des surfaces (Couturier, chapitre 9). Elle permet ainsi de crédibiliser les scénarios au regard de la réalité mais peut s'opposer à la construction de scénarios dit « de rupture » en limitant le domaine des possibles.

En aval, l'évaluation vise surtout à mesurer les conséquences des scénarios construits lors de la démarche prospective. Elle peut alors s'appuyer sur i) des évaluations qualitatives, qui visent à se projeter sur l'impact des évolutions potentielles, « à dire d'experts » ou ii) des outils d'évaluation quantitative, tels que les démarches de modélisation – simulation fondée sur outils tels que la plateforme Maelia (Therond, chapitre 7) ou le modèle Tyfam (Aubert et Poux, chapitre 10). Les plateformes de modélisation spatialement explicite et orientée agent telles que Maelia constituent des niveaux de raffinement en termes de prise en compte des interactions entre mécanismes biophysiques et décisionnels et de représentation de la complexité les plus aboutis. L'intégration des méthodes d'évaluation telles que l'ACV territoriale dans ces plateformes constitue également un front de recherche important pour encore accroître la qualité des évaluations des scénarios. Toutefois, cette évaluation ne constitue pas une fin en soi. En effet, les résultats d'une évaluation des scénarios peuvent être à nouveau mobilisés pour mieux redéfinir les enjeux, hiérarchiser les enjeux, ou même en faire apparaître de nouveaux une fois l'évaluation partagée avec les acteurs, s'inscrivant ainsi dans une démarche itérative (Lopez-Ridaura, 2005).

» La disponibilité des données au cœur du choix du type de couplage

Parmi les multiples modalités de couplage possibles, il est une étape inhérente à celles qui mobilisent des scénarios qualitatifs à des évaluations quantitatives et qui présente alors un défi méthodologique majeur : celui de transformer des narratifs en représentations quantitatives permettant leur évaluation.

Dans la plateforme Maelia par exemple, on peut résumer le besoin en données en deux types :

- des données géoréférencées permettant de décrire finement la structure du territoire et les situations d'action ;
- des données sur les dynamiques des processus écologiques et des activités humaines et leurs interactions (synthétisées sous forme de règles ou de fonctions mathématiques).

Même si, selon Therond, les modèles représentant ces processus nécessitent un effort de calibration mesuré, la calibration de la structure du territoire et de ses processus nécessite quoi qu'il en soit des références quantitatives. Or, celles-ci peuvent être faiblement disponibles, voire indisponibles dans certains contextes.

Concernant les données géoréférencées, la France, par exemple, dispose de nombreuses bases et plateformes fournissant des informations type SIG, notamment grâce à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Or, il est souvent difficile d'accéder à ce type de données dans de nombreux pays, en particulier dans les pays en voie de développement qui manquent de services dédiés. Pour y remédier, la recherche notamment tente depuis longtemps de développer des outils de cartographie permettant de cartographier l'utilisation des sols à partir de données satellites. Or, la précision de ce type d'approche se confronte parfois à des contraintes inhérentes aux conditions climatiques ou aux formes d'agriculture particulières de ces contextes (Lebourgeois *et al.*, 2017).

L'absence de données sur les cheptels animaux, sur leur fonctionnement et sur leur dynamique est un autre exemple emblématique de la faiblesse des données dans certains contextes. Aux États-Unis par exemple, le Service national des statistiques agricoles (National Agriculture Statistics Service, NASS) met à disposition des données sur les systèmes d'élevage, régulièrement mises à jour. En France, des données similaires sont produites annuellement par le Service de la statistique et de la prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (Agreste). Par ailleurs, des données plus fines sont disponibles auprès des instituts techniques agricoles et des chambres d'agriculture, notamment *via* les réseaux de fermes de référence. Or, ces services sont souvent coûteux et demandent un réseau d'acquisition d'informations important. Dans les pays en développement, l'existence ou les moyens mis à disposition de tels instituts et systèmes de suivi sont souvent limités. Au Mali comme à Madagascar par exemple, le dernier recensement général agricole date de la saison 2004-2005 comme conséquence de ces difficultés. Les données Faostat constituent alors la principale alternative pour des analyses à l'échelle nationale avec un certain nombre de limites déjà discutées dans le chapitre 1 (Mora et Bethinger). La caractérisation des systèmes agricoles, dont les systèmes d'élevage, peut également se faire à travers des études spécifiques visant le plus souvent à produire des typologies structurelles et fonctionnelles des systèmes. Mais là aussi, les moyens humains et financiers à engager font que la zone couverte est souvent limitée et ne permettent qu'une application de l'approche à des échelles locales.

La disponibilité des données permettant la construction, la modélisation-simulation et l'évaluation des scénarios apparaît donc ici comme un autre critère majeur dans la définition d'une typologie des cadres de couplage.

► D'une grille d'analyse à une typologie des cadres de couplage

Au regard de ces différents éléments, nous proposons donc une première grille d'analyse des différentes démarches de couplage (tableau 11.1).

Celle-ci s'articule autour de deux grands axes : le type de prospective (en lignes) et le type d'évaluation (en colonnes). Chacun de ces volets est ensuite décliné en différents critères de différenciation :

- la construction ou non de scénarios, le type des scénarios (exploratoires ou normatifs) et les modalités de construction des scénarios pour la prospective (avec ou sans participation d'acteurs locaux représentant les porteurs d'enjeux et les parties prenantes des systèmes étudiés) ;

Tableau 11.1. Positionnement des cas d'étude abordés dans l'ouvrage ou pendant l'école chercheurs dans la grille d'analyse des types de couplage (en rouge : cas d'étude faisant appel à la modélisation-simulation ; en bleu : cas d'étude ne faisant pas appel à la modélisation-simulation).

Prospectives	Évaluation			Évaluation des scénarios			Évaluation à différentes étapes								
	Évaluation qualitative	Évaluation quantitative	Évaluation qualitative et quantitative	Évaluation qualitative	Évaluation quantitative	Évaluation qualitative et quantitative	Évaluation qualitative	Évaluation quantitative	Évaluation qualitative et quantitative						
Avec construction de scénario	Scénarios exploratoires	Approches participatives	Type 2	Type 1	GASL	MAELIA Agricultures bretonnes 2040	Transhumance apaisée								
		Sans acteurs locaux													
	Scénarios normatifs	Approches participatives								Type 3					
		Sans acteurs locaux													
Sans construction de scénario	Scénarios exploratoires	Approches participatives													
	Scénarios normatifs	Sans acteurs locaux													

– la place de l'évaluation dans la démarche globale (seulement pour l'évaluation des scénarios ou à différentes étapes du processus) et le type d'évaluation (qualitative, quantitative ou les deux).

Le positionnement des différents cas d'étude abordés dans cet ouvrage ou dans l'école chercheurs peut laisser apparaître quelques grands types de couplage (tableau 11.1).

Le type 1 implique une démarche *bottom-up* dont la demande est plutôt orientée par les acteurs locaux à partir d'une problématique locale concrète, clairement identifiée. L'échelle traitée est ainsi plus fine (du petit territoire à la région). Les acteurs locaux, au-delà de la formulation de la problématique, participent à la co-construction des scénarios mais aussi parfois à leur évaluation (notamment quand l'évaluation est qualitative). Cette évaluation peut être menée tout au long de la démarche, à la fois en amont pour élaborer un diagnostic de la situation et des enjeux, notamment du fait de l'échelle réduite qui permet de produire des données plus facilement, ou/et en aval de la construction des scénarios pour évaluer les scénarios. Cette évaluation des scénarios peut être qualitative, quantitative ou les deux, selon les enjeux identifiés, la disponibilité des données vis-à-vis du territoire étudié et la disponibilité d'outils de modélisation-évaluation *ad hoc*. L'évaluation fondée sur des plateformes de modélisation spatialisées orientée agent comme Maelia (Therond), Gama (Taillandier *et al.*, 2012) ou Corma (Bommel *et al.*, 2016) ou orientée interactions du type Ocelet (Degenne, Lo Seen, 2016) se prêtent particulièrement à cet exercice puisqu'elles permettent de représenter les différents acteurs et leurs interactions, en lien avec la dynamique des processus biophysique (par exemple : croissance des plantes, évolution des cheptels animaux) et de l'environnement (par exemple : évolution du climat et de la réglementation).

Les types 2 et 3 regroupent plutôt des démarches *top-down* couvrant des échelles larges (un pays, un continent ou le monde), intégrant des dynamiques de grande ampleur (croissance démographique, changement d'habitudes alimentaires, etc.) et répondant généralement à des enjeux globaux tels que le changement climatique ou la sécurité alimentaire. Celles-ci sont souvent pilotées par la recherche et elles visent généralement à éclairer les politiques publiques ou à produire des plaidoyers. Elles utilisent souvent des modèles d'équilibre (partiel ou général) plus simples que les modèles mobilisés dans le type 1. Au travers d'échelles d'analyse plus larges, elles autorisent une granularité moins fine. Elles diffèrent toutefois par le type de scénario construit. Les démarches du type 2 étudient des scénarios exploratoires, visant à ouvrir le domaine des possibles, alors que les démarches de type 3 étudient plutôt des scénarios normatifs visant à l'atteinte d'objectifs spécifiques pré-identifiés.

► Conclusion et perspectives

Dans cet ouvrage, la confrontation de diverses méthodes de prospective et d'évaluation, ainsi que l'analyse de diverses façons de réaliser le couplage de ces deux approches nous permettent aujourd'hui de proposer une première grille d'analyse des façons de coupler prospective et évaluation. Toutefois, cette première grille n'offre pour le moment qu'une vision parcellaire des différents types de couplage car elle s'appuie sur un nombre de cas d'études limités. Par exemple, aucune démarche impliquant des prospectives sans construction de scénario n'a été abordée durant l'école chercheurs ni ne fait l'objet de chapitre dans cet ouvrage. On peut ainsi légitimement se demander comment l'évaluation pourrait intervenir en complémentarité de ce type de prospec-

tive, si ce n'est en aval pour l'identification des enjeux. Plus largement, on peut également se questionner sur des contraintes potentielles à croiser certains types de prospectives et d'évaluation. Par exemple, le besoin en données des méthodes et outils sélectionnés n'est pas considéré dans cette grille d'analyse, alors que la disponibilité des données a été identifiée comme un critère de différenciation potentiellement important, voire comme un déterminant du choix de méthode d'évaluation ; les évaluations mobilisent ou pas des modèles de simulation dont la granularité dépend directement de la disponibilité des données. Réciproquement, le degré de finesse que requièrent certains outils de modélisation peut induire un niveau élevé d'exigence et de finesse dans l'étape d'élaboration des scénarios pendant la prospective (voir le chapitre 12). Par ailleurs, dans cette première grille, les cas d'étude sont mis en lumière selon l'utilisation ou non de modèle de simulation. Toutefois, l'analyse de leurs caractéristiques (statique ou dynamique, empirique ou mécaniste, spatialisé ou non, etc.) au regard des différentes méthodes de prospective pourrait s'avérer utile pour mieux cerner les potentiels complémentarités ou incompatibilités entre les différentes méthodes et outils mobilisés par les deux approches.

Il existe donc un enjeu majeur à approfondir et à élargir l'analyse des expériences de couplage entre prospective et évaluation. Cela permettra de croiser plus de critères de différenciation pour en tirer des recommandations générales. Celles-ci pourront prendre la forme de représentations schématiques de grands groupes de méthodes, voire aboutir à des arbres de décision de choix de type de couplage qui guideront alors les praticiens selon leurs besoins et leurs contraintes. Cela les aidera de plus à mieux connaître et à penser ensemble les différentes méthodes de prospectives et les différents outils de modélisation et d'évaluation avec à terme non plus un simple couplage mais potentiellement une véritable intégration de ces différentes approches.

Chapitre 12

Composantes des systèmes agri-alimentaires et variables des scénarios prospectifs

Aurélie Wilfart, Olivier Mora et Sandrine Espagnol

Ce chapitre a pour objectif de donner des repères pratiques pour accompagner les démarches de construction de scénarios, leurs modélisations et leurs évaluations. Il a pour but de recenser les variables clés, les données et leurs sources mobilisées dans le cadre des différents travaux présentés dans cet ouvrage pour faciliter une mise en œuvre future. En effet, les données et leurs sources ont été identifiées comme un des plus importants facteurs limitant la mise en œuvre de scénarios et leur évaluation dans les ateliers de l'école chercheurs.

Dans plusieurs des prospectives présentées dans cet ouvrage, les scénarios construits et évalués décrivent un système agri-alimentaire avec plusieurs composantes qui peuvent être, de manière exhaustive : la démographie de la population humaine, les régimes alimentaires et les chaînes d'approvisionnement associés, les autres usages non alimentaires de biomasses, les usages des sols, les systèmes agricoles et les liens avec d'autres territoires *via* les importations et les exportations (figure 12.1). Ces composantes sont interdépendantes et constituent un système avec des cohérences internes. Les prospectives utilisées dans cette synthèse sont : à l'échelle France, Afterres 2050 (chapitre 9) et Sisae (Barbier *et al.*, 2022), avec ses quatre scénarios,

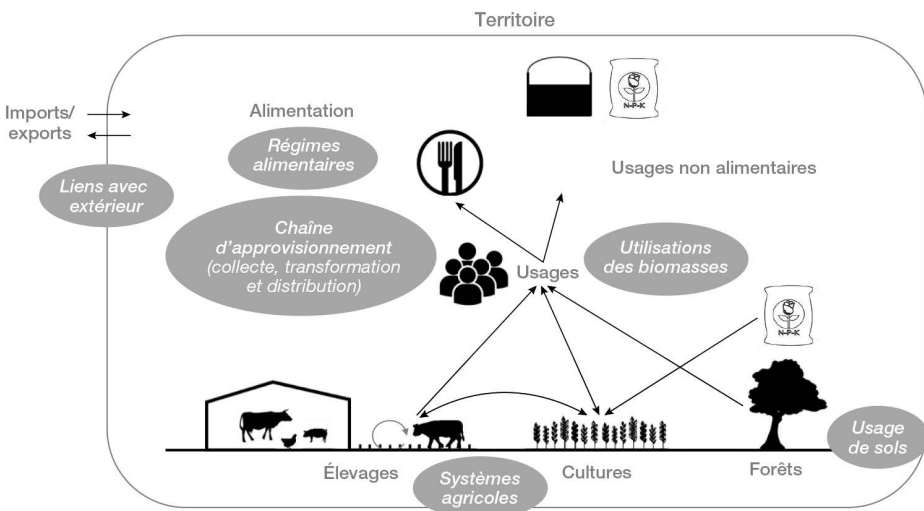


Figure 12.1. Composantes des systèmes agri-alimentaires des scénarios prospectifs.

qui constitue la partie alimentaire de Transition(s) 2050 (chapitre 4); à l'échelle européenne, Tyfa (chapitre 10); et à l'échelle mondiale, Agrimonde-Terra (chapitre 5).

► Hypothèses et données d'arrière-plan des scénarios prospectifs

Système alimentaire

Le système alimentaire repose sur des hypothèses de taille de population humaine, avec ou sans prise en compte d'une diversité d'individus suivant le sexe, la classe d'âge et les catégories socio-professionnelles. Par ailleurs, il peut être représenté par un régime alimentaire considéré comme unique ou comme une combinaison de différents régimes. Sisae, par exemple, considère un mix de 8 régimes alimentaires distincts entre omnivore (avec différentes consommations journalières de viande comprises entre 50 et 170 g), flexitarien (consommations journalières de viande comprises entre 20 et 50 g) et végétarien (voir tableau 12.1), alors qu'Agrimonde-Terra considère quatre hypothèses alternatives de régime alimentaire (tableau 12.2).

Une autre variable du système alimentaire est le contenu énergétique de la diète. Parmi les quatre hypothèses de régime alimentaire proposées par Agrimonde-Terra, on trouve l'hypothèse « Régimes sains » qui suit les recommandations nutritionnelles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Celle-ci correspond à l'échelle européenne à une réduction des quantités de calories ingérées quotidiennement²⁴ de 3336 kcal/j en 2010 à 3000 kcal/j en 2050 (– 11 %), à un doublement des apports en légumineuses et en fruits et légumes (de 200 kcal/j en 2010 à 450 kcal/j en 2050) et à une réduction de la consommation des viandes et des produits laitiers de 31 % (soit une réduction des calories ingérées de 794 kcal/j en 2010 à 540 kcal/j en 2050) afin de contribuer à la réduction de la surnutrition. Le scénario Tyfa (Europe) descend quant à lui jusque 2450 kcal/j/personne, alors que le scénario « Génération frugale » de Sisae (France) prévoit pour 2050 une réduction de 28 % des calories ingérées par rapport à 2020.

Le régime alimentaire peut également être qualifié par la part de la diète en produits sous label. Afterres 2050 considère par exemple 55 % de labels (avec des productions biologiques ou races locales) pour les produits porcins contre 5 % aujourd'hui. Des hypothèses de gaspillage alimentaire sont également considérées; elles font le lien entre les productions agricoles et la consommation. Les bases de gaspillage alimentaire initiales varient entre 155 et 260 kg/personne/an en France, respectivement pour Sisae et Afterres 2050. Les hypothèses de réduction de gaspillage vont de – 10 à – 50 % selon Tyfa, Sisae et le scénario « Régimes sains » d'Agrimonde-Terra.

Occupation du territoire

Dans les scénarios, l'occupation du territoire définit la part de celui-ci dédié à l'agriculture mais également la part en forêt. La partie agricole dépendra des types de productions considérées et de leur part relative. Dans les perspectives visant une réduction des

24. Les données mobilisées dans Agrimonde-Terra sont issues de la base de données de la FAO (Faostat). Les chiffres fournis par Faostat correspondent à une disponibilité calorique (et non pas aux calories ingérées), car ils intègrent les gaspillages à l'échelle de la transformation, de la distribution et de la consommation.

GES (Sisae, Tyfa et Afterres 2050, scénario « Régimes sains » d'Agrimonde-Terra), les principales modifications, en comparaison de la situation actuelle, portent sur une réduction en volume des productions animales et en céréales et sur une augmentation des productions en légumineuses et en fruits et légumes. Les différences observées entre prospectives tiennent aux variations absolues (augmentation ou réduction) des catégories, d'une part, et aux variations relatives entre catégories, d'autre part. Par exemple, la réduction des productions animales dans Tyfa porte essentiellement sur les effectifs monogastriques (maintien des effectifs bovins viande, -20 %, -70 % et -50 % pour les bovins lait, la volaille de chair et le porc, respectivement), dans Afterres 2050 la réduction touche tous les effectifs animaux (-20 %, -60 %, -50 %, -35 % pour les bovins viande, les bovins lait, la volaille de chair et le porc, respectivement), tout comme dans Agrimonde-Terra où les productions animales toutes productions confondues sont réduites de 16 % dans le scénario « Régimes sains ».

Le devenir des prairies est une variable d'importance dans les scénarios en raison de leur étroite relation avec les productions d'herbivores mais également de leur capacité à stocker du carbone et à proposer des espaces de biodiversité. Ainsi, dans le scénario « Régimes sains » d'Agrimonde-Terra, en conséquence de la réduction de la production de ruminants, les prairies sont réduites de 25 % en Europe sans pour autant être converties en terres arables (dont les surfaces se réduisent également, jusqu'à -6 % dans ce scénario). Cela pose la question du devenir en 2050 des prairies en Europe qui pourraient évoluer en friches et éventuellement devenir des forêts, ou bien être maintenues pour la production de biomasse énergétique. Dans une hypothèse d'évolution des prairies vers des forêts, et dans un contexte où la surface agricole nécessaire en Europe diminue, le scénario « Régimes sains » montre que la surface des forêts européennes pourrait s'accroître de 12 à 16 %. Il faut ici préciser que les résultats pour ce scénario de la prospective Agrimonde-Terra est un scénario mondial; la demande alimentaire diminue partout dans le monde, ce qui n'entraîne pas de pression sur l'agriculture européenne pour qu'elle accroisse les surfaces en Europe (*i. e.* la demande dans le reste du monde ne tire pas la croissance des exports de l'UE).

La part de légumineuses dans l'occupation des sols est également une forte variable d'ajustement : elle joue sur la capacité du système global à fixer de l'azote symbiotique et ainsi à réduire le recours aux engrais minéraux. Ainsi, Tyfa propose un scénario sans engrais minéraux où près de deux tiers de l'azote nécessaire aux cultures provient de la fixation symbiotique. Le potentiel de fixation symbiotique des légumineuses constitue de fait une variable déterminante des travaux de modélisations des systèmes agri-alimentaires (Billen *et al.*, 2014). Une autre source d'azote provient des effluents issus des élevages dont la répartition spatiale sur le territoire conditionnera leur possible valorisation agronomique. Cette question de la répartition des activités sur le territoire peut suivre deux logiques : une logique de « *land sparing* » qui vise à concentrer sur une partie du territoire des activités efficientes et productives pour libérer des hectares avec de forts intérêts écologiques, par opposition à une logique de « *land sharing* » qui a pour objectif d'occuper tout le territoire en combinant production et préservation de la biodiversité (Green *et al.*, 2015; Blanfort *et al.*, 2019).

Systèmes agricoles

Les systèmes agricoles correspondent aux productions agricoles retenues dans les scénarios. Ces productions peuvent être de différentes natures : conventionnelle,

biologique, agroécologie, ou traditionnelle, et être présentes en différentes proportions dans un même territoire. Cela a un impact sur la productivité unitaire, sur l'emprise au sol et sur les impacts environnementaux. Au niveau des élevages, les modes de logement et la part en bâtiment conditionnent les types d'effluents et la capacité à les collecter pour une valorisation agronomique, mais également la proportion de paille exportée des parcelles agricoles utilisée comme litière pour les animaux. L'insertion des légumineuses dans les rotations culturales est mise en œuvre dans la plupart des scénarios, soit en culture principale, soit en cultures associées et en interculture. Les intercultures sont fortement généralisées dans les prospectives Tyfa et Sisae par rapport à la situation actuelle. L'entrée d'azote associée à la fixation symbiotique dépend aussi fortement des taux de fixation symbiotique retenus, variables entre prospectives.

L'occupation des sols et les systèmes agricoles du territoire considéré dans les prospectives définissent une production agricole annuelle. Une partie sert à l'alimentation humaine et animale (y compris pour de l'exportation) et une autre partie est souvent mobilisée pour un usage de production d'énergie renouvelable en combustion ou en méthanisation. Dans les scénarios Sisae, la production de biomasse à usage non alimentaire à l'échelle de la France est multipliée par près de quatre avec une utilisation majoritaire en méthanisation. Ainsi, les capacités de production en produits agricoles du territoire imposent de définir des priorités d'usages. Elles s'avèrent similaires entre les prospectives avec une priorité donnée à l'alimentation humaine. L'alimentation animale est ensuite privilégiée à l'usage énergétique (couverture des besoins alimentaires des animaux), mais la biomasse libérée par la réduction des effectifs animaux est réorientée vers la valorisation énergétique (méthanisation), à l'exception du scénario Tyfa qui fait le choix d'un recours limité à la méthanisation, puisque, dans ce scénario, les prairies ne sont utilisées qu'une année sur cinq pour la production de biogaz.

Importations et exportations : équilibrer l'offre et la demande et boucler des cycles

Les activités humaines engendrent des besoins qui sont rarement intégralement couverts par la capacité de production en biomasses alimentaires et non alimentaires du territoire (France ou Europe). De fait, des importations sont nécessaires pour combler une partie de ces besoins. À l'inverse, certaines productions sont excédentaires et sont donc exportées. Ces paramètres ne sont pas forcément considérés comme des variables d'ajustement dans le système agri-alimentaire. Les prospectives Tyfa et Afterres 2050 ont, par exemple, choisi comme hypothèse de construction de leur scénario de maintenir, voire d'augmenter une part d'exportation pour maintenir la balance commerciale. Dans Tyfa, 30 % de la production en céréales sont maintenus à l'exportation à destination des pays méditerranéens et le scénario génère un surplus en produits laitiers pouvant être exportés correspondant à 20 % de la production laitière. Dans le scénario « Régimes sains » de la prospective Agrimonde-Terra, en conséquence de la transformation des régimes alimentaires, les importations totales à l'échelle européenne se réduisent fortement (– 27 %), et en particulier les importations pour l'alimentation animale (– 57 % sur les importations de soja grain et – 89 % sur les tourteaux de soja), tandis que les exportations augmentent de plus de 50 %.

Les scénarios des perspectives lorsqu'ils sont évalués s'assurent d'une cohérence interne en s'assurant d'équilibrer l'offre et la demande et de boucler des cycles des nutriments. Par exemple, les besoins en azote des cultures sont couverts par les effluents d'élevage épandus, par l'azote fixé par les légumineuses et éventuellement par les engrais minéraux. La cohérence des scénarios repose sur l'adéquation entre les besoins en produits agricoles et leur production en tenant compte de leur répartition spatiale respective.

Les tableaux 12.1, 12.2, 12.3 et 12.4 présentent le détail des variables descriptives et des hypothèses adoptées dans les scénarios Sisae, Agrimonde-Terra, Tyfa, Afterres 2050 avec les sources mobilisées indiquées dans les différentes publications.

Tableau 12.1. Détails des variables descriptives des scénarios Sisae : scénario de référence et prospectifs (en italique).

Variables	Scénarios Sisae
Régimes alimentaires	
Taille de la population	Taille de la démographie issue de Insee (2017), <i>ainsi que</i>
Types de régimes	<i>les hypothèses d'évolution (scénario fécondité basse, espérance de vie</i>
Contenu des diètes	<i>centrale et migration centrale).</i>
(énergie, protéines, type	Données de comportement alimentaire provenant d'Inca3, Ademe
de produits, part labels...)	(2016), Bionutrinet avec deux principaux profils de consommateurs
Gaspillage alimentaire	omnivores 170 g, omnivores 75 g qui représentent 86 %. Pertes et
	gaspillages alimentaires considérés : 155 kg/personne/an.
	<i>Baisse de consommation de viande allant de 10 (S4) à 70 % (S1);</i>
	<i>part du bio dans l'alimentation allant de la situation actuelle (S4)</i>
	<i>jusqu'à 70 % (S1).</i>
	<i>Quatre groupes de consommateurs différents : omnivores 170g,</i>
	<i>omnivores 75g, flexitariens 30g et végétariens avec différentes</i>
	<i>proportions dans les 4 scénarios. Les deux premiers groupes restent</i>
	<i>inchangés dans le S4 et sont réduits jusqu'à 39 % dans le S1.</i>
	<i>Hypothèse de quantités consommées toutes réduites par rapport</i>
	<i>au scénario de référence, de - 10 (S4) à - 30 % (S1 frugale).</i>
Usages des sols	
Types de productions	Surfaces en productions biologiques : 2,3 Mha (8,5 % SAU France)
(animales et végétales)	(Agence Bio) ; cheptels (Citepa, 2019).
Répartition sur le territoire	<i>Logiques différentes entre les scénarios : plutôt land sparing pour S4</i>
	<i>et land sharing pour S1et S2.</i>
Changement	<i>Augmentation des oléo protéagineux dans S1. Augmentation</i>
d'occupation des sols	<i>de la SAU dans S2 (+ 2 Mha) avec une augmentation des oléo</i>
	<i>protéagineux et des surfaces en fruits et légumes. Recul de la SAU</i>
	<i>(- 2 Mha) dans S3 sans modification signification de la répartition</i>
	<i>des productions par rapport au scénario tendanciel. Recul de la SAU</i>
	<i>également dans S4 du fait, d'une artificialisation qui atteint 7 Mha.</i>
Quantité de légumineuses	<i>Augmentation des légumineuses dans les rotations : + 40 % dans S4</i>
dans les rotations	<i>et jusqu'à une multiplication par près de 5 dans S2.</i>
Quantité de prairies	Surface en prairies permanentes de 9,3 Mha (Ademe).
permanentes	<i>Maintien de ces surfaces dans les quatre scénarios.</i>

Variables	Scénarios Sisae
Usages des sols	
Haies et agroforesterie	Linéaire de haies de 500 000 km (Pointereau, 2006) et agroforesterie sur 140 000 ha. <i>Augmentation du linéaire de haies jusqu'à 930 000 km dans S1 et augmentation de l'agroforesterie jusqu'à 1 500 000 ha dans S2.</i>
Forêt	<i>Développement de la forêt avec +4 Mha (S1) et relative stabilisation dans les autres scénarios.</i>
Systèmes agricoles	
Modes de production (conventionnels, biologiques)	<i>Systèmes à bas intrants de synthèse entre 10 (S4) et 70 % de la SAU (S1); production intégrée entre 20 (S4) et 30 % (S1) de la SAU et système conventionnel raisonné entre 100 (S4) et 0 % (S1). Développement de l'aquaculture dans S4.</i>
Rendements	Données de rendements issues de Reganold et Watcher (2016). <i>Amélioration des rendements pour S4 (+10 % pour le blé) et plutôt réduction des rendements pour les autres scénarios (jusqu'à -27 % pour le blé dans S2).</i>
Pesticides	<i>Forte baisse de l'utilisation de pesticides dans S1.</i>
Azote symbiotique	Fixation symbiotique en France évaluée à 338 kt N (Ademe). <i>Part d'azote utilisé provenant de la fixation symbiotique allant de 15 (S4) à 45 ou 55 % respectivement pour S1 et S2.</i>
Interculture	Couverts végétaux France : 1 092 000 ha (Ademe) <i>Augmentation des couverts végétaux, multipliés par 4,5 dans S4 et par 15-16 dans S1 et S2.</i>
Stockage de carbone	Données pour la forêt provenant de Roux <i>et al.</i> (2017) pour la biomasse et de Pellerin <i>et al.</i> (2019) pour le sol. Changement d'occupation des terres issu de ClimaAgri® avec un amortissement sur 20 ans selon les recommandations du GIEC (2006). Données relatives aux prairies permanentes et aux sols agricoles issues des travaux de Pellerin <i>et al.</i> (2019).
Alimentation des animaux d'élevage	<i>Part d'alimentation plus à l'herbe dans S1 et S2 et moins à l'herbe dans S4 pour les bovins (1/3 du cheptel laitier en zéro pâturage). Diminution de l'importation de tourteaux de moitié dans S3 et S4 et suppression dans S1 et S2.</i> <i>Dans S4, l'entomoculture fournit 25 % des protéines consommées par les élevages de volailles et de poissons.</i>
Performances techniques des élevages	<i>Amélioration des performances dans S4 (productivité laitière améliorée de 38 %) et diminution des performances dans S1 et S2 (réduction de la productivité laitière de 16 %).</i>
Temps de présence des animaux en bâtiment	<i>Présence en bâtiment, sans pâturage, dans S4 pour les systèmes laitiers, et jusqu'à 70 % de systèmes avec pâturage dans S1 et S2.</i>
Usages des biomasses	
Usage des biomasses (alimentation humaine, animale, méthanisation, biocarburant...)	Données sur les surfaces mobilisées pour les biocarburants issues de Pellerin <i>et al.</i> (2013) : 800 000 ha (2015) soit 3 % SAU (FranceAgrimer).

Variables	Scénarios Sisae
Liens avec l'extérieur	
Importations (notamment des sources de protéines pour l'alimentation animale) et exportations	Importations de soja de 3,5 Mt (2017 ; Barbier <i>et al.</i> , 2020) et de 7 000 kt de fruits et légumes. Exportations de 26 000 kt de céréales. <i>Réductions des importations en fruits et légumes d'environ 10 % pour S4 et presque en totalité pour S1; maintien des exportations en céréales pour S4 et jusqu'à 30 % de ces dernières dans les autres scénarios.</i>

Tableau 12.2. Détails des variables descriptives et hypothèses du scénario « Régimes sains » de la prospective mondiale Agrimonde-Terra à l'échelle européenne.

Variables	Scénario Agrimonde-Terra
Régimes alimentaires	
Taille de la population	Projection médiane de l'Onu en 2050 : 9,7 milliards d'habitants (World Population Prospects, 2015)
Types de régimes	Quatre hypothèses d'évolution alternatives à 2050 des régimes alimentaires :
Contenu des diètes (énergie, protéines, type de produits, part labels...)	– Transition vers des régimes à base de produits ultra-transformés ;
Gaspillage alimentaire	– Transition vers des régimes à base de produits animaux ;
	– Diversité régionale des régimes et des systèmes alimentaires ;
	– Régimes sains fondés sur une diversité alimentaire
	Calories disponibles incluant gaspillages (dans la distribution et la consommation). Quantification à partir des données Faostat 2010 retravaillées (Le Mouél <i>et al.</i> , 2018b).
	<i>Régimes sains en 2050, d'après les recommandations de l'OMS (2003)</i>
	<i>Principes généraux de l'hypothèse régimes sains :</i>
	– <i>Réduction de l'apport calorique à 3 000 kcal/j pour les régions où régimes sup. à 3 000 kcal/j (avec réduction de moitié des gaspillages), et augmentation à 2 750 kcal/j pour les régions où régimes inf. à 2 750 kcal/j</i>
	<i>15 % de fruits et légumes, 20 % max. de produits animaux et légumineuses, 10 % d'huiles végétales et 2,5 % de sucres et édulcorants</i>
	– <i>Réduction des produits ultra-transformés</i>
	<i>Traduction de l'hypothèse « Régimes sains » pour l'UE27 :</i>
	– <i>Réduction de 10 % des calories : de 3 336 kcal/j en 2010 à 3 000 kcal/j en 2050</i>
	– <i>Doublément de la consommation de légumineuses et de fruits et légumes : de 200 kcal/j en 2010 à 450 kcal/j en 2050</i>
	– <i>Baisse de la consommation de viandes et des produits laitiers en 2050 : – 31 %, de 794 kcal/j en 2010 à 540 kcal/j en 2050</i>
Usages des sols	
Types de productions (animales et végétales)	Pour le scénario « Régimes sains »
	<i>Global :</i>
	<i>Surface arable évolue de 1 535 millions ha en 2010 à [1 479; 1 583] millions ha en 2050, soit [– 4 % ; + 3 %]</i>
	<i>Surface en prairies permanentes évolue de 3 338 millions ha en 2010 à [3 423; 3 357] millions ha en 2050, soit [+ 2,5 % ; + 6,5 %]</i>
	<i>Évolution de la surface agricole totale entre 2010 et 2050 : [+ 0,6 % ; + 5,5 %]</i>

Variables	Scénario Agrimonde-Terra
Usages des sols	
Types de productions (animales et végétales)	UE27 : <i>Réduction de la surface arable de 121 millions ha en 2010 à [113,5; 119] millions ha en 2050, soit [– 6,2 %; – 1,6 %]</i> <i>Réduction de la surface en prairies permanentes de 68 millions ha en 2010 à [50,5; 51] millions ha en 2050, soit [– 25,7 %; – 25 %]</i> <i>Réduction de la surface agricole totale de 189 millions ha en 2010 à [164; 170] millions ha en 2050, soit [– 13,2 %; – 10 %]</i>
Changement d'occupation des sols	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Réduction des surfaces arables et en prairie permanente pour l'UE27</i>
Quantité de légumineuses dans les rotations	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Augmentation des légumineuses dans les rotations pour répondre à la demande alimentaire</i> <i>Légumineuses UE27 : de 1,33 million ha en 2010 (1,1% de la surface arable) à [1,66; 1,87] million ha en 2050, soit [+ 1,5 %; + 1,6 %]</i>
Quantité de prairies permanentes	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Diminution de la surface en prairies permanentes dans l'UE27 entre 2010 et 2050 : [– 25,7 %; – 25 %]</i>
Haies et agroforesterie	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Augmentation des infrastructures agroécologiques (non quantifié)</i>
Forêt	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Augmentation de la surface en forêt dans l'UE27 : de 156 millions ha en 2010 à [175; 181,5] million ha en 2050, soit [+ 12 %; + 16 %]</i>
Systèmes agricoles	
Modes de production (conventionnels, biologiques)	Quatre hypothèses d'évolution alternatives à 2050 des systèmes de culture : (i) Intensification conventionnelle; (ii) Intensification durable; (iii) Agroécologie; (iv) Effondrement des systèmes de cultures. Le scénario « Régimes sains » est simulé selon deux options : – Système en Agroécologie : <i>diversification des cultures, couplage culture-élevage, infrastructures écologiques et régulations biologiques de l'écosystème, bas niveau d'intrants externes (Altieri, 2011; Malézieux, 2012);</i> – Système en Intensification durable : <i>intensification de la production, technologies de précision, haut niveau d'intrants externes, réduction de l'impact environnemental grâce à maximisation de l'efficacité des intrants (Griffon, 2010).</i>
Rendements	Hypothèses d'évolution des rendements par groupes de cultures (céréales, cultures protéiques, autres cultures) : réduction des écarts entre rendements potentiels et rendements observés (données de rendements potentiels issues de Gaez). <i>Réduction de l'écart de rendements entre 2010 et 2050 : – 40 % pour « Intensification durable », – 30 % pour « Agroécologie ».</i> <i>Les rendements projetés en 2050 subissent l'impact du changement climatique. Dans le scénario « Régimes sains » néanmoins, la trajectoire de changement climatique est maîtrisée et les rendements de 2050 ne sont pas impactés.</i>

Variables	Scénario Agrimonde-Terra
Systèmes agricoles	
Pesticides	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Forte baisse de l'utilisation de pesticides dans les systèmes en agroécologie (non quantifié)</i>
Azote symbiotique	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Systèmes en agroécologie fondés sur rotations diversifiées incluant légumineuses (non quantifié)</i>
Interculture	
Stockage de carbone	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Stockage du carbone dans les systèmes en agroécologie (non quantifié)</i>
Systèmes d'élevage	
Types de systèmes d'élevage	Cinq produits animaux considérés : lait, viande bovine, viande de petit ruminant, viande de porc, viande de volaille et œufs; Différents systèmes d'élevage pour les produire : ruminants (mixte/pâturage/urbain/autre), monogastriques (urbain/autre) (d'après Herrero <i>et al.</i> , 2013). <i>Cinq hypothèses d'évolution alternative à 2050 des systèmes d'élevage : élevage conventionnel intensif (intensif); élevage conventionnel intensif avec ressources locales (intensif et local); élevage agroécologique en synergie avec l'agriculture ou l'urbanisation (agroécologique); élevage de basse-cour (basse-cour); élevage minimisant la concurrence pour la terre avec l'agriculture (élevage sur terres marginales). Pour chaque hypothèse, par espèce, évolution différenciée de la part des différents systèmes et du coefficient quantité de matière sèche ingérée/quantité de produit animal produit de chaque système.</i>
Alimentation des animaux d'élevage	Composition des rations et coefficients inputs/outputs (quantité de matière sèche ingérée/quantité de produit animal produit) : Situation initiale 2010, d'après Herrero <i>et al.</i> (2013); Projections sous les différentes hypothèses d'évolution des systèmes d'élevage, basées sur les projections de Bouwman <i>et al.</i> (2005) à 2030 prolongées jusqu'en 2050.
Performances techniques des élevages	Performances mesurées par les coefficients inputs/outputs, quantité d'aliments ingérée par quantité de produit animal produit. Projections de Bouwman <i>et al.</i> (2005) prolongées à 2050. <i>Évolution limitée des performances techniques des élevages, excepté amélioration pour l'Afrique de l'Ouest, l'Afrique de l'Est, du Centre et du Sud, l'Inde et le reste de l'Asie en ce qui concerne les secteurs de ruminants.</i> <i>UE27 (dans le scénario « Régimes sains ») :</i> – Réduction de la production totale de calories animales de 16 % entre 2010 et 2050. – Variation des exportations entre 2010 et 2050 de [– 10 %; + 31 %] en fonction du système d'élevage simulé. – Réduction des importations de calories animales de 30 % entre 2010 et 2050.
Temps de présence des animaux en bâtiment	Non précisé

Variables	Scénario Agrimonde-Terra
Usages des biomasses	
Usage des biomasses (alimentation humaine, animale, méthanisation, biocarburant...)	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Global : 106 millions d'ha dédiés à la production de biomasse à destination énergétique en 2050 dans l'hypothèse de stabilisation du changement climatique (intégrée au scénario « Régimes sains »).</i> <i>UE27 : 6,8 millions d'ha consacrés à la production de biomasse à destination énergétique dans le scénario « Régimes sains ».</i>
Liens avec l'extérieur	
Importations (notamment des sources de protéines pour l'alimentation animale) et exportations	Pour le scénario « Régimes sains » <i>UE27 :</i> – <i>Réduction des importations totales de 27 % entre 2010 et 2050.</i> – <i>Augmentation des exportations totales de [52 % ; 59 %], entre 2010 et 2050.</i> – <i>Réduction des importations d'alimentation pour l'élevage entre 2010 et 2050 :</i> – <i>Réduction des quantités de soja importées de 57 %.</i> – <i>Réduction des quantités de tourteaux de soja importées de 89 %.</i>
Impacts environnementaux	
Impacts considérés	Pour le scénario « Régimes sains » <i>Réduction des impacts environnementaux dans le scénario « Régimes sains » avec systèmes de culture et d'élevage en agroécologie (non quantifié)</i>

Tableau 12.3. Détails des variables descriptives et hypothèses du scénario Tyfa : scénario de référence et prospectif (en italique). Avec Efsa : Autorité européenne de sécurité des aliments, OMS : Organisation mondiale de la santé, PNNS : Programme national nutrition santé, SAU : surface agricole utile.

Variables	Scénario Tyfa
Régimes alimentaires	
Taille de la population	Pratiques alimentaires issues d'Eurostat : Efsa (2013, 2017)
Types de régimes	Recommandations nutritionnelles d'après les données OMS, PNNS, Anses (2016), Efsa (2017).
Contenu des diètes (énergie, protéines, type de produits, part labels...)	Prise en compte d'un besoin calorique de 2 300 kcal/personne, d'un apport en protéines de 50 g/j/personne dont maximum 35 g de protéines animales avec une consommation maximale de viande hors volaille de 70-80 g/j et 25 g/j pour la charcuterie et les viandes transformées.
Gaspillage alimentaire	Gaspillage alimentaire considéré de 30 % (HLPE, 2014). <i>Régime de 2 265 kcal/j/personne (– 6 %) avec 82 g protéines /j/personne (dont 25 g de protéines animales), 64 g sucre/j/personne et 36 g fibres /j/personne (+ 37 %). L'évolution des consommations de viande représente – 3 % pour la viande bovine ; – 60 % pour la viande porcine et – 66 % pour la viande avicole.</i>
Usages des sols	
Types de productions (animales et végétales)	Source Eurostat utilisée pour l'assolement des terres arables dans l'UE puis sortie de simulations (modèle Tyfa) avec pour infrastructures agro-écologiques et prairies permanentes.

Variables	Scénario Tyfa
Usages des sols	
Répartition sur le territoire	<i>Reterritorialisation de l'élevage dans les zones de cultures avec une logique « Land sharing ».</i>
Changement d'occupation des sols	<i>Légère diminution des terres arables au profit de cultures permanentes et de surfaces agro-écologiques. Au sein des cultures arables, réduction des céréales et du maïs fourrager au profit de légumineuses (graines, fourragères) et de cultures oléo-protéagineuses.</i>
Quantité de légumineuses dans les rotations	<i>Réintroduction de légumineuses dans la rotation.</i>
Quantité de prairies permanentes	<i>Maintien des prairies permanentes en surface totale (34 % SAU) mais redéploiement de ces dernières sur l'ensemble du territoire.</i>
Haies et agroforesterie	<i>Prise en compte de 5 % de la SAU en infrastructures agro-écologiques. Accroissement de 10 % des surfaces en infrastructures agro-écologiques.</i>
Forêt	<i>Pas renseigné</i>
Systèmes agricoles	
Modes de production (conventionnels, biologiques)	<i>100 % de productions biologiques et extensification de l'élevage.</i>
Rendements	<i>Différences entre systèmes conventionnels et biologiques en termes de rendement : baisse de 25 % pour céréales, 50-80 % pour oléo-protéagineux et entre 5 et 20 % pour les fruits et légumes – Ponisio (2015), Guyomard (2013), Agreste (2011 et 2012).</i>
Pesticides	<i>Pas d'usage de pesticides.</i>
Azote symbiotique	<i>Fixation symbiotique de 150 à 250 kg N/ha/an en prairies permanentes (considérées avec une part en légumineuse entre 25 et 40 %) - Anglade et al. (2015) et Vertes et al. (2015).</i>
Intercultures	<i>100 % des intercultures sont des légumineuses. Ces dernières couvrent l'intégralité des surfaces en cultures de printemps (« Zéro sol nu »). Rendement estimé de 2 tMS/ha (Anglade, Billen, Garnier, 2015).</i>
Stockage de carbone	<i>0,7 t C/ha/an pour les prairies permanentes : Soussana et Lemaire (2014)</i>
Alimentation des animaux d'élevage	<i>0% importation</i>
Performances techniques des élevages	<i>Deux types d'élevage laitiers avec respectivement 5 000 et 7 000 kg lait /an; chargement 1 UGB/ha : Institut de l'élevage (2006, 2013), Chambres d'agriculture (2014) et réseaux d'élevage (2005). Données du porc biologique provenant de Calvar (2015) et Jurjanz et Roinsard (2014). Données des élevages avicoles biologiques issues de Bordeaux (2015) et Bouvarel et al. (2013).</i>
Temps de présence des animaux en bâtiment	<i>Temps de présence en bâtiment respectivement de 90 % pour les vaches laitières, 50 % pour les vaches allaitantes et autres herbivores (ovins et caprins), et entre 50 et 70 % pour les génisses. Les porcs et les volailles sont 100 % en bâtiment.</i>

Variables	Scénario Tyfa
Usages des biomasses	
Usage des biomasses (alimentation humaine, animale, méthanisation, biocarburant...)	Source Faostat (2018) mobilisée pour l'usage des oléagineux et des céréales en Europe entre l'alimentation humaine, l'alimentation animale et les usages industriels. Données issues de Hou <i>et al.</i> (2016) et Eurostat (2017) pour la correspondance entre l'alimentation animale disponible et celle consommée en 2010 en Europe. <i>Priorité à l'alimentation humaine, puis animale, puis usages non alimentaires; 0 % d'usage de biomasse pour agrocarburant et méthanisation.</i>
Liens avec l'extérieur	
Importations (notamment des sources de protéines pour l'alimentation animale) et exportations	Source Eurostat pour le bilan import-export des produits alimentaires de l'UE en 2010. <i>Maintien des exportations en céréales et suppression des importations en soja pour l'alimentation animale.</i>

Tableau 12.4. Détails des variables descriptives du scénario Afterres 2050 : scénario de référence et prospectif (en italique). Avec ANC : Apports nutritionnels conseillés, OMS : Organisation mondiale de la santé, PNNS : Programme national nutrition santé, STH : surfaces toujours en herbe.

Variables	Scénario Afterres 2050
Régimes alimentaires	
Taille de la population	Taille des populations considérée issue de l'Insee.
Types de régimes	Pratiques alimentaires provenant des enquêtes de Santé publique France, Esteban, Nutritnet Santé, Inca2.
Contenu des diètes (énergie, protéines, type de produits, part labels...)	Qualité des aliments issues de Ciqua, Oqali, Drees.
Gaspillage alimentaire	Recommandations nutritionnelles basées sur les données PNNS, Anses, OMS, ANC. Part de produits sous label issue d'Agreste. Gaspillage alimentaire évalué à 260 kg/personne/an (Ademe, 2016). Bilan approvisionnement des ménages provenant de Faostat. Prise en compte d'un besoin calorique de 3 800 kcal/j/personne, d'un apport en protéines de 120 g/j/personne avec un besoin journalier de 57,9 g de protéines, une consommation maximale de viande de 185 g/j hors abats, 235 g/j/personne de produits laitiers et 10 g/j/personne de légumineuses. <i>Scénario prospectif visant une réduction de 50 % de la surconsommation en protéines, de 11 % de la consommation de sucre, de 40 % de la consommation de lait et produits laitiers (passage de 3 à 2 portions/jour) et de 58 % du gaspillage alimentaire.</i> <i>Régime de 3 500 kcal/j/personne (– 8 %); 94 g protéines /j/ personne (dont 39 g de protéines animales). L'évolution des consommations représente + 24 % de protéines végétales, – 48 % de la surconsommation en protéines (qui est de + 59 % des besoins).</i>

Variables	Scénario Afterres 2050
Usages des sols	
Types productions (animales et végétales)	Expertise Solagro pour les surfaces agricoles (à partir de cas types). <i>Scénario prospectif visant des systèmes de cultures de type Culture principale +interculture +cultures associées, 5 % de la SAU en infrastructures agroécologiques et 20 % des terres arables en cultures associées.</i> <i>Réduction du cheptel porcin de 35 % mais multiplication par 13,5 de porcs sous label.</i> <i>Réduction du cheptel avicole de chair de 25 % avec multiplication par 3 des poulets sous label.</i> <i>En bovin, ¼ des effectifs laitiers sont en système herbager strict.</i> <i>Réduction du cheptel laitier de 48 %. Élevage bovin allaitant divisé par 6 (pour combler la différence entre le besoin en viande et l'apport de viande par le troupeau laitier), orientation vers des races mixtes.</i> <i>Troupeau caprin stable, troupeau ovin augmenté de 50 %.</i>
Répartition sur le territoire	Source Eurostat (2018) utilisée pour la France. <i>Réduction du troupeau laitier de 60 % (baisse plus forte dans l'ouest), du troupeau allaitant de 31 % (avec maintien des races de montagne), rééquilibrage de la production de lait sur le territoire.</i> <i>– 40 % de porcs (dont – 75 % de porcs conventionnels), – 22 % de volailles de chair (– 90 % de systèmes conventionnels) et – 38 % de poules pondeuses avec une diminution de 96 % des poules en cage.</i>
Changement d'occupation des sols	<i>Augmentation de la surface en production de grains (+ 9 %), diminution de la surface fourragère temporaire (– 43 %), diminution de la surface en STH (– 11 %) et diminution des cultures industrielles et permanentes (– 5 %).</i>
Quantité de légumineuses dans les rotations	<i>Cultures associées systématiques (20 % des terres arables), rotations longues (7-8 ans). Légumineuses représentant 25 % des terres arables.</i>
Quantité de prairies permanentes	En 2010, la STH de 7,7 Mha. <i>Diminution des prairies permanentes (tendances actuelles prolongées) pour autant limitée dans le scénario avec pour objectif de les conserver au maximum : 6,4 Mha de STH productives et 2,4 Mha de STH peu productives (parcours, landes).</i>
Haies et agroforesterie	<i>Augmentation de 10 % de SAU en agroforesterie (50 arbres par hectare soit emprise au sol de 12 %) et de 5 % en infrastructures agroforesterie.</i>
Forêt	Part de la forêt issues de l'enquête Teruti-Lucas (Agreste), des données Cgaaer, et de l'enquête annuelle de branche (MAF) et du scénario IGN-FCBA.
Systèmes agricoles	
Modes de production (conventionnels, biologiques)	<i>Répartition des systèmes de culture : 45 % biologiques, 45 % production intégrées (dont agroforesterie ou cultures associées), 10 % raisonnés.</i> <i>Désintensification forte des élevages avec :</i> <i>60 % de systèmes porcs bio, 20 % porcs plein air, 4 % systèmes très extensifs, 10 % de porcs conventionnels,</i> <i>40 % de poules pondeuses bio, 47 % de labels et plein air, 13 % élevages standards,</i> <i>45 % de poulets bio, 30 % de poulets label, 15 % de poulets standards au sol et 10 % de poulets standards en cage.</i>

Variables	Scénario Afterres 2050
Systèmes agricoles	
Modes de production (conventionnels, biologiques)	<i>Disparition des vaches laitières à 10 000 l de lait et 220 g de concentré/l ainsi que des VL à 5 000 l et 165 g de concentré/l, au profit de 26 % de VL à 7 000 l et 165 g de concentré/l, 26 % de VL à 6 000 l et 100 g de concentré/l, 28 % de VL à 5 500 l et 50 g de concentré/l et 20 % de VL à 5 000 l tout à l'herbe. Évolution vers des races mixtes.</i>
Rendements	<i>Hypothèses de rendements issues de Climator (Inra, 2012) avec intégration des effets du changement climatique : – 30 % de rendements en agriculture bio et – 10 % de rendements en production intégrée (blé) mais un coefficient de rendement équivalent moyen de 1,14 grâce aux productions associées.</i>
Pesticides	<i>Hypothèses de réduction issues de Inra-Ecophyto R&D.</i>
Azote symbiotique	<i>Fixation de 120 kg N/ha/an pour les prairies permanentes. Fixation symbiotique totale (cultures protéagineux et prairies) représentant 26 % des entrées azotées.</i>
Interculture	<i>Culture principale accompagnée (arbres, cultures associées ou intercultures).</i>
Stockage de carbone	<i>Prairies : ClimAgri® ; Forêt : programme Carbofor, Citepa, ClimAgri®.</i>
Alimentation des animaux d'élevage	<i>Adaptation des cas types Idele pour ruminants. 66 % du temps passé au pâturage. Diminution forte de la consommation de concentrés (– 53 %) et diminution de la ration fourragère (– 31 %).</i>
Performances techniques des élevages	<i>Références non communiquées mais tableaux de synthèse des performances mobilisées indiquées pour les porcs, poulets de chair, poules pondeuses et bovins lait. Ovins : Inosys 2014. Apparition d'un système conventionnel amélioré en porc. Performance caprins et ovin issues de Bocquier et al. (2011).</i>
Temps de présence des animaux en bâtiment	<i>Adaptation des cas types Idele pour ruminants. 34 % du temps passé en bâtiment.</i>
Usages des biomasses	
Usage des biomasses (alimentation humaine, animale, méthanisation, biocarburant...)	<i>Données fondées sur le scénario négaWatt. Généralisation de la méthanisation (90 % agricole) mobilisant 20 % de la production d'herbe (prairie) et la moitié des cultures intermédiaires.</i>
Liens avec l'extérieur	
Importations (notamment des sources de protéines pour l'alimentation animale) et exportations	<i>Modélisation par la méthode du bilan (différence entre la production nationale et la demande intérieure). Diminution forte des exportations céréalières fourragères vers l'Europe.</i>

► Méthodes d'évaluation des scénarios prospectifs

L'évaluation des scénarios prospectifs mobilise dans Tyfa, Afterres 2050, Sisae et Agrimonde-Terra des modèles différents qui considèrent les bilans d'équilibre des biomasses et le bilan des flux environnementaux (GES et énergie essentiellement).

Les modèles d'équilibre de biomasse mettent en adéquation les surfaces disponibles associées à leurs productions (productions agricoles et forestières, cheptel) et à la demande (besoin en aliments des habitants, des cheptels et en bioressources). Ils permettent d'actionner différents leviers tels que les systèmes agricoles, la taille des cheptels, l'assiette et les régimes alimentaires, la gestion forestière et les prélèvements en forêt, les souhaits en matière d'importations et d'exportations, ou encore d'évolution de l'artificialisation des terres. Les figures 12.2 et 12.3 schématisent le fonctionnement respectif des modèles MoSUT (Afterres, 2050) et GlobAgri (Le Mouël *et al.*, 2018a).

Le calcul des flux environnementaux dans les perspectives à l'échelle France utilise largement l'outil ClimAgri® développé par l'Ademe. Il réalise un bilan chiffré des émissions de l'activité agricole (les consommations d'énergie dans l'agriculture, les émissions de GES, la séquestration de carbone, le cycle de l'azote, la production de matière première agricole) selon une approche cycle de vie, intégrant notamment la phase amont avec l'impact de la production et de l'acheminement des intrants (engrais, alimentation animale).

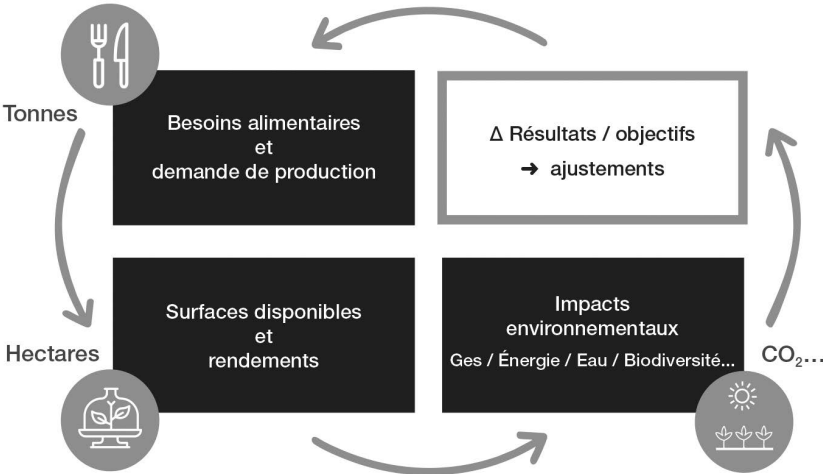
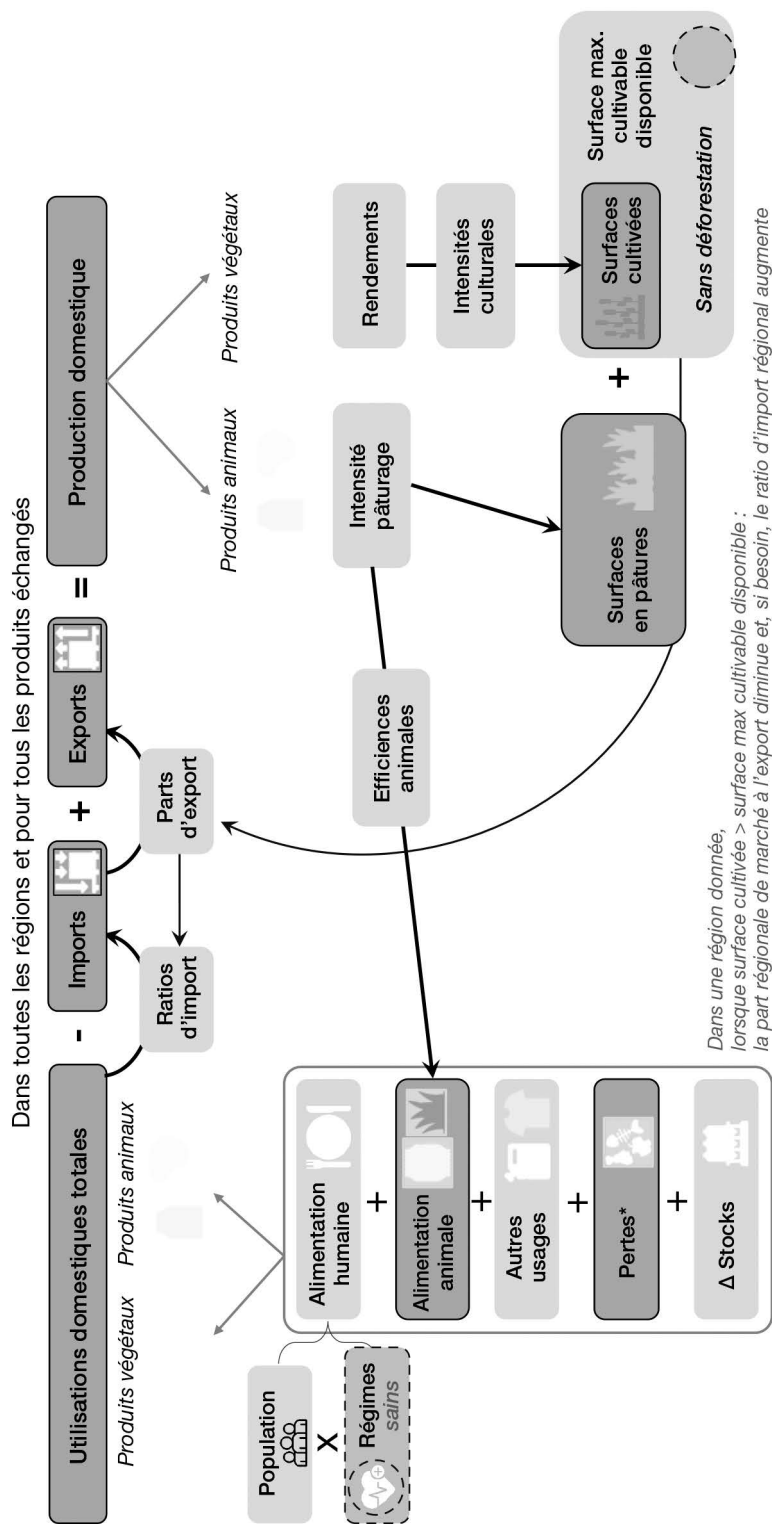


Figure 12.2. Fonctionnement général du modèle MoSUT.

Les tableaux 12.5, 12.6 et 12.7 décrivent les différents flux environnementaux considérés selon les perspectives et les outils de calcul associé utilisés dans les différents travaux prospectifs analysés dans ce chapitre. Pour plus de détails concernant les modèles et outils, il faut se référer à l'encadré 6.2.



Légende : les variables et paramètres sont distingués selon leur statut dans le modèle : exogènes (□), endogènes (■), sujets aux hypothèses normatives (▨).
* Les taux de pertes sont fixés de manière exogène, leur niveau est déterminé de manière endogène à partir des utilisations domestiques totales.

Figure 12.3. Fonctionnement général du modèle Globagri.

Tableau 12.5. Méthode d'évaluation environnementale du scénario Tyfa.

Flux environnementaux évalués	Outils utilisés
Bilan azoté avec les apports (azote des fumiers, des cultures intercalaires et des cultures fixatrices) et les exports dans les différentes cultures récoltées	Tyfam
Bilan GES : émissions directes (consommation d'énergie, émissions des sols, fermentation entérique et émissions liées à la gestion des effluents) et indirectes (production d'énergie, des engrais, fabrication des aliments et du matériel...)	Tyfam couplé à ClimAgri®

Tableau 12.6. Méthode d'évaluation environnementale du scénario Afterres 2050.

Flux environnementaux évalués	Outils utilisés
Évaluation de la biodiversité <i>via</i> les surfaces HVN	Utilisation de l'indicateur HVN (surface agricole à haute valeur naturelle) (Pointereau <i>et al.</i> , 2010)
Bilan agronomique	MoSUT et AgriClimateChangeTool (ACCT) développés par Solagro
Bilan surface	MoSUT
Bilan hydrique	MoSUT et ClimAgri®
Bilan fourrager	MoSUT
Bilan concentrés	MoSUT
Bilan approvisionnement	MoSUT fondé sur bilan emplois-ressources et les statistiques FAO
Bilan GES avec prise en compte des émissions et des puits de carbone	ClimAgri® + facteurs émissions Agribalyse® et ecoinvent®
Flux d'énergie	MoSUT

Tableau 12.7. Évaluation du scénario Sisae.

Flux environnementaux évalués	Outils utilisés
Bilan GES avec prise en compte des émissions directes (fermentation entérique, gestion des déjections d'élevage, émissions de protoxyde d'azote liées à l'utilisation des fertilisants azotés) et indirectes (liées à la production des intrants) et des puits de carbone	MoSUT couplé à ClimAgri®
Consommation d'eau pour l'irrigation	MoSUT couplé à ClimAgri®
Consommation d'énergie pour l'agriculture et part d'énergie renouvelable	MoSUT couplé à ClimAgri®
Surfaces mobilisés et surface artificialisées	MoSUT
Bilan azoté	MoSUT couplé à ClimAgri®

Devenirs possibles de l'élevage et appropriation par les décideurs politiques

Aurélié Wilfart, Olivier Mora et Sandrine Espagnol

►► Introduction : place des prospectives dans le cycle des politiques publiques

Pour examiner la relation complexe entre les prospectives de l'élevage et les politiques publiques, nous nous appuyons sur la méthode d'*analyse du cycle des politiques publiques*, qui permet de distinguer différents moments de l'action publique. Classiquement, l'approche séquentielle des politiques publiques fait se succéder conception, mise œuvre et évaluation, puis, à partir de ce dernier point, s'enclenche un nouveau cycle de politique publique. Dans le cadre de cette approche séquentielle, le cycle des politiques publiques se définit selon cinq étapes : la mise à l'agenda (la définition de priorités d'action), la formulation de la politique publique, la prise de décision (débat et délibération), la mise en œuvre de la politique publique et l'évaluation de la politique publique (Jacquot, 2019).

La prospective participe tout d'abord à la phase de conception des politiques publiques, dans la *mise à l'agenda*. Elle intervient au moment où la politique publique est reconsidérée par rapport aux objectifs qu'elle poursuit, au regard des résultats de la politique précédente (issus de l'évaluation). La prospective est un élément de définition des priorités de la politique publique. Elle participe à un moment de re-problématisation et d'identification des problèmes publics, où l'on tient compte des dynamiques des évolutions futures, des interdépendances, des problématiques émergentes et des ruptures possibles.

Comme on le verra dans cette section, la prospective intervient aussi dans la *phase de formulation* de la politique publique. Ainsi, les travaux de prospectives, les scénarios et leurs simulations quantifiés sont particulièrement mobilisés en France pour la construction de politiques publiques de *transition*. Dans ce cas, le problème à traiter est déjà identifié par l'acteur public et il s'agit de formuler une politique publique pour traiter le problème. Les scénarios et des simulations issus de prospective sont mobilisés pour évaluer les conséquences possibles de différentes hypothèses et examiner les conditions de faisabilité de différentes transformations, afin de construire une stratégie d'action. Les simulations quantitatives des scénarios sont l'occasion de s'assurer de l'atteinte des objectifs quantifiés poursuivis par les politiques de transition. Les scénarios, du fait de leur approche systémique, sont également mobilisés pour s'assurer de la cohérence des stratégies engagées par les politiques publiques. Enfin, les scénarios et leurs simulations sont l'occasion pour

les décideurs publics d'engager des *conversations stratégiques* avec les acteurs parties prenantes pour définir de nouveaux objets d'action publique et co-construire de nouvelles stratégies d'action.

La prospective intervient également dans la phase de *prise de décision* pour éclairer les choix, la délibération et la prise de décision. En proposant à la réflexion une pluralité de futurs possibles et une vision systémique des évolutions futures, la prospective permet d'éclairer les choix qui se présentent, à partir de différents devenir possibles et de leurs enjeux.

Pour autant, les travaux de prospective ne sont qu'un élément parmi d'autres de la construction des politiques publiques. Par exemple, la mise en agenda des problèmes publics dépend d'une multiplicité de facteurs et d'acteurs. Cependant, les prospectives participent de diverses manières à la construction des problèmes publics : pendant l'étape de mise à l'agenda en reformulant ce qui, à l'avenir, pourrait poser problème (l'identification des enjeux futurs), pendant l'étape de formulation des politiques publiques en anticipant les conséquences possibles de l'action et lors de l'étape de délibération et de prise de décision en éclairant les conditions de possibilités et les enjeux des transformations normatives.

» L'élevage au cœur d'une pluralité des services de l'État français

En France, les questions de l'élevage sont discutées principalement au niveau de deux ministères : le ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt, et le ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques. Des services de ces ministères ont été enquêtés en 2024 pour faire le point sur l'appropriation des prospectives par les décideurs politiques et sur les devenir possibles de l'élevage en France.

1. Le bureau « Émissions et du pilotage de la stratégie nationale bas carbone » (SNBC) à la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC). Ce bureau est chargé d'élaborer la SNBC, de la réviser tous les cinq ans et de participer à sa mise en œuvre. Il s'occupe en particulier des modélisations pour les différents secteurs émetteurs et puits de carbone, notamment pour l'agriculture, en évaluant les trajectoires de réduction des émissions de GES nécessaires à l'atteinte des objectifs de décarbonation de la France.

2. Le bureau « Agriculture et alimentation durables au Commissariat général au développement durable » (CGDD). Ce bureau traite des questions liées au développement de pratiques moins impactantes du point de vue environnemental (notamment agriculture biologique, développement de paiements pour services environnementaux publics PSE) et du lien avec les politiques alimentaires et climatiques (copilotage de la Snanc et mise en œuvre du label national anti-gaspillage alimentaire). Il contribue à l'élaboration de stratégies nationales visant à concilier les objectifs climatiques et agricoles tout en favorisant une transition vers des pratiques plus durables.

3. Le bureau de la Politique de l'alimentation à la direction générale de l'Alimentation (DGAL). Ce bureau coordonne les politiques publiques liées à l'alimentation, à travers la mise en œuvre du Programme national pour l'alimentation (PNA), avec une approche

systémique prenant en compte les différents enjeux de la durabilité (économie, santé, social, environnement). Il joue un rôle clé dans l'adaptation des politiques alimentaires aux objectifs environnementaux et sanitaires.

4. La direction générale de la Performance économique et environnementale des entreprises (DGPE). Ce service, qui comprend le Bureau des viandes et des productions animales et un chargé de mission à la performance environnementale, se concentre sur la valorisation des territoires et sur l'amélioration de la performance environnementale des entreprises agricoles. Il examine les politiques qui touchent aux filières agroalimentaires, en particulier les élevages, et leur adaptation aux exigences climatiques et économiques.

Ces services jouent un rôle essentiel dans l'intégration des prospectives pour orienter les politiques publiques vers une agriculture et une alimentation plus durables, tout en tenant compte des objectifs climatiques, nutritionnels et économiques.

► Les principales actions politiques concernant l'élevage en France

Les politiques publiques actuelles influençant le secteur de l'élevage en France sont variées et cherchent à atteindre une réduction des émissions de GES, et plus largement une transition vers des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement. Deux pôles ressortent avec les secteurs d'activité (dont l'agriculture), d'un côté, et l'alimentation, de l'autre (figure 13.1). Chacun est structuré autour de la définition de planifications et de stratégies mises en œuvre par la suite par différents outils.

La planification écologique, lancée par le gouvernement et pilotée par le Secrétariat général à la planification écologique (SGPE), supervise les enjeux environnementaux et vise à atteindre des objectifs climatiques ambitieux en intégrant des mesures concrètes de réduction des émissions pour 2030. Elle a également pour objectifs de relever les défis de l'adaptation aux conséquences du réchauffement climatique, de la préservation et la restauration de la biodiversité, de la préservation des ressources et de la réduction des pollutions qui impactent la santé. Elle comprend un soutien financier aux agriculteurs, notamment à travers des mesures d'accompagnement et des aides à l'investissement pour adopter des pratiques agricoles et d'élevage plus durables, telles que la méthanisation des effluents ou le développement de surfaces de cultures riches en protéines.

En lien avec cette planification globale, quatre stratégies et un plan complémentaire ont été cités pour leur incidence sur les élevages, avec la SNBC, la stratégie nationale pour la biodiversité (SNB), la stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée (SNDI), la SNANC et le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC).

La SNBC fixe des objectifs pour réduire les émissions de GES, notamment dans le secteur agricole, avec une perspective de neutralité carbone d'ici 2050. Elle s'appuie sur une coordination interministérielle et régionale, ainsi que sur des mécanismes de concertation publique pour ajuster les mesures de décarbonation en fonction des retours des parties prenantes. À ce stade, l'objectif de réduction fixé par la SNBC 2 en vigueur pour l'agriculture est de -46% des émissions de GES en 2050 par rapport à 2015. Il n'y a pas de sous-objectifs chiffrés de baisses d'émissions pour les élevages (bien que la SNBC 2

indique des baisses de 25 % du cheptel bovin laitier en 2050 par rapport à 2015 et des baisses de 33 % du cheptel bovin autre que laitier en 2050 par rapport à 2015), mais la stratégie inclut des mesures spécifiques, telles que le renforcement de l'autonomie protéique pour l'alimentation animale et l'optimisation des pratiques de gestion des troupeaux, la limitation des excès de consommation de viande et l'augmentation de consommation de légumineuses et de fruits et légumes. La prochaine version (SNBC 3) devrait détailler les hypothèses d'évolution du cheptel et le niveau de déploiement de la production biologique. La SNBC, la SNB et le PNACC soutiennent en particulier la préservation des prairies et l'adaptation des pratiques d'élevage aux impacts du changement climatique, en tenant compte des conditions climatiques extrêmes et des conditions de transport des animaux. La SNDI a pour objectif de mettre fin aux importations de produits forestiers et agricoles contribuant à la déforestation. Elle accompagnera la mise en œuvre du règlement européen contre la déforestation et la dégradation des forêts par le renforcement de la traçabilité des produits liés à la déforestation (exemple du tourteau de soja utilisé en alimentation animale en France et provenant de pays tiers). Enfin, la Stratégie nationale sur les protéines végétales (SNPV) définit un cadre global de politique publique visant à renforcer l'autonomie de la France en matière de protéines végétales, notamment pour l'alimentation animale.

La mise en œuvre de ces stratégies peut s'appuyer sur plusieurs outils comme la politique agricole commune (Pac), principal instrument européen de soutien à l'agriculture, qui finance des pratiques durables, notamment *via* l'éco-régime avec des aides à la conversion à l'agriculture biologique et au maintien des prairies. Néanmoins, la Pac actuelle peut être jugée insuffisante sur la promotion des pratiques agroécologiques. Les paiements pour services environnementaux (PSE) sont également des instruments économiques visant à rémunérer les agriculteurs pour les services environnementaux qu'ils fournissent (protection biodiversité, séquestration du carbone...). Le plan Protéines végétales apporte un soutien financier pour aider la France à réduire sa dépendance aux importations de protéines végétales des pays tiers : actions de recherche et d'innovation, accompagnement à des investissements de matériels nécessaires chez les producteurs de grandes cultures et les éleveurs, appui à la structuration des filières de protéines végétales et aux investissements aval, aide à la promotion des légumineuses auprès des consommateurs.

L'évolution de notre alimentation est nécessaire pour permettre le respect des recommandations du PNNS et l'atteinte des objectifs de la planification écologique. Elle est pilotée par la SNANC qui détermine les orientations stratégiques de la politique de l'alimentation en intégrant les enjeux climatiques, nutritionnels et de durabilité dans les politiques alimentaires, en encourageant des pratiques alimentaires et de production plus durables, en ligne avec les recommandations de santé publique et environnementales. Elle est déclinée de manière opérationnelle à travers le PNA et le Programme national nutrition santé (PNNS). Le PNA est organisé en trois axes thématiques (justice sociale, lutte contre le gaspillage alimentaire et éducation à l'alimentation) et deux axes transversaux (restauration collective et projets alimentaires territoriaux). En complément de la SNANC et pas totalement dans son périmètre, il existe les plans de souveraineté alimentaire (élaborés par filière) qui visent à renforcer l'autonomie alimentaire de la France en augmentant l'autoapprovisionnement et en limitant les importations, et le plan de diversification des sources de protéines qui est une obligation législative pour les restaurants collectifs de plus de 200 couverts.

Dans ce cadre, il est possible de citer deux exemples d'outils en lien avec la consommation de produits animaux. Le premier est la loi du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire, et une alimentation saine, durable et accessible à tous, dite « loi Égalim », complétée par la loi n° 2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, dite « loi Climat et Résilience » : elle impose des critères pour la durabilité et la qualité des approvisionnements de la restauration collective (au moins 50 % de produits durables et qualité dont 20 % de produits bio, 60 % de viandes et poissons durables et de qualité, et 100 % pour les restaurants de l'État, des établissements publics et des entreprises publiques nationales). La loi Égalim introduit également des menus végétariens obligatoires (de manière hebdomadaire pour le scolaire, et une option végétarienne quotidienne pour les restaurants de l'État, des établissements publics et des entreprises publiques nationales) et favorise la consommation de protéines végétales (par exemple : à travers les plans pluriannuels de diversification des sources de protéines, obligatoires pour les restaurants collectifs servant plus de 200 couverts par jour). Le deuxième exemple est l'affichage environnemental ; il développe la mise à disposition pour les consommateurs d'une information claire sur l'impact environnemental de leurs achats alimentaires. Le dispositif est conçu pour encourager des choix de consommation plus durables et inciter les producteurs à adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement.

Ces politiques publiques sont coordonnées par différents ministères pour garantir une approche cohérente et intégrée, soutenue par des financements et une réglementation adaptés.

» Quelle(s) utilisation(s) des prospectives par les politiques publiques françaises ?

Les services de l'État français enquêtés connaissent et consultent plusieurs prospectives pour orienter leurs stratégies dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation durable. Trois prospectives ont été principalement citées : les scénarios Transition(s) 2050 de l'Ademe, Afterres 2050 de Solagro et Tyfa de l'Iddri. Ces scénarios sont jugés utiles pour imaginer les futurs possibles de l'agriculture française.

Les prospectives sont décrites comme utilisées dans les calages de stratégies pour confronter diverses hypothèses, comparer différents leviers d'action, évaluer la faisabilité des mesures politiques et au final élaborer et ajuster les politiques publiques. Elles peuvent être utilisées en amont comme dans la SNBC en permettant de confronter diverses hypothèses sur des aspects critiques, tels que l'évolution des cheptels bovins, qui peuvent varier largement selon les scénarios, allant d'une réduction de -60 % à une stabilité. Dans ce cas, les prospectives servent de point de référence pour voir ce qui est envisageable et pour ajuster les choix stratégiques en fonction des contraintes réelles du secteur agricole et des objectifs de réduction des émissions. Au-delà d'une consultation de prospectives existantes et sur la base des choix stratégiques arrêtés, la SNBC crée et calcule ses propres scénarios avec l'outil MoSUT de Solagro commun aux prospectives Afterres 2050 et Transition(s) 2050. Dans le cadre de la SNANC, les prospectives n'ont pas été directement mobilisées, au profit des résultats des scénarios réalisés dans le cadre de la SNBC et des repères du PNNS. Ainsi, il ressort des entretiens que les exercices de prospectives sont concrètement utilisés pour alimenter

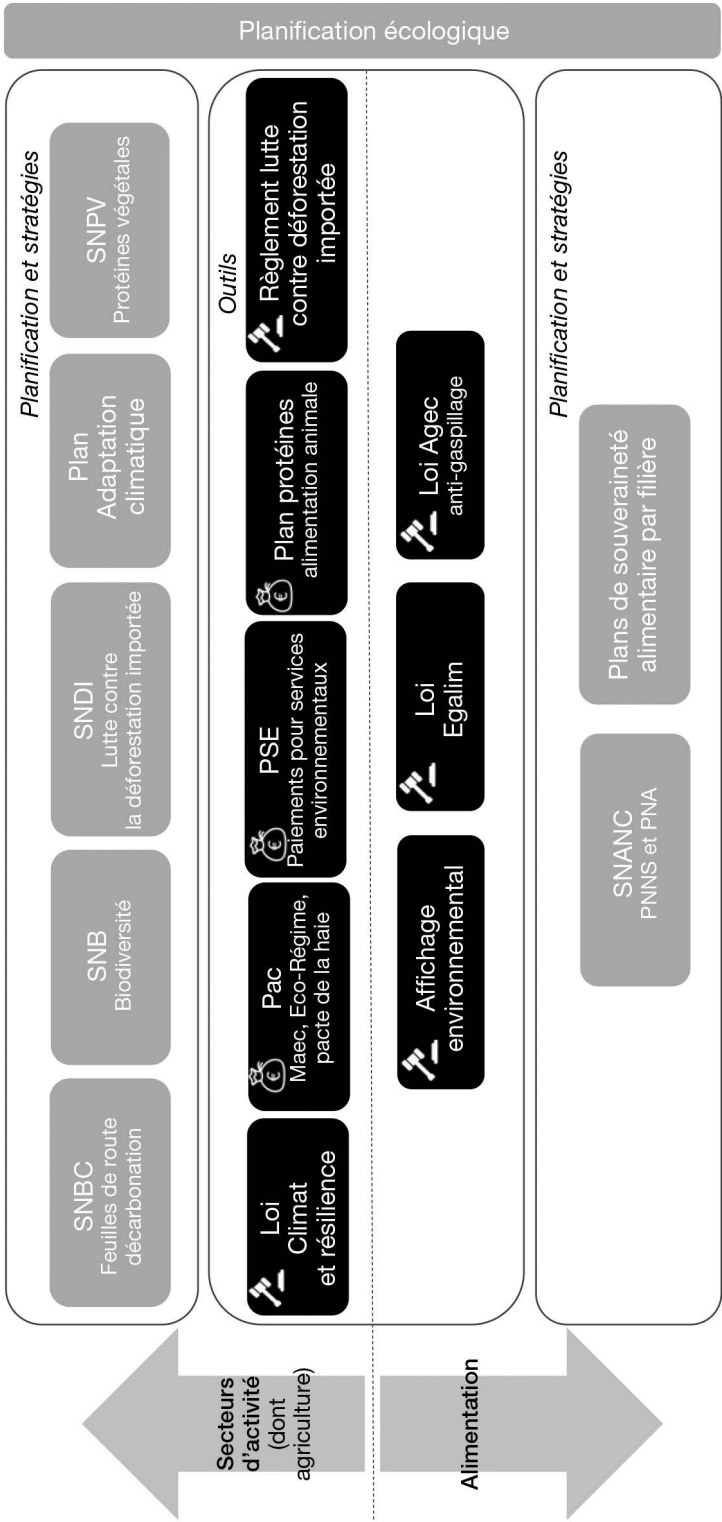


Figure 13.1. Synthèse des principales politiques publiques actuelles et à venir appliquées en France en lien avec les élevages.

les discussions internes et interministérielles des services enquêtés afin d'assurer des choix stratégiques cohérents et d'identifier des leviers d'action. Le rôle clé des réalisateurs de prospectives est souligné. En effet, les services de l'État consultent les résultats des prospectives ou définissent les déterminants de nouveaux scénarios, peuvent discuter certains détails des modélisations sous-jacentes (SNBC notamment) mais n'ont pas accès aux modèles et se fient donc aux résultats.

Les différents services enquêtés soulignent l'intérêt de disposer de prospectives à différentes échelles (région, France, Europe). Elles permettent de se projeter en imaginant des futurs plausibles pour la France. Ce faisant, elles aident à établir des hypothèses de travail réalistes et documentées. Dans le cas de la SNBC, le calcul des réductions de GES atteignables associé à un jeu d'hypothèses dimensionne les progrès possibles en termes de réduction effective des émissions de GES et aide la stratégie à avoir des objectifs chiffrés. La construction de scénarios propres à la SNBC permet de s'assurer que les choix stratégiques restent cohérents avec les objectifs globaux de réduction des émissions et de neutralité carbone à l'horizon 2050, tout en tenant compte des réalités économiques et sociales. Dans le cadre de la construction d'une stratégie, des scénarios prospectifs permettent de comparer l'effet de différents leviers d'action ou de différentes évolutions comme le niveau de baisse des cheptels ou l'augmentation des cultures de légumineuses, de tester la faisabilité de ces mesures en termes de bouclage des cycles de nutriments, notamment l'azote, et de vérifier la cohérence des trajectoires envisagées, pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Les prospectives citées sont également présentées comme positionnant un jalon : elles objectivent les conditions d'une possibilité d'atteinte d'objectif. La prospective Tyfa est citée comme celle qui montre que des modèles agroécologiques peuvent nourrir la population tout en préservant l'environnement. Son existence renforce en cela la vision des services de l'État en montrant qu'une agriculture durable est possible sous certaines conditions. Pour autant, la multiplicité des scénarios est également louée car elle fournit une vue d'ensemble des trajectoires possibles, chacune avec leurs conditions. Leur existence et leur partage permettent également d'engager un dialogue avec les parties prenantes, y compris avec les acteurs économiques, pour identifier les leviers d'action appropriés et faire des ajustements en fonction des réalités du terrain. D'un point de vue méthodologique, l'intérêt des prospectives citées est leur approche systémique avec leur représentation des systèmes agricoles complexes et ce en lien avec l'alimentation. Les prospectives permettent également d'identifier les déterminants clés des systèmes afin de les améliorer, notamment pour réussir une transition écologique cohérente. Ainsi, les services enquêtés considèrent les prospectives comme des outils précieux pour anticiper les évolutions possibles et préparer des stratégies robustes, tout en restant flexibles face aux incertitudes et aux changements rapides du contexte global. En ce sens, l'exercice n'est pas considéré comme clos et de nouvelles prospectives pour éclairer les choix agricoles de demain sont jugées utiles.

Malgré les intérêts perçus, des limites notamment méthodologiques ont également été soulignées lors des entretiens.

Certains leviers déterminants dans les performances de scénarios calculés sont jugés insuffisamment connus et donc trop fragiles pour éclairer précisément la mise en œuvre politique. C'est le cas par exemple des niveaux de fixation symbiotique atteignables en France. Ces niveaux sont essentiels pour boucler le bilan azoté et pour

s'assurer que les cultures disposent des intrants azotés pour assurer une production. Les niveaux de fixation symbiotique dépendent de l'importance des légumineuses dans les rotations et des taux de fixation unitaire par unité de rendement. Une étude faisant un point spécifique sur ce potentiel a été confiée à INRAE pour éclairer cette question plus précisément et mesurer ce qu'on peut attendre de ces leviers dans les scénarios futurs.

Les entretiens ont mis en lumière que les prospectives abordent insuffisamment les aspects socio-économiques. En effet, l'ambition politique ne suit pas complètement les niveaux de changement proposés dans les prospectives car des questions de filières apparaissent. Cette diminution d'ambition peut être vécue comme une frustration par certains services de l'État qui trouvent que l'on ne va pas assez loin sur les enjeux climat et biodiversité, et dans le soutien ciblé à l'élevage durable. Pour d'autres services, un enjeu de préservation de filière d'élevage est souligné en parallèle de la poursuite d'objectifs environnementaux forts. En effet, la dynamique de déclin de l'élevage en France est un sujet de préoccupation au regard des enjeux de souveraineté alimentaire et de préservation des services écosystémiques rendus par l'élevage comme le maintien des prairies permanentes mais aussi au regard des impacts sur la dimension socio-économique.

Un constat d'utilisation presque exclusive du modèle MoSUT pour réaliser les scénarios prospectifs a posé question dans la mesure où il s'agit d'un modèle non publié et évalué par la communauté scientifique, et mobilisé par l'intermédiaire d'un bureau d'étude privé, avec un effet « boîte noire ». Le choix d'utiliser ce modèle dans le cadre des scénarios Transition(s) 2050 et de ceux de la SNBC s'est justifié par la non-présence d'équivalent au niveau de la recherche-développement publique en France. C'est moins le cas actuellement, et des services enquêtés suggèrent de diversifier les modèles utilisés, en intégrant davantage les modèles issus de la recherche publique pour obtenir des scénarios avec une méthodologie plus transparente (méthodes de calculs, paramètres et facteurs d'émissions utilisés). Toutefois, l'idée n'est pas de mobiliser les prospectives dans des débats d'experts trop techniques qui peuvent détourner l'attention des objectifs stratégiques principaux. Les prospectives doivent être regardées dans les signaux faibles et dans les tendances émergentes qu'elles mettent en lumière et qui pourraient rapidement changer avec le contexte économique ou social, comme l'ont montré des crises récentes (Covid-19, guerre en Ukraine, etc.).

Enfin, il est souligné que les outils de modélisation disponibles se concentrent surtout sur l'étape de production, tandis qu'il existe moins d'outils pour évaluer les évolutions et changements de modes de consommation. Or, le système alimentaire est tout aussi complexe et associé à de fortes incertitudes liées aux comportements des consommateurs. Ainsi, la robustesse des résultats des prospectives doit être testée dans une approche globale au regard de ces incertitudes de consommation.

► Qu'en est-il dans d'autres contextes ailleurs dans le monde ?

Il n'a pas été possible de conduire une analyse aussi détaillée des différents services étatiques influençant l'avenir de l'élevage, des principales actions politiques concernant l'élevage et plus largement de l'utilisation des prospectives dans la définition des politiques publiques, ailleurs dans le monde. Cependant, il ressort d'un certain nombre de témoignages et travaux que les contextes dans les pays du Sud peuvent

être très différents, liés notamment à i) des structurations ministérielles diverses (par exemple : il existe un ministère de l'Élevage au Sénégal du fait de son importance économique), ii) une capacité variable des centres de recherche nationaux et autres institutions nationales à conduire des prospectives (si INRAE en France dispose de services dédiés à la prospective et à l'accompagnement de l'élaboration des politiques publiques, ce n'est pas le cas de la plupart des centres de recherche nationaux d'Afrique de l'Ouest) et iii) des enjeux liés à l'élevage très différents. On l'a vu en introduction de l'ouvrage, si dans les pays du Nord l'enjeu est de réduire les niveaux de consommation de produit animaux et d'accompagner la transition agro-écologique des systèmes d'élevage, dans les pays du Sud les enjeux sont tout autres, puisque qu'un fort accroissement des productions animales est nécessaire à des fins de santé publique et de développement économique.

L'utilisation des prospectives pourrait également intervenir dans la définition des grands plans de développement dans le monde. On peut citer par exemple le Fida et la Banque mondiale qui mobilisent les travaux scientifiques de la FAO, de l'Ilri et du Cirad pour argumenter sur l'importance de soutenir le développement de l'élevage moteur de la croissance économique et de la réduction de la pauvreté dans les zones rurales (The World Bank, 2009). Mais là encore notre connaissance des modes d'élaboration de ces plans de développement ne nous permet pas aujourd'hui d'affirmer que des prospectives mondiales, comme Agrimonde-Terra, ont été ou sont mobilisées à l'international.

Conclusion générale

Points clés à retenir

Jonathan Vayssières et Aurélie Wilfart

» Synthèse thématique

Face, entre autres, à l'évolution des habitudes alimentaires, des attentes des consommateurs, du climat, de l'émergence de zoonoses, l'importance et les formes d'élevage dans les territoires et les systèmes agri-alimentaires sont destinés à évoluer un peu partout dans le monde. La forte incertitude sur le devenir des élevages et la complexité des mécanismes en jeu rend nécessaire la conduite de prospectives.

Les prospectives présentées dans l'ouvrage explorent les futurs possibles de l'élevage dans divers contextes (pays industrialisés et pays en développement) et à différentes échelles (région, pays, continent, monde), en mobilisant une diversité d'acteurs et de méthodes. On peut tirer de ces études un certain nombre de conclusions.

La multiplicité des enjeux alimentaires, environnementaux et socio-économiques liés à l'élevage, leur importance variable selon les contextes et la difficulté de répondre simultanément à tous les enjeux induisent un besoin de priorisation ou de facilitation de compromis.

Les dynamiques de l'élevage sont différentes selon les territoires ; la tendance est plutôt d'aller vers une diminution du nombre de troupeaux et d'éleveurs dans les pays industrialisés et, à l'inverse, vers une augmentation de l'importance du secteur de l'élevage dans les pays en développement, liés à des dynamiques démographiques et de régimes alimentaires différentes. Ces dynamiques auront des conséquences importantes sur le fonctionnement et la durabilité des territoires.

Bien souvent, les dynamiques des effectifs animaux vont de pair avec une évolution des systèmes d'élevage. Les prospectives soulignent un besoin général de transition vers des systèmes d'élevage agroécologiques, dits « plus durables », plus intensifs écologiquement dans les pays en développement, adaptés aux spécificités territoriales et aux changements à venir, prenant en compte les interactions complexes entre agriculture, alimentation et société.

En réponse à ces besoins de changement, il existe de multiples leviers mobilisables pour réduire les impacts négatifs de l'élevage et accroître les services qu'il rend aux écosystèmes et aux sociétés humaines. Ces leviers comprennent notamment un changement des pratiques d'élevage, des espèces et des races animales élevées, des effectifs animaux, de la répartition spatiale des élevages et de leur intégration dans les paysages, et plus largement de leur contribution à la circularité des systèmes agri-alimentaires, par, entre autres, la fourniture de fumure organique aux sols et la valorisation des terres incultes et de co-produits des cultures et de l'agro-industrie.

» Synthèse méthodologique

Face à un besoin d'objectiver les conséquences de l'évolution de l'élevage dans les territoires et les systèmes agri-alimentaires, l'ouvrage propose un ensemble de recommandations pour associer et mieux articuler prospective, modélisation et évaluation multicritère de scénarios. La tâche n'est pas aisée car les prospectives sont le plus souvent des approches qualitatives et la modélisation-évaluation fait en majorité appel à des méthodes quantitatives. La diversité des méthodes de prospectives, de modélisation et d'évaluation complexifie également leur couplage. Ainsi l'ouvrage propose une grille d'aide au choix de types de couplage en fonction des méthodes mobilisées.

Concernant les prospectives, elles répondent à des objectifs très différents, exploratoires (par exemple : décrire le champ des possibles) ou normatifs (par exemple : réduire l'empreinte carbone, résoudre des conflits), et elles s'appuient sur une diversité d'objets intermédiaires. Les méthodes de prospectives fondées sur des scénarios sont particulièrement utiles pour faire face à l'incertitude concernant les trajectoires futures des systèmes complexes. Celle utilisant les tableaux morphologiques pour explorer des combinaisons plausibles d'hypothèses apparaît particulièrement adaptée pour proposer une gamme de scénarios robustes et modélisables.

Les méthodes de modélisation-évaluation sont également très diverses. En effet, les évaluations peuvent être qualitatives ou quantitatives, monocritères ou multicritères, agrégées ou pas, etc., et elles peuvent notamment faire appel en amont à des modèles numériques de simulation pour convertir les scénarios en données quantitatives pour alimenter les évaluations. Ces modèles peuvent être statiques ou dynamiques, empiriques ou mécanistes, non spatialisés ou spatialement explicites, etc. Aujourd'hui, la majorité des modèles utilisés pour évaluer les scénarios de prospectives sont statiques et de type « bilan de matière ». Les approches intégratives, combinant des méthodes spatiales, dynamiques, multicritère, orientées agents, sont encore peu utilisées en prospective car complexes à manipuler et particulièrement gourmandes en données. Néanmoins, elles sont prometteuses pour représenter le fonctionnement et la dynamique des territoires d'élevage et les systèmes agri-alimentaires.

Nombreux sont les avantages à coupler prospective et modélisation-évaluation. Des informations produites par une des méthodes peuvent être mobilisées par l'autre, et réciproquement. Généralement, la prospective intervient en amont de la modélisation-évaluation et fournit un ensemble de scénarios à modéliser et évaluer. La méthode fondée sur des scénarios et des tableaux morphologiques permet également de décrire le système étudié dans ses dimensions structurelles et dynamiques. Elle permet d'étudier, dans de multiples configurations plausibles, les liens de causalité et les interactions possibles entre les différentes composantes du système étudié. La prospective fournit alors des connaissances très utiles au travail de construction de modèles de simulation et de définition des hypothèses d'évaluation. À l'inverse, l'évaluation peut également intervenir en amont de la prospective. Dans ce cas, elle joue un rôle important dans l'identification et dans la priorisation des enjeux à considérer dans les prospectives.

Dans tous les cas, la disponibilité des connaissances et des données nécessaires à la prospective, à la modélisation et à l'évaluation est un déterminant majeur des choix méthodologiques. Elle est différente selon les contextes, elle peut s'avérer limitante dans certains contextes tels que celui des pays en développement. Il en découle un

besoin d'adapter les méthodes à la fois de scénarisation, de modélisation et d'évaluation. Une option est de réduire la granularité des modèles et des évaluations ou de mobiliser des méthodes qualitatives, ayant davantage recours aux savoirs locaux et aux connaissances d'experts.

► Synthèse opérationnelle

Au vu de l'importance et du panorama des enjeux, il apparaît à la lecture de l'ouvrage que l'élevage, en raison de ses spécificités et en tant que levier de développement durable, doit faire l'objet de politiques publiques adaptées et ambitieuses.

D'un point de vue théorique, les prospectives et la modélisation-évaluation des scénarios ont un rôle majeur dans l'élaboration de ces politiques. En référence au cycle des politiques publiques (conception, mise œuvre et évaluation), la prospective peut jouer un rôle important dans la phase de conception, notamment au niveau de trois étapes clés : i) dans la mise à l'agenda, les prospectives peuvent participer à un moment de (re-)problématisation et d'identification des problèmes publics, où l'on tient compte des dynamiques des évolutions futures, des interdépendances, des problématiques émergentes et des ruptures possibles ; ii) dans la phase de formulation de la politique publique, les scénarios et leurs simulations-évaluations issus de prospectives sont mobilisables pour anticiper les conséquences possibles de différentes hypothèses et examiner les conditions de faisabilité de différentes transformations, afin de construire une stratégie d'action. Les évaluations quantitatives des scénarios sont l'occasion de s'assurer de l'atteinte des objectifs poursuivis par les politiques de transition ; iii) enfin, dans la phase de prise de décision, en proposant à la réflexion une pluralité de futurs possibles et une vision systémique des évolutions futures, la prospective permet d'éclairer la délibération et les choix.

En pratique, les producteurs de prospectives témoignent souvent d'une sous-utilisation ou d'une utilisation tardive des scénarios par les politiques. L'enquête que nous avons conduite auprès des services de l'État français concernés par l'élevage montrent que certaines prospectives élaborées aux niveaux national et européen sont connues et consultées pour la construction de politiques publiques de transition en France. Ailleurs dans le monde, la disponibilité des prospectives est variable. Elle est moindre dans les pays en développement, du fait notamment d'une plus faible capacité des organismes nationaux à conduire des prospectives et à produire des modèles de simulation et d'évaluation robustes et adaptés. L'utilisation des prospectives intervient également dans la définition des grands plans de développement dans le monde. On peut citer par exemple le Fida et la Banque mondiale qui mobilisent des travaux scientifiques pour argumenter sur l'importance de soutenir l'élevage, moteur de la croissance économique et de la réduction de la pauvreté dans les zones rurales.

Néanmoins, il demeure que l'analyse de l'appropriation des prospectives par les décideurs publics et de leurs effets sur les grandes orientations aux niveaux national, régional ou mondial reste limitée dans l'ouvrage et mériterait d'être approfondie. Une telle analyse rétrospective serait utile pour aider la recherche à proposer des méthodes et des résultats scientifiques davantage mobilisables par les acteurs des politiques publiques permettant ainsi à l'élevage d'assurer pleinement son rôle dans la transition vers des systèmes agri-alimentaires plus durables.

Références bibliographiques

Ademe, 2016. Pertes et gaspillages alimentaires : l'état des lieux et leur gestion par étapes de la chaîne alimentaire. Rapport d'étude, disponible en ligne : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26873-pertes-gaspillage-alim-ademe.pdf>

Ademe, Réthoré O., Hugrel C., Palluau M., Bleu Safran, Audard G., Osset P., Solinnen, 2020. Guide d'aide à la sélection des méthodes d'évaluation environnementale, 53 p., disponible en ligne : https://www.valobat.fr/wp-content/uploads/2025/02/guide-aide-choix-methodes_evaluation-rapport-vf.pdf

Afssa, 2007. « Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations », <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf>

Alary V., Duteurtre G., Faye B., 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux, in Coulon J.-B., Lecomte P., Boval M., Perez J.-M. (éd.), Numéro spécial, élevage en régions chaudes. *INRA Productions Animales*, 24 (1), 145-156, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.1.3246>

Alexandratos N., Bruinsma J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working Paper 12-03. Rome (Italie), Food and Agriculture Organization.

Allen M. R., Lynch J., Cain M., Frame D., 2022. *Climate metrics for ruminants*. Oxford, Oxford Martin Programme on Climate Pollutants, 4 p.

Allen M. R., Shine K. P., Fuglestad J. S., Millar R. J., Cain M., Frame D. J., Macey A. H., 2018. A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1 (1), 16, <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0026-8>

Altieri M. A., Funes-Monzote F. R., Petersen P., 2011. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1), 1-13, <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>

Amanatidou E., Butter M., Carabias V., Könnölä T., Leis M., Saritas O., Könnölä T., Leis M., Saritas O., Petra Schaper-Rinkel P., Van Rij V., 2012. On concepts and methods in horizon scanning: Lessons from initiating policy dialogues on emerging issues. *Science and Public Policy*, 39 (2), 208-221, <https://doi.org/10.1093/scipol/scs017>

Amer M., Daim T. U., Jetter A., 2013. A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23-40.

An L., 2012. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25-36, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>

Anglade J., Billen G., Garnier J., 2015. Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*, 6 (3), 1-24, <https://doi.org/10.1890/ES14-00353.1>

Anses, 2016a. Composition nutritionnelle des aliments Table Ciquel version 2016. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail – <https://pro.anses.fr/tableciquel/>

Anses, 2016b. Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires. Avis de l'Anses. Maison Alfort, Agence nationale de la sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail, 82 p.

Aubert P.-M., Gardin B., Alliot C., 2021. *Vers une transition juste des systèmes alimentaires, enjeux et leviers politiques pour la France*. Paris, Iddri-Basic, 76 p., https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/rapport%20SNBC%20agri%20FR_1.pdf

Aubert P.-M., Schwoob M.-H., Poux X., 2019. *Agroecology and carbon neutrality in europe by 2050: what are the issues? Findings from the Tyfa modelling exercise*. Paris, Iddri Study.

Bailly J.-P., 2005. Prospective territoriale et action publique. *Futuribles*, 314, 53-67.

- Bajzelj B., Richards K. S., Allwood J. M., Smith P., Dennis J. S., Curmi E., Gilligan C. A., 2014. Importance of food-demand management for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 924-929.
- Barbier C., Couturier C., Dumas P., Kesse-Guyot E., Baudry J., Pharabod I., Pourouchottamin P., Toilier F., 2022. Prospective du système alimentaire et de son empreinte énergétique et carbone. Paris, CIRED, https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2022/09/Publication_SISAE.pdf
- Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J.-M., Sylvestre M., Pharabod I., 2019. *L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France*. Paris, Iddri, 24 p.
- Barbieri P., Pellerin S., Seufert V., Smith L., Ramankutty N., Nesme T., 2021. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food*, 2 (5), 363-372, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>
- Bareha Y., Affès R., Buffet J., Girault R. 2021. «SYS-Metha : Outil de prédiction des flux d'azote et de carbone sur les filières de méthanisation et des propriétés des digestats», <https://doi.org/10.15454/U4S6OF>, Recherche Data Gouv, V1.
- Bareille F., Boussard H., Thenail C., 2022. Productive ecosystem services and collective management: Lessons from a realistic landscape model. *Ecological Economics*, 169, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106482>
- Barlagne C., Diman J.-L., Galan M.-B., Hoton C., Mora O., Noglotte T., Ozier-Lafontaine H., Vinglassalon A., 2016. Étude prospective : L'agriculture guadeloupéenne à l'horizon 2040. Rapport final d'exécution. Inra, 250 p., <https://hal.inrae.fr/hal-02800576>
- Barré R., 2005. Intervention au séminaire Concepts et Méthodes de la Prospective, «Figures de la prospective», Observatoire international de prospective régionale.
- Béné C., Oosterveer P., Lamotte L., Brouwer I. D., de Haan S., Prager S. D., Talsma E. F., Khoury C. K., 2019. When food systems meet sustainability – Current narratives and implications for actions. *World Development*, 113, 116-130, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
- Bengtsson J., Bullock J. M., Egoh B., Everson C., Everson T., O'Connor T., O'Farrell P., Smith H., Lindborg R., 2019. Grasslands – more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10 (2), e02582, <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>
- Benjaminsen T. A., Ba B., 2018. Why do pastoralists in Mali join jihadist groups? A political ecological explanation. *Journal of Peasant Studies*, 46, 1-20.
- Benton T. G., Vickery J. A., Wilson J. D., 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?. *Trends in Ecology & Evolution*, 18 (4), 182-188, [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- Berre D., Blancard S., Boussemart J.-P., Leleu H., Tillard E., 2014. Finding the right compromise between productivity and environmental efficiency on high input tropical dairy farms: A case study. *Journal of Environmental Management*, 146, 235-244, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.008>
- Signal E., 2000. The environmental impact of dairy production in the EU – practical options for the improvement of the environmental impact. European Commission (DGXI) CEAS, 1179.
- Billen G., Aguilera E., Einarsson R., Garnier J., Gingrich S., Grizzetti B., Lassaletta L., Le Noë J., Sanz-Cobena A., 2021. Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4 (6), 839-850, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Billen G., Lassaletta L., Garnier J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3, 209-219, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>
- Blanfort V., Vayssières J., Assouma M. H., Plassin S., Pocard-Chapuis R., 2019. Landsharing for climate smart landscapes in dry and humid tropical livestock areas, in 5th Global Science Conference on Climate-Smart Agriculture, Bali, Indonesia, October 8-10, poster, 1 p.
- Bocquier F., Benoit M., Laignel G., Dedieu B., Cournut S., Fiorelli C., Jouven M., Moulin C. H., Aubron C., Lurette A., Lapeyronie P., Hassoun P., Meuret M., Agreil C., Napoléone M., Hoste H., Friggens N., Tichit M., Gonzalez-Garcia E., Hazard D., François D., Pellicer-Rubio M.-T., Guillouet P., Boissard K., Fabre-Nys C., Teyssier J., Tournadre H., Mihaud M., Malpau B., Chemineau P., Bodin L., Prache S., Bouix J., Barillet F., Boutonnet J.-P., Chia E., Lasseur J., Étienne M., Gibon A., Choisis J.-P., Labatut J., Paoli J. C., Santucci P.-M., 2011. Innovations et performances environnementales en production caprine et ovine : Expertise élevage-environnement à l'Inra. *Innovations agronomiques*, 12, 29-52, <https://doi.org/10.17180/h30x-fy29>

- Bommel P., Becu N., Le Page C., Bousquet F., 2016. Cormas: an agent-based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics, in Kaneda T., Kanegae H., Toyoda Y., Rizzi P., *Simulation and gaming in the network society*. Singapore, Springer.
- Bordeaux C., 2015. L'alimentation des volailles en agriculture biologique. Itab, IBB, Chambres d'agriculture, Inra, Itavi, 68 p.
- Börjeson L., Höjer M., Dreborg K. H., Ekvall T., Finnveden G., 2006. Scenario types and techniques: towards a user's guide. *Futures*, 38 (7), 723-739.
- Bots P. W. G., Daalen C. E., 2008. Participatory model construction and model use in natural resource management: A framework for reflection. *Systemic Practice and Action Research*, 21 (6), 389-407, <https://doi.org/10.1007/s11213-008-9108-6>
- Boulay A.-M., Drastig K., Amanullah, Chapagain A., Charlon V., Civit B., Decamillis C., De Souza M., Hess T., Hoekstra A. Y. Ibidhi R., Lathuillière M. J., Manzardo A., McAllister T., Morales R. A., Motoshita M., Palhares J. C. P., Pirlo G., Ridoutt B., Russo V., Pfister S., 2021. Building consensus on water use assessment of livestock production systems and supply chains: Outcome and recommendations from the FAO LEAP Partnership. *Ecological Indicators*, 124, 107391.
- Bourgoin J., Corniaux C., Touré L., Cesaro J. D., 2018. Atlas des dynamiques observées dans le bassin de collecte de la Laiterie du Berger. Cirad, 32 p.
- Bousquet F., Le Page C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176 (3-4), 313-332.
- Bouvarel I., Pottiez E., Magdelaine P., Seguin E., Conan S., Pineau C., Dennerly G., Landrault M., Riffard C., Guyot M., 2013. Avibio : des systèmes durables pour dynamiser l'AVIculture BIOlogique. *Innovations agronomiques*, 30, 13-25.
- Bouwman A. F., Van der Hoek K. W., Eickhout B., Soenarso I., 2005. Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, 84 (2), 121-153.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119 (1), 201-212.
- Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S., 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva, IPCC.
- Calvar C., 2015. Quoi de neuf en élevage de porcs biologiques? Le point sur la filière, la réglementation, la conduite d'élevage et les résultats de la recherche. Rennes, Chambres d'agriculture de Bretagne – Pôle porcs, 12 p.
- Caron P., Reig E., Roep D., Hediger W., Le Cotty T., Barthélemy D., Hadyńska A., Hadyński J., Oostindie H. A., Sabourin E., 2008. Multifunctionality: refocusing a spreading, loose and fashionable concept for looking at sustainability?. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 7 (4/5), 301-318.
- Catarino R., Therond O., Berthomier J., Miara M., Mérot E., Misslin R., Vanhove P., Villerd J., Angevin F., 2021. Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the Maelia platform. *Agricultural Systems*, 189, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103066>
- CE, 2018. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussels, European Commission / In depth analysis in support of the Commission Communication COM (2018) 773, 291 p.
- CE, 2020. Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels, European Union, 22 p.
- Cesaro J.-D., Vall E., Gaye M., Müller J. P., Diaw A., Ickowicz A., 2020. Estimation spatialisée du potentiel laitier autour de Richard-Toll et scénarios d'évolution des systèmes de collecte. Cirad, 10 p.
- Chateauraynaud F., 2013. Regard analytique sur l'activité visionnaire, in Bourg D., Joly P.-B., Kaufmann A. (dir.), *Du risque à la menace. Penser la catastrophe*. Paris, Presses universitaires de France, p. 287-309, <https://doi.org/10.3917/puf.bourg.2013.02.0287>
- Chevassus-Au-Louis B., Génard M., Glaszmann J.-C., Habib R., Houllier F., Lancelot R., Malézieux E., Muchnik J., 2009. L'intégration, art ou science? Colloque international Inra-Cirad. Partenariats, Innovation, Agriculture (p. 132-157), Paris, FRA (2008-06-03).

- Clark M. A., Domingo N. G. G., Colgan K., Thakrar S.K., Tilman D., Lynch J., Azevedo I. L., Hill J. D., 2020. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 370, 705-708.
- Cnued, 1992. Agenda 21. An Action plan for the next century. United Nations Conference on Environment and Development, New York.
- Collectif Commod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*, 13, 165-168.
- Constantin J., Willaume M., Murgue C., Lacroix B., Therond O., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55-68.
- Cordell D., Schmid-Neset S., White J.-O., 2009. Preferred future phosphorus scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand, in Ashley K. I., Mavinic D., Koch F. (eds.), International conference on nutrient recovery from wastewater streams: May 10-13, 2009, the Westin Bayshore Hotel and Resort, Vancouver, British Columbia, Canada. IWA Publishing.
- Cordova-Pozo K., Rouwette E. A., 2023. Types of scenario planning and their effectiveness: A review of reviews. *Futures*, 149, 103153.
- Cork S., Alexandra C., Alvarez-Romero J. G., Bennett E. M., Berbés-Blázquez M., Bohensky E., Bok B., Costanza R., Hashimoto S., Hill R., Inayatullah S., Kok K., Kuiper J. J., Moglia M., Pereira L., Peterson G., Weeks R., Wyborn C., 2023. Exploring alternative futures in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 48 (1), 25-54.
- Corniaux C., Alary V., Gautier D., Duteurtre G., 2012. Producteur laitier en Afrique de l'Ouest : une modernité rêvée par les techniciens à l'épreuve du terrain. *Autrepart*, 3, 17-36.
- Corniaux C., Ancey V., Touré I., Camara A., Cesaro J.-D., 2016. Pastoral mobility, from a Sahelian to a sub-regional issue, in Pesche D., Losch B., Imbernon J. (eds), *A new emerging rural world. An overview of rural change in Africa, Atlas for the Nepad rural futures programme*. Deuxième édition, Montpellier, Cirad, 76 p.
- Corniaux C., Thébaud B., Gautier D., 2012. La mobilité commerciale du bétail entre le Sahel et les pays côtiers : L'avenir du convoi à pied. *Nomadic Peoples*, 16, 6-25, <https://doi.org/10.3167/np.2012.160203>
- Couturier C., Charru M., Doublet S., Pointereau P., 2016. Le scénario Afterres 2050 version 2016. Toulouse, Solagro, 93 p.
- Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F. N., Leip A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2 (3), 198-209.
- Cumming G. S., Olsson P., Chapin F. S., Holling C. S., 2013. Resilience, experimentation, and scale mismatches in social-ecological landscapes. *Landscape Ecology*, 28 (6), 1139-1150, <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9725-4>
- Cuyppers D., Geerken T., Gorissen L., Lust A., Peters G., Karstensen J., Prieler S., Fischer G., Hizsnyik E., Van Velthuizen H., 2013. The impact of EU consumption on deforestation: Comprehensive analysis of the impact of EU consumption on deforestation. Brussels, European Commission – DG Environment, 108 p.
- D'Ottavio P., Francioni M., Trozzo L., Sedić E., Budimir K., Avanzolini P., Trombetta M. F., Porqueddu C., Santilocchi R., Toderi M., 2018. Trends and approaches in the analysis of ecosystem services provided by grazing systems: A review. *Grass and Forage Science*, 73 (1), 15-25.
- Dainese M., Martin E. A., Aizen M. A., Albrecht M., Bartomeus I., Bommarco R., Carvalheiro L. G., Chaplin-Kramer R., Gagic V., Garibaldi L. A., 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5 (10), 13.
- Daley C. A., Abbott A., Doyle P. S., Nader G. A., Larson S., 2010. A review of fatty acid profiles and antioxidant content in grass-fed and grain-fed beef. *Nutrition Journal*, 9 (1), 10.
- de Vries M., de Boer I. J. M., 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128, 1-11.
- Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX*, 5, 89-95.

- Delanoue E., Roguet C., 2015. Acceptabilité sociale de l'élevage en France : recensement et analyse des principales controverses à partir des regards croisés de différents acteurs. *INRAE Productions Animales*, 28 (1), 39-50.
- Delay E., Müller J. P., Cesaro J.-D., Valls-Fox H., Ickowicz A., 2021. Empowering a model for improved multi-actor discussions: case study from Dairy production in Sahelian agro-pastoral systems, in 1st conference Gama Days 2021, June.
- Delgado C. L., 2003. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *Journal of Nutrition*, 133 (11), 3907S-3910S.
- Dibari C., Pulina A., Argenti G., Aglietti C., Bindi M., Moriondo M., Mula L., Pasqui M., Seddaiu G., Roggero P. P., 2021. Climate change impacts on the Alpine, Continental and Mediterranean grassland systems of Italy: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 16 (3).
- Dobereiner J., De-Polli H., 1980. Diazotrophic rhizocoenoses – Nitrogen fixation. *Proceedings of the Phytochemical Society of Europe symposium*, 18, 301-344.
- Dourmad J.-Y., Guilbaud T., Tichit M., Bonaudo T., 2019. Les productions animales dans la bioéconomie. *INRAE Productions Animales*, 32 (2), 205-220.
- Durance P., Godet M., 2010. Scenario building: Uses and abuses. *Technological Forecasting and Social Change*, 77 (9), 88-92.
- Duru M., Aubert P.-M., Couturier C., Doublet S., 2021. Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques?. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 11 (1).
- Duru M., Therond O., Fares M., 2015. Designing agroecological transitions: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (4), 1237-1257.
- ECF, 2018. Net Zero By 2050: From Whether to How. Brussels, European Climate Foundation – Climact, 66 p.
- EEA, FOEN, 2020. Is Europe living within the limits of our planet? An assessment of Europe's environmental footprints in relation to planetary boundaries. Luxembourg, Federal Office of the Environment/European Environmental Agency, 61 p.
- Efsa, 2017. Efsa Comprehensive European Food Consumption Database. European Food Safety Authority – <https://www.efsa.europa.eu/en/food-consumption/comprehensive-database>
- Eglin T., Martin É., Martin S., Trévisiol A., Mousset J., Doublet S., Galsomière L., 2016. Climagri: A computer tool and participatory approach to design mitigation strategies of air pollutant and GHG emissions due to agriculture at a territorial level. *Pollution atmosphérique*, 203-207.
- Einarsson R., Sanz-Cobena A., Aguilera E., Billen G., Garnier J., van Grinsven H. J., Lassaletta L., 2021. Crop production and nitrogen use in European cropland and grassland 1961-2019. *Scientific Data*, 8 (1), 288.
- Eurostat, 2017. Agriculture and environment – pollution risks, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agriculture_and_environment_-_pollution_risks
- Eurostat, 2018. Agri-environmental indicator – gross nitrogen balance, [http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_gross_nitrogen_balance - Analysis_at_EU_level](http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_gross_nitrogen_balance_-_Analysis_at_EU_level)
- FAO, 2018. World livestock: Transforming the livestock sector through Sustainable Development Goals. Rome (Italie), 222 p.
- FAO, 2011. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention, Rome (Italie), Food and Agriculture Organization of the United Nations, 38 p.
- FAO, 2022. The state of world fisheries and aquaculture 2022: towards blue transformation, Rome (Italie), Food and Agriculture Organization of the United Nations, 266 p.
- FAO, 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome (Italie), Food and Agriculture Organization of the United Nations, 77 p.
- FAO, PNUE, OMS et OMSA, 2023. Plan d'action conjoint « Une seule santé » (2022-2026). Travailler ensemble pour des êtres humains, des animaux, des végétaux et un environnement en bonne santé. Rome (Italie), 100 p., <https://doi.org/10.4060/cc2289fr>

- Faucon M.-P., Houben D., Reynoird J.-P., Mercadal-Dulaurent A.-M., Armand R., Lambers H., 2015. Chapter Two – Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management, in Sparks D. L. (ed.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, 134, 51-79, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.003>
- Foley J. A., Ramankutty N., Brauman K. A., Cassidy E. S., Gerber J. S., Johnston M., Mueller N. D., O'Connell C., Ray D. K., West P. C., Balzer C., Bennett E. M., Carpenter S. R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockström J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D., Zaks D. P. M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337-342.
- Frehner A., Muller A., Schader C., De Boer I. J. M., Van Zanten H. H., 2020. Methodological choices drive differences in environmentally-friendly dietary solutions. *Global Food Security*, 24, 100333.
- Galang E. I. N. E., Bennett E. M., Hickey G. M., Baird J., Harvey B., Sherren K., 2025. Participatory scenario planning: A social learning approach to build systems thinking and trust for sustainable environmental governance. *Environmental Science & Policy*, 164, 103997.
- Garibaldi L. A., Oddi F. J., Miguez F. E., Bartomeus I., Orr M. C., Jobbágy E. G., Kremen C., Schulte L. A., Hughes A. C., Bagnato C., 2020. Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conservation Letters*, e12773, 10 p.
- Gascuel-Oudou C., Aurousseau P., Cordier M.-O., Durand P., Garcia F., Masson V., Salmon-Monviola J., Tortrat F., Trepos R., 2009. A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1433-1446.
- Gattinger A., Muller A., Haeni M., Skinner C., Fliessbach A., Buchmann N., Mäder P., Stolze M., Smith P., Scialabba N. E.-H., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (44), 18226-18231.
- Giec, 2006. Lignes directrices 2006 du Giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>
- Gliessman S. R., 2007. *Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems*. New York, Taylor & Francis.
- Godet M., 2007 (réédition). *Manuel de prospective stratégique*. Troisième édition. Tomes 1 et 2. Paris, Dunod.
- Godet M., 2000. The art of scenarios and strategic planning: tools and pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, 65 (1), 3-22.
- Godfray H. C. J., Beddington J. R., Crute I. R., Haddad L., Lawrence D., Muir J. F., Pretty J., Robinson S., Thomas S. M., Toulmin C., 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327 (5967), 812-816.
- Gonin A., Gautier D., 2015. Shift in herders' territorialities from regional to local scale: The political ecology of pastoral herding in Western Burkina Faso. *Pastoralism*, 5, 1-12.
- Govoni C., Chiarelli D. D., Rulli M. C., 2024. A global dataset of the national green and blue water footprint of livestock feeds. *Scientific Data*, 11, 1419, <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04264-2>
- Green R. E., Cornell S. J., Scharlemann J. P. W., Balmford A., 2005. Farming and the fate of wild nature. *Science*, 307 (5709), 550-555.
- Griffon M., 2010. *Pour des agricultures écologiquement intensives*. La Tour-d'Aigues, Éditions de l'Aube, 144 p.
- Grillot M., Guerrin F., Gaudou B., Masse D., Vayssières J., 2018a. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 107, 267-280.
- Grillot M., Vayssières J., Guerrin F., Lecomte P., 2018b. Modélisation conceptuelle de la gestion adaptative de la biomasse face à l'aléa climatique en système agro-sylvo-pastoral. *Cahiers Agricultures*, 180048, 1-9.
- Grimm V., Railsback S. F., 2005. *Individual-based modeling and ecology*. Princeton, Princeton University Press, 448 p.
- Guitouni A., Martel J.-M., 1998. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109 (2), 501-521.

Gupta B., Zurek M., Woodhill J., Ingram J., 2025. *Food systems of the future: A synthesis of food system drivers and recent scenario studies*. Oxford (United Kingdom), Foresight4Food.

Guyomard H. (éd.), 2013. *Vers des agricultures à hautes performances*. Volume 1. Analyse des performances de l'agriculture biologique. Paris, Inra, 368 p.

Halada L., Evans D., Romão C., Petersen J.-E., 2011. Which habitats of European importance depend on agricultural practices?. *Biodiversity and Conservation*, 20 (11), 2365-2378.

Hamilton S. H., Elsayah S., Guillaume J. H., Jakeman, A. J., Pierce S. A., 2015. Integrated assessment and modelling: Overview and synthesis of salient dimensions. *Environmental Modelling & Software*, 64, 215-229, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.005>

Herrero M., Havlík P., Valin H., Notenbaert A., Rufino M. C., Thornton P. K., Blümmel M., Weiss F., Grace D., Obersteiner M., 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (52), 20888-20893.

Hervieu B., 2002a. La multifonctionnalité de l'agriculture : genèse et fondement d'une nouvelle approche conceptuelle de l'activité agricole. *Cahiers Agricultures*, 11, 415-419.

Hervieu B., 2002b. La multifonctionnalité : un cadre conceptuel pour une nouvelle organisation de la recherche sur les herbages et les systèmes d'élevage. *Fourrages*, 20, 219-226.

Heurigon E., 2006. Territoires en question(s), territoires en devenir. Essai de prospective du présent. *Territoires 2030*, n° 3, 9 p.

HLPE, 2014. Food losses and waste in the context of sustainable food systems. High level panel of expert of the committee on World food security, 116 p.

Hou Y., Bai Z., Lesschen J. P., Staritsky I. G., Sikirica N., Ma L., Velthof G. L., Oenema O., 2016. Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 232-244

Huang J., Tichit M., Poulot M., Darly S., Li S., Petit C., Aubry C., 2015. Comparative review of multifunctionality and ecosystem services in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*, 149, 138-147.

Hubert B., Ison R., 2011. Institutionalising understandings: From resource sufficiency to functional integrity, in Kammili T., Hubert B., Tourrand J.-F. (eds), *A paradigm shift in livestock management: From resource sufficiency to functional integrity*. Avignon (France), Hohhot's Workshop.

Huyghe C., De Vlieghe A., van Gils B., Peeters A., 2014. *Grasslands and herbivore production in Europe and Effects of common policies*. Versailles, Éditions Quæ.

Ickowicz A., Blanfort V., Forman S., Hubert B., Lasseur J., Marguerat C., Tourrand J.-F., Velasco G., Wedderburn L., 2018. Why and how address multifunctionality of pastoral farming systems?, in Blanfort V., Lasseur J. (eds), *Multifunctionality of pastoralism: linking global and local strategies through shared visions and methods*. International Rangeland Congress Workshop 2016. GASL Montpellier 127 p.

Ickowicz A., Hubert B., Blanchard M., Blanfort V., Cesaro J.-D., Diaw A., Lasseur J., Thi Thanh Huyen L., Li L., Mauricio R. M., Cangussu M., Müller J.-P., Quiroga Mendiola M., Quiroga Roger J., Vera T. A., Ulambayar T., Wedderburn L., 2022. Multifunctionality and diversity of livestock grazing systems for sustainable food systems throughout the world: Are there learning opportunities for Europe?. *Grass and Forage Science*, 77 (4), 282-294, <https://doi.org/10.1111/gfs.12588>

Ilri, IUCN, FAO, WWF, Unep and ILC, 2021. *Rangelands Atlas*. Nairobi Kenya. Ilri, 42 p.

Inosys, 2014. Des systèmes ovins confortés par la réforme de la Pac. Octobre 2014, https://idele.fr/inosys-reseaux-elevage/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=8037&cHash=a2a3390cf43405234ac6531d247ddb3b

Isa, 2006. *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. EN Isa 14040. Geneva (Switzerland), International Organization for Standardization.

Jacquot S., 2019. L'approche séquentielle, in Boussaguet L., Jacquot S., Ravinet P. (dir.), *Dictionnaire des politiques publiques*. Paris, Presses de Sciences Po, p. 81-87.

- Jahel C., Bourgeois R., Bourgoïn J., Daré W., Lattre-Gasquet M. (de), Delay E., Dumas P., Le Page C., Piraux M., Prudhomme R., 2023. The future of social-ecological systems at the crossroads of quantitative and qualitative methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 193, 122624, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122624>
- Jakeman A. J., Letcher R. A., Norton J. P., 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21, 602-614.
- Jeffrey D., 1988. Mineral nutrients and the soil environment, in Jones M. B., Lazenby A. (eds), *The Grass Crop*. London, New York, Springer, p. 179-204.
- Jetter A. J., Kok K., 2014. Fuzzy cognitive maps for futures studies – A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45-57.
- Jeuffroy M.-H., Biarnes V., Cohan J.-P., Corre-Hellou G., Gastal F., Jouffret P., Justes E., Landé N., Louarn G., Plantureux S., 2015. Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales, in Schneider A., Huyghe C. (éd.), *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Versailles, Éditions Quæ, p. 139-224.
- Jouvenel H. (de), 1999. La démarche prospective. Un bref guide méthodologique. *Futuribles*, 247, 47-68.
- Julhia L., Barzman M., Belmin R., Pailly O., Mora O., Casabianca F., Beretti H., Benaouf G., Curk F., Donati M., Mancel J.-P., Fazi P. S., Marcadal V., Sainte-Beuve D., Welschinger B., Froelicher Y., 2018. Prospect'Agrium Prospective pour la mobilisation des ressources génétiques et la compétitivité des filières structurées autour de labels de qualité : cas de l'agrumiculture Corse à l'horizon 2030. [Rapport de recherche] Inra, 68 p. (hal-03232237).
- Jurjanz S., Roinsard A., 2014. Valorisation de l'herbe par des truies plein-air. *Alteragri*, 125, 25-28, mai-juin.
- Karlsson J. O., Carlsson G., Lindberg M., Sjunnestrand T., Rööös E., 2018. Designing a future food vision for the Nordics through a participatory modeling approach. *Agronomy for Sustainable Development*, 38 (6), 59.
- Karlsson J. O., Rööös E., 2019. Resource-efficient use of land and animals – Environmental impacts of food systems based on organic cropping and avoided food-feed competition. *Land Use Policy*, 85, 63-72.
- Kauko K., Palmroos P., 2014. The Delphi method in forecasting financial markets. An experimental study. *International Journal of Forecasting*, 30 (2), 313-327.
- Kizeková M., Hopkins A., Kanianska R., Makovníková J., Pollák Š., Pálka B., 2018. Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study. *Grass and Forage Science*, 73 (1), 218-232.
- Kleinpeter V., Lo Seen D., Degenne P., Lurette A., Wassenaar T., Vayssières J., 2024. A stakeholder decision and road-network-based deterministic model to simulate material flows in regional scale industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139778.
- Kok K., van Vliet M., Bärlund I., Dubel A., Sendzimir J., 2011. Combining participative backcasting and exploratory scenario development: Experiences from the SCENES project. *Technological Forecasting and Social Change*, 78 (5), 835-851, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.01.004>
- Krätli S., Toulmin C., 2020. Farmer-herder conflict in Sub-Saharan Africa? A research paper for AFD, Research Report, IIED: London, UK, 2020; ISBN 978-1-78431-828-4. Disponible en ligne : <http://pubs.iied.org/10208IIED>.
- Kremen C., Iles A., Bacon C., 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecology and Society*, 17 (4), 44.
- Lacroix D., Mora O., Menthère N. (de), Bethinger A., 2021. *La montée du niveau de la mer d'ici 2100 : Scénarios et conséquences*. Versailles, Éditions Quæ, collection « Matière à débattre et décider », 128 p.
- Lairez J., Feschet P., 2016. Chapitre 5 – Choisir une méthode d'évaluation, in Lairez J., Feschet P., Aubin J., Bopckstaller C., Bouvarel I. (éd.), *Agriculture et développement durable*. Versailles, Éditions Quæ et Educagri éditions, 129-168.
- Lairez J., Feschet P., Aubin J., Bockstaller C., Bouvarel I., 2016. *Agriculture et développement durable : Guide pour l'évaluation multicritère*. Dijon, Educagri éditions.

- Lamine C., 2012. Changer de systèmes : une analyse des transitions vers l'agriculture biologique à l'échelle des systèmes agri-alimentaires territoriaux. *Terrain et Travaux*, 2012/1, 20, 139-156.
- Le Berre S., 2013. Gouverner les territoires par la prospective stratégique? Une comparaison Bretagne / Pays-de-Galles. Congrès de l'Association française de science politique, Paris, 32 p.
- Le Mouél C., Forslund A., 2017. How can we feed the world in 2050? A review of the responses from global scenario studies. *European Review of Agricultural Economics*, 44 (4), 541-591.
- Le Mouél C., Dumas P., Manceron S., Forslund A., Marajo-Petizon E., 2018a. The GlobAgriAgrimonde-Terra database and model, in Le Mouél C., Lattre-Gasquet M. (de), Mora O. (eds), *Land use and food security in 2050: a narrow road. Agrimonde-Terra*. Versailles, Éditions Quæ, p. 28-36.
- Le Mouél C., Lattre-Gasquet D., Mora O., 2018b. *Agrimonde Terra -Land use and food security in 2050: a narrow road*. Versailles, Éditions Quæ, 400 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2880-5>
- Lebourgeois V., Dupuy S., Vintrou É., Ameline M., Butler S., Bégue A., 2017. A combined random forest and Obia classification scheme for mapping smallholder agriculture at different nomenclature levels using multisource data (simulated Sentinel-2 time series, VHRS and DEM). *Remote Sensing*, 9 (3), 259.
- Lenton T. M., 2013. Environmental tipping points. *Annual Review of Environment and Resources*, 38 (1), 1-29.
- Lescourret F., Magda D., Richard G., Adam-Blondon A.-F., Bardy M., Baudry J., Doussan I., Dumont B., Lefèvre F., Litrico I., Martin-Clouaire R., Montuelle B., Pellerin S., Plantegenest M., Tancoigne E., Thomas A., Guyomard H., Soussana J.-F., 2015. A social-ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68-75.
- Lin B. B., 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61 (3), 183-193.
- Loiseau E., Aissani L., Le Féon S., Laurent F., Cerceau J., Sala S., Roux P., 2018. Territorial life cycle assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 176, 474-485.
- Loiseau E., Roux P., Junqua G., Maurel P., Bellon-Maurel V., 2014. Implementation of an adapted LCA framework to environmental assessment of a territory: important learning points from a French Mediterranean case study. *Journal of Cleaner Production*, 80, 17-29.
- Loiseau E., Salou T., Roux P., 2022. Chapter 9 – Territorial Life Cycle Assessment, in Teodosiu C., Fiore S., Almudena Hospido A. (eds), *Assessing progress towards sustainability*. S. I., Elsevier, p. 161-188, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85851-9.00011-0>
- Loiseau P., Louault F., Le Roux X., Bardy M., 2005. Does extensification of rich grasslands alter the C and N cycles, directly or via species composition?. *Basic and Applied Ecology*, 6 (3), 275-287.
- Lopez-Ridaura S., 2005. Multi-scale sustainability evaluation: a framework for the derivation and quantification of indicators for natural resource management systems, PhD thesis. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University.
- Lóránt A., Allen B., 2019. Net-zero agriculture in 2050: how to get there? Brussels, Report by the Institute for European Environmental Policy, 41 p.
- Lynch J., Cain M., Frame D., 2021. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4.
- Mäder P., Edenhofer S., Boller T., Wiemken A., Niggli U., 2000. Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biology and Fertility of Soils*, 31 (2), 150-156.
- Magruk A., 2020. Uncertainties, knowledge, and futures in foresight studies – A case of the industry 4.0. *Foresight and STI Governance*, 14 (4), 20-33, <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2020.4.20.33>
- Maier H. R., Guillaume J. H., van Delden H., Riddell G. A., Haasnoot M., Kwakkel J. J., 2016. An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together?. *Environmental Modelling & Software*, 81, 154-164.
- Malézieux E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (1), 15-29

- Manson S. M., Sun S., Bonsal D., 2012. Agent-based modeling and complexity, in Heppenstall A. J., Crooks A. T., See L. M., Batty M. (eds), *Agent-based models of geographical systems*. Dordrecht, Springer Netherlands, p. 125-139.
- Martin G., Moraine M., Ryschawy J., Magne M.-A., Asai M., Sarthou J.-P., Duru M., Therond O., 2016. Crop-livestock integration beyond the farm level: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36 (3), 53.
- Martin M., Eglin T., Bardy M., 2015. Stockage de carbone dans les sols de grandes cultures : méthodes de comptabilisation à différentes échelles, in Bourges B., Broc J.-S., Gourdon T. (éd.), *Empreinte carbone : évaluer et agir*. Paris, Presses des Mines, collection « Développement durable ».
- McGinnis M. D., Ostrom E., 2014. Social-ecological system framework: Initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19, <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y., 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15 (3), 401-415.
- Mendez M. A., Popkin B. M., 2004. Globalization, urbanization and nutritional change in the developing world. *eJADE – Electronic Journal of Agricultural and Development Economics*, 1, 220-241.
- Mercandalli S., Losch B., 2018. Une Afrique rurale en mouvement. Dynamiques et facteurs des migrations au sud du Sahara. Rome (Italy), FAO; Montpellier (France), Cirad, 60 p.
- Mermet L. (dir.), 2005. *Étudier des écologies futures. Un chantier ouvert pour les recherches prospectives environnementales*. Bruxelles, P.I.E.-Peter Lang, série « EcoPolis », 411 p.
- Mermet L., 2009. Extending the perimeter of reflexive debate on futures research: An open framework. *Futures*, 41 (2), 105-115.
- Miles I., Keenan M., 2002. *Practical guide to regional foresight in the UK*. Luxembourg, European Communities, 132 p.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA), 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington DC, Island Press, 155 p.
- Miller R., 2007. Futures literacy: a hybrid strategic scenario method. *Futures*, 39 (4), 341-362.
- Miller V., Reedy J., Cudhea F., Zhang J., Shi P., Erndt-Marino J., Coates J., Micha R., Webb P., Mozaffarian D., 2022. Global, regional, and national consumption of animal-source foods between 1990 and 2018: findings from the Global Dietary Database. *The Lancet Planetary Health*, 6 (3), e243-e256.
- Misslin R., Clivot H., Levavasseur F., Villerd J., Soulié J.-C., Houot S., Therond O., 2022. Integrated assessment and modeling of regional recycling of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 369, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134725>
- Moine A., 2006. Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. *L'Espace géographique*, 115, <https://doi.org/10.3917/eg.352.0115>
- 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).
- Moore F. C., Lobell D. B., 2015. The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (9), 2670.
- Mora O., Banos V., 2014. La forêt des Landes de Gascogne : vecteur de liens?. *VertigO : La revue électronique en sciences de l'environnement*, 14 (1), 23 p.
- Mora O., Banos V., Carnus J.-M., Régolini M., 2012. Quel avenir pour le Massif des Landes de Gascogne à l'horizon 2050?. Rapport de la prospective. Inra, 290 p.
- Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouél C., Meunier C., Forslund A., Kieffer V., Paresys L., 2023. European Chemical Pesticide-Free Agriculture in 2050. Foresight Report. INRAE, Depe, 643 p. (hal-04231124).
- Mora O., Le Mouél C., Lattre-Gasquet M. (de), Donnars C., Dumas P., Réchauchère O., Brunelle T., Manceron S., Marajo-Petitson E., Moreau C., Barzman M., Forslund A., Marty P., 2020. Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLOS One*, 15 (7), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235597>

- Mottet A., Bicksler A., Lucantoni D., De Rosa F., Scherf B., Scopel E., López-Ridaura S., Gemmil-Herren B., Bezner Kerr R., Sourisseau J.-M., Petersen P., Chotte J.-L., Loconto A., Tittone P., 2020. Assessing transitions to sustainable agricultural and food systems: A tool for agroecology performance evaluation (Tape). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4.
- Mottet A., de Haan C., Falcucci A., Tempio G., Opio C., Gerber P., 2017. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1-18.
- Mottet A., Teillard F., Boettcher P., De' Besi G., Besbes B., 2018. Review: Domestic herbivores and food security: current contribution, trends and challenges for a sustainable development. FAO. *Animal*, 12 (s2), 188-198, <http://dx.doi.org/doi:10.1017/S1751731118002215>
- Muneret L., Mitchell M., Seufert V., Aviron S., Djoudi E.A., Pétilion J., Plantegenest M., Thiéry D., Rusch A., 2018. Evidence that organic farming promotes pest control. *Nature Sustainability*, 1 (7), 361.
- Nassauer J. I., Opdam P., 2008. Design in science: extending the landscape ecology paradigm. *Landscape Ecology*, 23 (6), 633-644, <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9226-7>
- Pahl-Wostl C., 2007. Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21, 49-62.
- Paillard S., Treyer S., Dorin B. (éd.), 2010. *Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Versailles, Éditions Quæ, 296 p.
- Parrott L., Meyer W. S., 2012. Future landscapes: Managing within complexity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10, 382-389, <https://doi.org/10.1890/110082>
- Pärtel M., Bruun H. H., Sammul M., 2005. Biodiversity in temperate European grasslands: origin and conservation. *Grassland Science in Europe*, 10, 1-14.
- Peeters A., 2009. Importance, evolution, environmental impact and future challenges of grasslands and grassland-based systems in Europe. *Grassland Science in Europe*, 55 (3), 113-125.
- Pellerin M., 2021. Listening to herders in West Africa and the Sahel: What future for pastoralism in the face of insecurity and its impacts? Report Réseau Billital Maroobé: Rome (Italie), 163 p. Disponible en ligne : <https://www.maroobe.com/index.php/publications/rapports>
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.-P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M. H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Inra, France.
- Pellerin S., Bamière L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A. I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Therond O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S., Réchauchère O., 2019. Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût?. Synthèse du rapport d'étude, Inra, 114 p.
- Pica-Ciamarra U., Baker D., Morgan N., Ly C., Nouala S., 2013. Investir dans l'élevage en Afrique : Perspectives commerciales pour 2030-2050. Washington, DC, World Bank, <http://hdl.handle.net/10986/17866>
- Pointereau P., Coulon F., Doxa A., Jiguet F., Paracchini M. L., 2010. Location of HVN farmland area in France and links between changes in High nature value farmland areas and changes in birds' population. JRC/Solagro, <http://agrienv.jrc.ec.europa.eu>
- Ponisio L. C., M'Gonigle L. K., Mace K. C., Palomino J., de Valpine P., Kremen C., 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282 (1799), 20141396.
- Popkin B. M., 1993. Nutritional Patterns and Transitions. *Population Development. Review*, 19 (1), 138-157.
- Popkin B. M., 2006. Global nutrition dynamics: the world is shifting rapidly toward a diet linked with noncommunicable diseases. *American Journal of Clinical Nutrition*, 84 (2), 289-298.

- Popp A., Calvin K., Fujimori S., Havlik P., Humpenöder F., Stehfest E., Bodirsky B. L., Dietrich J. P., Doelmann J. C., Gusti M., Hasegawa T., Kyle P., Obersteiner M., Tabeau A., Takahashi K., Valin H., Walldhoff S., Weindl L., Wise M., Kriegler E., van Vuuren D. P., 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42, 331-345.
- Pörtner H. O., Scholes R. J., Agard J., Archer E., Arneth A., Bai X., Barnes D., Burrows M., Chan L., Cheung W. L., Diamond S., Donatti C., Duarte C., Eisenhauer N., Foden W., Gasalla M. A., Handa C., Hickler T., Hoegh-Guldberg O., Ichii K., Jacob U., Insarov G., Kiessling W., Leadley P., Leemans R., Levin L., Lim M., Maharaj S., Managi S., Marquet P. A., McElwee P., Midgley G., Oberdorff T., Obura D., Osman E., Pandit R., Pascual U., Pires A. P. F., Popp A., Reyes-García V., Sankaran M., Settele J., Shin Y. J., Sintayehu D. W., Smith P., Steiner N., Strassburg B., Sukumar R., Trisos C., Val A. L., Wu J., Aldrian E., Parmesan C., Pichs-Madruga R., Roberts D. C., Rogers A. D., Díaz S., Fischer M., Hashimoto S., Lavorel S., Wu N., Ngo H. T. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC, 28 p., <https://doi.org/10.5281/zenodo.4782538>
- Poux X., Aubert P.-M., 2018. Ten Years for Agroecology in Europe: a multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (Tyfa) modelling exercise. Paris, Iddri, <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201809-ST0918EN-TYFA.pdf>, 73 p.
- Raimbault P., Kaminski G., Desautly C., Jolivet A. C., Gadon C., Tomezak S., Pierre H., Mauler C., Garriga A., Ferriga A., Montet-Lattes F., Guyard A., Herrero E., Lemaire M., Vujkovic N., Pons C., Louart C., Périé P., Fuentes S., 2020. Bien manger : un défi au-delà de nos assiettes. Toulouse, France, Université fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées, dossier Exploreur, 43.
- Ramirez R., Wilkinson A., 2014. Rethinking the 2x2 scenario method: Grid or frames?. *Technological Forecasting and Social Change*, 86, 254-264.
- Rangé C., Magnani S., Ancey V., 2020. «Pastoralisme» et «insécurité» en Afrique de l'Ouest. *Revue internationale des études du développement*. Paris, Institut d'études du développement de la Sorbonne, p. 115-150.
- Raworth K., 2017. A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1 (2), e48-e49.
- 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 (1), 1293, <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>
- Reganold J. P., Watcher J. M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 8 p., <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- Richardson K., Steffen W., Lucht W., Bendtsen J., Cornell S. E., Donges J. F., Drüke M., Fetzer I., Bala G., von Bloh W., Feulner G., Fiedler S., Gerten D., Gleeson T., Hofmann M., Huiskamp W., Kumm M., Mohan C., Nogués-Bravo D., Petri S., Porkka M., Rahmstorf S., Schaphoff S., Thonicke K., Tobian A., Virkki V., Lan Wang-Erlandsson L., Lisa Weber L., Rockström J., 2023. Earth beyond six of nine Planetary Boundaries. *Science Advances*, 9, 37, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Ritchey T., 2011. Modeling alternative futures with general morphological analysis. *World Future Review*, 3 (1), 83-94.
- Robinson T. P., Thornton P. K., Franceschini G., Kruska R. L., Chiozza F., Notenbaert A., Cecchi G., Herrero M., Epprecht M., Fritz S., You L., Conchedda G., See L., 2011. Global livestock production systems. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and International Livestock Research Institute (Ilri), 152 p.
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F. S. III, Lambin E., Lenton T. M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H. J., Nykvist B., De Wit C. A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P. K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R. W., Fabry V. J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J. A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475, <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Röös E., Patel M., Spångberg J., Carlsson G., Rydhmer L., 2016. Limiting livestock production to pasture and by-products in a search for sustainable diets. *Food Policy*, 58, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.10.008>
- Roper M., Gupta V., 2016. Enhancing non-symbiotic N₂ fixation in agriculture. *The Open Agriculture Journal*, 10 (1), <https://doi.org/10.2174/1874331501610010007>

Roux A., Dhôte J.-F. (coord.), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Inra et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).

Russeau V., Lo Seen D., Broust F., Bonin M., Praene J.-P., 2023. Food and electricity self-sufficiency trade-offs in Reunion Island: Modelling land-use change scenarios with stakeholders. *Land Use Policy*, 132, 106784.

Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., Therond O., 2017. Designing crop-livestock integration at different levels: Toward new agroecological models?. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108 (1), 5-20.

Sandström V., Chrysafi A., Lamminen M., Troell M., Jalava M., Piipponen J., Siebert S., Van Hal O., Virkki V., Kumm M., 2022. Food system by-products upcycled in livestock and aquaculture feeds can increase global food supply. *Nature Food*, 3 (9), 729-740.

Schils R. L. M., Bufer C., Rhymer C. M., Francksen R. M., Klaus V. H., Abdalla M., Milazzo F., Lellei-Kovács E., ten Berge H., Bertora C., 2022. Permanent grasslands in Europe: Land use change and intensification decrease their multifunctionality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107891>

Schils R., Olesen J. E., Kersebaum K.-C., Rijk B., Oberforster M., Kalyada V., Khitrykau M., Gobin A., Kirchev H., Manolova V., 2018. Cereal yield gaps across Europe. *European Journal of Agronomy*, 101, 109-120, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>

Searchinger T. D., Zions J., Wiersenius S., Beringer T., Dumas P., 2021. A pathway to carbon neutral agriculture in Denmark. Washington, World Resources Institute, 166 p.

Searchinger T., Waite R., Hanson C., Ranganathan J., Dumas P., Matthews E., 2018. Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. WRR Synthesis Report, 564 p.

Simoncini R., Ring I., Sandström C., Albert C., Kasymov U., Arlettaz R., 2019. Constraints and opportunities for mainstreaming biodiversity and ecosystem services in the EU's Common Agricultural Policy: Insights from the Ipbes assessment for Europe and Central Asia. *Land Use Policy*, 88, 104099.

Smit H. J., Metzger M. J., Ewert F., 2008. Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems*, 98 (3), 208-219, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.07.004>

Smith L. C., Haddad L., 2015. Reducing child undernutrition: past drivers and priorities for the post-MDG era. *World Development*, 68, 180-204, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.11.014>

Smith P., Haberl H., Popp A., Erb K. H., Lauk C., Harper R., Tubiello F. N., de Siqueira Pinto A., Jafari M., Sohi S., Masera O., Böttcher H., Berndes G., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E. A., Mbow C., Ravindranath N. H., Rice C. W., Robledo Abad C., Romanovskaya A., Sperling F., Herrero M., House J. I., Rose S., 2013. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals?. *Global Change Biology*, 19(8), 2285-2302, <https://doi.org/10.1111/gcb.12160>

Sourisseau J.-M., Béliers J.-F., Bourgeois R., Soumaré M., Rasolofo P., Guengant J.-P., Bougnoux N., 2017. Penser ensemble l'avenir d'un territoire. Diagnostic et prospective territoriale au Mali et à Madagascar (études de l'Agence française de développement AFD). Paris (France), AFD. Disponible en ligne : <https://www.afd.fr/index.php/fr/penser-ensemble-avenir-territoire>, 179 p.

Soussana J.-F., Lemaire G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9-17, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>

Spaniol M. J., Rowland N. J., 2019. Defining scenario. *Futures & Foresight Science*, 1 (1), e3, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ffo2.3>

Spielman D. J., Ekboir J., Davis K., 2009. The art and science of innovation systems inquiry: Applications to Sub-Saharan African agriculture. *Technology in Society*, 31, 399-405, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2009.10.004>

- Spohr C., 2009. Vers une prospective territoriale post-Grenelle de l'environnement : Questions et modes d'emploi. Commissariat général au développement durable. *Études et documents*, n° 12, 54 p.
- Springmann M., Clark M., Mason-D'Croz D., Wiebe K., Bodirsky B. L., Lassaletta L., De Vries W., Vermeulen S. J., Herrero M., Carlson K. M., 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562 (7728), 519-525, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Springmann M., Godfray H. C. J., Rayner M., Scarborough P., 2016. Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (15), 4146-4151, <https://doi.org/10.1073/pnas.1523119113>
- Springmann M., Wiebe K., Mason-D'Croz D., Sulser T. B., Rayner M., Scarborough P., 2018. Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. *The Lancet Planetary Health*, 2 (10), e451-e461.
- Stehfest E., Bouwman L., van Vuuren D. P., den Elzen M. G. J., Eickhout B., Kabat P., 2009. Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95 (1-2), 83-102, <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6>
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. Livestock's Long Shadow. Environmental Issues and Options. LEAD initiative. Rome (Italie), FAO, 390 p.
- Swinburn B. A., Sacks G., Hall K. D., McPherson K., Finegood D. T., Moodie M. L., Gortmaker S. L., 2011. The global obesity pandemic: shaped by global drivers and local environments. *The Lancet*, 378, 804-814.
- Taillandier P., Grignard A., Gaudou B., Drogoul A., 2014. Des données géographiques à la simulation à base d'agents : application de la plate-forme Gama. Cyberge. *European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, document 671, <https://doi.org/10.4000/cyberge.26263>
- Taillandier P., Vo D. A., Amouroux E., Drogoul, A., 2012. Gama: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. In: Principles and Practice of Multi-Agent Systems: 13th International Conference, Prima 2010, Kolkata, India, November 12-15, 2010, Revised Selected Papers 13 (p. 242-258). Springer Berlin Heidelberg.
- The World Bank, 2009. Minding the stock: bringing public policy to bear on livestock sector development. World Bank Group, Washington, DC, 74 p., <http://documents.worldbank.org/curated/en/573701468329065723/Minding-the-stock-bringing-public-policy-to-bear-on-livestock-sector-development>
- Therond O., Belhouchette H., Janssen S., Louhichi K., Ewert F., Bergez J.-E., Wery J., Heckelet T., Alkan Olsson J., Leenhardt D., Van Ittersum M., 2009. Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science and Policy*, 12 (5), 619-630, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.01.013>
- Therond O., Sibertin-Blanc C., Balestrat M., Gaudou B., Hong Y., Louail T., Nguyen V. B., Panzoli D., Sanchez-Perez J. M., Sauvage S., Taillandier P., Vavasseur M., Mazzega P., 2014. Integrated modeling of social-ecological systems: The Maelia high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems, in Ames D. P., Quinn N. W. T., Rizzoli A. E. (eds), 7th International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs), San Diego, CA, États-Unis, 8 p.
- Thornton P. K., Herrero M., 2014. Climate change adaptation in mixed crop–livestock systems in developing countries. *Global Food Security*, 3, 99-107.
- Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B. L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (50), 260-264.
- Tilman D., Clark M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515, 518-522.
- Tribouillois H., Constantin J., Casal L., Villerd J., Therond O., 2022. Introducing and expanding cover crops at the watershed scale: impact on water flows. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 337, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108050>
- Tribouillois H., Constantin J., Guillon B., Willaume M., Aubriand G., Fontained A., Hauprich P., Kerveillant P., Laurent F., Therond O., 2020. AqYield-N: A simple model to predict nitrogen leaching from crop fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284, 107890, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107890>

- Tribouillois H., Constantin J., Willaume M., Brut A., Ceschia E., Tallec T., Beaudoin N., Therond O., 2018. Predicting water balance of wheat and crop rotations with a simple model: AqYield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 412-422, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.026>
- Van Dijk M., Meijerink G. W., 2014. A review of global food security scenario and assessment studies: Results, gaps and research priorities. *Global Food Security*, 3 (3-4), 227-238.
- Van Vuuren D. P., Kok M. T., Girod B., Lucas P. L., de Vries B., 2012. Scenarios in global environmental assessments: key characteristics and lessons for future use. *Global Environmental Change*, 22 (4), 884-895.
- Van Zanten H. H. E., Mollenhorst H., Klootwijk C. W., Van Middelaar C. E., De Boer I. J. M., 2015. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 747-758.
- Van der Ploeg J. D., 2008. The new peasantries: Struggles for autonomy and sustainability in an era of empire and globalization. London, Earthscan, 356 p.
- Van Ittersum M., Ewert F., Heckelet T., Wery J., Alkan Olsson J., Andersen E., Bezlepina I., Brouwer F., Donatelli M., Flichman G., Olsson L., Rizzoli A., van der Wal T., Wien J. E., Wolf J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems – a component-based framework for the European Union (Seamless). *Agricultural Systems*, 96, 150-165.
- Van Kernebeek H. R., Oosting S. J., Van Ittersum M. K., Bikker P., De Boer I. J., 2016. Saving land to feed a growing population: consequences for consumption of crop and livestock products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (5), 677-687.
- van Selm B., Frehner A., de Boer I. J. M., Van Hal O., Hijbeek R., Van Ittersum M. K., Talsma E. F., Lesschen J. P., Hendriks C. M., Herrero M., 2022. Circularity in animal production requires a change in the EAT-Lancet diet in Europe. *Nature Food*, 3 (1), 66-73.
- Van Zanten H. H. E., Herrero M., Van Hal O., Rööß E., Muller A., Garnett T., Gerber P. J., Schader C., De Boer I. J., 2018. Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. *Global Change Biology*, 24 (9), 4185-4194.
- Van Zanten H. H. E., Meerburg B., Bikker P., Bikker P., Herrero M., De Boer I. J. M., 2016. Opinion paper: The role of livestock in a sustainable diet: a land-use perspective. *Animal*, 10 (4), 547-549.
- Vayssières J., 2021. Modélisation intégrée et pluri-niveaux des stock-flux de matière et d'énergie dans les systèmes agricoles pour l'évaluation multicritère et l'accompagnement de transitions en élevage. Habilitation à diriger des recherches, université de Montpellier, école doctorale Gaia, 122 p.
- Vayssières J., Guerrin F., Paillat J.-M., Lecomte P., 2009. Gamede: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part I – Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems*, 101, 128-138.
- Vayssières J., Thévenot A., Acosta I., Vigne M., Tillard E., 2019. A participatory, territory-rooted and change-oriented approach to assess the multi-criteria contribution of an agrifood value chain to sustainable development. *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability*, 3 (1), 43-63.
- Vertes F., Jeuffroy M.-H., Louarn G., Voisin A.-S., Justes E., 2015. Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations. *Fourrages*, 223, 221-232.
- Voinov A., Bousquet F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, 25 (11), 1268-1281, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>
- Walker D. H., 2002. Decision support, learning and rural resource management. *Agricultural Systems*, 73, 113-127.
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503-515.
- WHO, 2007. Protein and amino acid requirements in human nutrition. WHO Technical Report Series, vol 935. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Wiebe K., Zurek M., Lord S., Brzezina N., Gabrielyan G., Libertini J., Loch A., Thapa-Parajuli R., Vervoort J., Westhoek H., 2018. Scenario development and foresight analysis: exploring options to inform choices. *Annual Review of Environment and Resources*, 43 (1), 545-570.
- Wiek A., Iwaniec D., 2014. Quality criteria for visions and visioning in sustainability science. *Sustainability Science*, 9, 497-512.

- Wiesmeier M., Hübner R., Kögel-Knabner I., 2015. Stagnating crop yields: An overlooked risk for the carbon balance of agricultural soils?. *Science of The Total Environment*, 536, 1045-1051.
- Wilkinson J., 2011. Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*, 5 (7), 1014-1022.
- Willett W., Rockström J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., Garnett T., Tilman D., DeClerck F., Wood A., Jonell M., Clark M., Gordon L. J., Fanzo J., Hawkes C., Zurayk R., Rivera J. A., De Vries W., Sibanda L. M., Afshin A., Chaudhary A., Herrero M., Agustina R., Branca F., Lartey A., Fan S., Crona B., Fox E., Bignet V., Troell M., Lindahl T., Singh S., Cornell S. E., Reddy K. S., Narain S., Nishtar S., Murray C. J. L., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393 (10170), 447-492.
- Wirsén S., Azar C., Berndes G., 2010. How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030?. *Agricultural Systems*, 103 (9), 621-638.
- World Health Organization/Food and Agriculture Organization, 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a joint WHO/FAO expert consultation. WHO Technical Report Series 916. WHO, Geneva, 160 p.
- World Population Prospects, 2015. The 2015 Revision.
- Wu J., 2013. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28 (6), 999-1023, <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9>
- Zhai F. Y., Du S. F., Wang Z. H., Zhang J. G., Du W. W., Popkin B. M., 2014. Dynamics of the Chinese diet and the role of urbanicity, 1991-2011. *Obesity Reviews*, 15, 16-26.
- Zurek M. B., Henrichs T., 2007. Linking scenarios across geographical scales in international environmental assessments. *Technological Forecasting and Social Change*, 74 (8), 1282-1295.
- Zurek M., Hebinck A., Selomane O., 2021. Looking across diverse food system futures: Implications for climate change and the environment. *Q Open*, 1 (1), qoaa001, <https://doi.org/10.1093/qopen/qoaa001>

Abréviations et unités

Abea : Association bretonne des entreprises agroalimentaires

ACCT : AgriClimateChangeTool

ACV : analyse de cycle de vie

Ademe : Agence de la transition écologique (anciennement Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)

(A)MF : (approche) multifactorielle

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

Cedeao : Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest

CGDD : Commissariat général au développement durable

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Crab : chambre régionale d'agriculture de Bretagne

DGAL : direction générale de l'Alimentation

DGEC : direction générale de l'Énergie et du Climat

DGPE : direction générale de la Performance économique et environnementale des entreprises

EMC : évaluation multicritère

ETM : élément trace métallique

GES : gaz à effet de serre, exprimé en kilogrammes d'équivalent dioxyde de carbone (kg CO₂ eq)

Giec (IPCC) : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

h : heure

ha : hectare

IAM : *integrated assessment and modelling*

IFT : indice de fréquence de traitement

Iddri : Institut du développement durable et des relations internationales

Ifip : Institut de la filière porcine

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

Ilri : international livestock research institute

Inca : Étude individuelle nationale des consommations alimentaires

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

IPBES : Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services

IPCC : Intergovernmental panel on climate change

km : kilomètre

kg : kilogramme

Maec : mesures agro-environnementales et climatiques de la Pac

MC : modèle conceptuel

Mha : million d'hectares

MoSUT : modélisation systémique sur l'utilisation des terres

NC : neutralité carbone

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

ODD : objectif de développement durable

PAC : Politique agricole commune

PCAET : plan climat-air-énergie territorial

PIL : plateforme multi-acteur d'innovation lait

PNA : Plan national pour l'alimentation

PNACC : Plan national d'adaptation au changement climatique

PNNS : Plan national nutrition santé

PNRI : Plan national de recherche et innovation

PP : prairies permanentes

PRG 100 : pouvoir de réchauffement global à l'horizon 100 ans

PSE : paiement pour service environnementaux

RMT MAELE : réseau mixte technologique MAcro-ÉLevages-Environnement

SAE : socio-agro-écosystème

SAU : surface agricole utile (en %)

SdC : système de culture

SFEC : Stratégie française pour l'énergie et le climat

SGPE : Secrétariat général à la planification écologique

SIG : système d'information géographique

SMA : système multi-agent

SNANC : Stratégie nationale pour l'alimentation, la nutrition et le climat

SNB : Stratégie nationale biodiversité

SNBC : Stratégie nationale bas carbone

SNDI : Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée

SNPV : Stratégie nationale sur les protéines végétales

STH : surface toujours en herbe (comprend prairies naturelles permanentes productives et prairies peu productives)

Tyfa : Ten Years for Agroecology in Europe

UT : unité de transformation de biomasse

VL : vache laitière

WWF : World Wide Fund for Nature

Liste des auteurs

Coordinateurs

Aurélié Wilfart, UMR Sol, agro et hydrosystèmes, spatialisation (SAS), INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Rennes, France.

Jonathan Vayssières, UMR Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (Selmet), Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Saint-Pierre, La Réunion.

Comité éditorial

Audrey Béthinger, direction de l'expertise, de la prospective et des études (Depe), INRAE, Paris, France.

Sandrine Espagnol, Institut du porc, Ifip, Pacé, France.

Olivier Mora, Depe, INRAE, Paris, France.

Mathieu Vigne, UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Antsirabe 110, Madagascar.

Auteurs de chapitre

Véronique Ancey, UMR Art-Dev, Cirad, CNRS, université Montpellier 3, université de Perpignan Via Domitia, Montpellier, France.

Pierre-Marie Aubert, Iddri, service Politiques agricoles et alimentaires, Paris, France.

Mélanie Blanchard, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Vincent Blanfort, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Jean-Daniel Cesaro, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Christian Corniaux, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Christian Couturier, Solagro, Toulouse, France.

Arona Diaw, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et Laiterie du Berger, Dakar, Senegal.

Bernard Hubert, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et unité de recherche Écodéveloppement, INRAE, Avignon, France.

Alexandre Ickowicz, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Jacques Lasseur, Global Agenda for Sustainable Livestock; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Selmet, Cirad, INRAE, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France.

Chantal Le Mouël, UMR Structures et marchés agricoles, ressources et territoires (Smart), INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Rennes, France.

Huyen Le Thi Thanh, Global Agenda for Sustainable Livestock ; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et Nias, Hanoï, Vietnam.

Maud Marguet, chambre d'agriculture de Bretagne, service Économie-Emploi, Rennes, France.

Jean-Pierre Müller, Global Agenda for Sustainable Livestock ; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et UMR Savoirs, environnements, sociétés (Sens) et UMR Selmet, Cirad, IRD, université de Montpellier, Montpellier, France.

Antoine Pierart, Ademe, service Planification énergétique, prospective, impacts et territoires, Angers, France.

Xavier Poux, AScA, service Politiques publiques et développement agricole, Paris, France.

Jean-Michel Sourisseau, UMR Acteurs, ressources et territoires dans le développement (Art-Dev), Cirad, CNRS, université Montpellier 3, université de Perpignan Via Domitia, Montpellier, France.

Olivier Therond, UMR Laboratoire agronomie et environnement, UMR LAE, INRAE, université de Lorraine, Colmar, France.

Liz Wedderburn, UMR Selmet et Global Agenda for Sustainable Livestock ; « Restoring value to grassland » network, FAO, Rome, Italie et AgResearch Ltd., Hamilton, Nouvelle-Zélande.

Illustration de couverture : Thomas Arnaud

Coordination éditoriale : Géraldine Doité

Édition : Eline Susset

Mise en pages : Hélène Bonnet, Studio9

Couverture : Farah Dekiouk et Anaïs Naïmi

Le système alimentaire mondial fait face à trois grands défis : garantir la sécurité alimentaire, préserver l'environnement et améliorer la santé humaine. L'élevage, au croisement de ces enjeux, joue un rôle central. Toutefois, l'évolution des régimes alimentaires, la croissance démographique et les transformations des paysages diffèrent selon les régions du monde. Ces dynamiques soulèvent des questions sur la place de l'élevage dans les territoires, sa forme, ses impacts et les services qu'il peut rendre. Comment anticiper ces transformations et en évaluer les conséquences ?

Une diversité de démarches prospectives menées dans des contextes variés (au Nord comme au Sud) et à différentes échelles (du local au global) est présentée dans cet ouvrage. Il explore l'articulation entre les méthodes qualitatives de (co-) construction de scénarios et les approches quantitatives de modélisation et d'évaluation. L'ouvrage interroge également le déroulement temporel du cycle prospective-modélisation-évaluation, l'identification des variables clés, l'usage des données, ainsi que la place des acteurs dans le processus, notamment en ce qui concerne l'appropriation des résultats pour orienter les décisions.

Cet ouvrage est issu d'une école-chercheurs organisée par INRAE et le Cirad dans le cadre du réseau mixte technologique Macro-Élevage-Environnement (RMT MAELE). Il s'adresse à la communauté scientifique engagée dans des démarches interdisciplinaires. Il intéressera également les acteurs de l'agriculture, de l'environnement et de l'alimentation, ainsi que ceux impliqués dans le développement durable des territoires agricoles.

Aurélie Wilfart est agronome zootechnicienne et ingénieure de recherche à INRAE (UMR SAS). Son domaine de recherche porte sur l'évaluation environnementale et multicritère des systèmes d'élevages terrestres et aquatiques, à différentes échelles spatiales, essentiellement en France et en Europe.

Jonathan Vayssières est agronome modélisateur et chercheur au Cirad (UMR Selmet). Il mène des recherches sur la modélisation intégrée et pluri-niveaux des stock-flux de matière et d'énergie dans les territoires agricoles en Afrique de l'Ouest et dans les îles de l'Océan indien.



éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com



32 €

ISBN : 978-2-7592-4065-4



ISSN : 1773-7923
Réf. : 03018