

INRAE

Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050

Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale

Rapport de synthèse de l'étude conduite par INRAE - Février 2020

Contacts :
Philippe Debaeke, INRAE, co-pilote scientifique de l'étude : philippe.debaeke@inrae.fr
Agneta Forslund, INRAE, responsable de la modélisation : agneta.forslund@inrae.fr
Hervé Guyomard, INRAE, co-pilote scientifique de l'étude : herve.guyomard@inrae.fr
Bertrand Schmitt, INRAE, co-pilote scientifique de l'étude : Bertrand.schmitt@inrae.fr
Anaïs Tibi, INRAE, coordinatrice de l'étude : anais.tibi@inrae.fr

Directeur de la publication : Guy Richard, Directeur de la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE)

Le présent document constitue le Rapport de synthèse d'une Étude réalisée à la demande et grâce au soutien de l'association Pluriagri ; elle a été conduite par la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la prospective et des études d'INRAE, et selon les principes et règles de conduite établies par cette structure et disponibles sur le site internet d'INRAE.

Le contenu des documents produits dans le cadre de cette étude n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Il a été élaboré par l'équipe projet et les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou par INRAE.

Direction de l'Expertise scientifique collective,
de la Prospective et des Études (DEPE)

Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050

Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire

Rapport de synthèse

Février 2020

Auteurs principaux : Anaïs Tibi, Agneta Forslund, Philippe Debaeke, Bertrand Schmitt, Hervé Guyomard

Co-auteurs : Elodie Marajo-Petitzon, Tamara Ben-Ari, Annette Bérard, Antonio Bispo, Jean-Louis Durand, Philippe Faverdin, Jacques Le Gouis, David Makowski, Serge Planton

Pour citer ce document :

Tibi A., Forslund A., Debaeke P., Schmitt B., Guyomard H. (coord.), Marajo-Petitzon E., Ben-Ari T., Bérard A., Bispo A., Durand J.-L., Faverdin P., Le Gouis J., Makowski D., Planton S. (2020). Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire. Rapport de synthèse de l'étude. INRAE (France), 159 p + Annexes.

Sommaire

Introduction générale ... 7

Composition du groupe de travail ... 13

Chapitre 1. Place actuelle de l'Europe agricole dans le monde et démarche de simulation à l'horizon 2050 ... 15

1.1. Découpage géographique de l'Europe et du reste du Monde ... 15

1.2. L'Europe dans l'agriculture mondiale ... 17

1.3. Méthodologie de simulation à l'horizon 2050 ... 21

1.3.1. Des projections établies sur la base d'un modèle de bilans emplois-ressources ... 21

1.3.2. Le modèle GlobAgri-AE2050 ... 24

Chapitre 2. Les effets du changement climatique sur la production agricole végétale et animale ... 29

2.1. Manifestations futures du changement climatique ... 30

2.1.1. Évolution future de la température moyenne annuelle de surface ... 31

2.1.2. Évolution future des précipitations moyennes annuelles ... 32

2.1.3. Changement climatique et événements extrêmes ... 33

2.2. Effets du changement climatique sur la production agricole végétale ... 33

2.2.1. Méthodes utilisées pour étudier l'impact du changement climatique sur la production agricole végétale ... 34

2.2.2. Effets d'une augmentation des températures sur les rendements des cultures ... 34

2.2.3. Effets d'une modification du régime des précipitations sur les rendements des cultures ... 35

2.2.4. Effets de l'augmentation de la teneur en CO_2 sur les rendements des cultures ... 35

2.2.5. Effets du changement climatique sur la santé des plantes ... 38

2.3. Effets du changement climatique sur les productions animales ... 40

2.3.1. Effets du changement climatique sur les animaux, leur productivité, leur santé et leur bien-être ... 40

2.3.2. Effets du changement climatique sur les ressources alimentaires des animaux ... 41

2.4. Effets du changement climatique sur la qualité et la quantité des terres cultivables ... 43

2.5. Synthèse partielle ... 44

Chapitre 3. Projections des variables clefs de l'offre agricole à l'horizon 2050 ... 47

3.1. Caractérisation du climat en 2050 dans les 21 régions de l'étude ... 47

3.2. Projections des rendements végétaux en 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques ... 49

3.2.1. Effets du changement climatique en 2050 sur les rendements végétaux ... 49

3.2.2. Effets des évolutions techniques en 2050 sur les rendements végétaux ... 53

3.2.3. Comparaison des projections de rendements en 2050 et méthodologie de sélection des projections pour la réalisation des simulations GlobAgri-AE2050 ... 56

3.3. Projections en 2050 des efficiences animales ... 59

3.3.1. Calibration des coefficients des efficiences animales en « 2010 » ... 60

3.3.2. Projections des coefficients des efficiences animales en 2050 et comparaison avec les coefficients de « 2010 » ... 61

3.4. Projections des intensités culturales en 2050 68
3.5. Projections en 2050 des surfaces cultivables : effets du changement climatique et évolution de l'artificialisation des sols 69
3.4.1. Méthodologie d'estimation des surfaces cultivables disponibles à l'horizon 2050 70
3.4.2. Utilisation des surfaces cultivables en « 2010 » 71
3.5.3. Évolution des surfaces potentiellement cultivables à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique 72
3.6. Synthèse partielle 73

Chapitre 4. L'évolution de la demande en produits agricoles à l'horizon 2050 77
4.1. La demande alimentaire 78
4.1.1. Dynamiques démographiques régionales à l'horizon 2050 : les projections médianes de l'ONU 78
4.1.2. Évolution des régimes alimentaires : deux hypothèses contrastées 79
4.1.3. Bilan : évolution de la demande alimentaire mondiale 85
4.2. La demande en matières premières agricoles pour la production de biocarburants 86
4.2.1. Évolution de la production des biocarburants en Europe et dans le monde jusqu'à 2050 86
4.2.2. Évolution des quantités de matières premières agricoles utilisées pour la production des biocarburants 88
4.3. Synthèse partielle 89

Chapitre 5. Résultats à l'horizon 2050 des simulations des quatre scénarios de référence 91
5.1. Besoins en surfaces cultivées à l'horizon 2050 selon les composantes des systèmes alimentaires des régions d'Europe et du monde 92
5.1.1. Évolutions estimées en Europe 93
5.1.2. Évolutions estimées dans le reste du monde 96
5.2. Des régions à forte tension sur les surfaces et des régions à surplus potentiel de terres 99
5.2.1. Des évolutions de surfaces cultivées très différenciées selon les régions et les scénarios 99
5.2.2. Des résultats globaux en cohérence avec la littérature 101
5.2.3. Des extensions des surfaces en prairies permanentes qui pourraient devenir extrêmes 102
5.3. Production et participation aux échanges internationaux des régions d'Europe et du reste du monde à l'horizon 2050 105
5.3.1. Évolutions estimées en Europe 105
5.3.2. Évolutions estimées dans le reste du monde 107
5.4. Sensibilité des résultats à des contraintes plus restrictives sur les terres cultivables 110
5.4.1. Limitation des terres cultivables aux surfaces non couvertes par la forêt et susceptibles d'être urbanisées 110
5.4.2. Restriction des terres cultivables aux seules surfaces cultivées en « 2010 » 112
5.5. Synthèse partielle 114

Chapitre 6. Marges de manœuvre pour réduire l'extension des terres cultivées dans certaines régions du monde : quelle contribution possible de l'Europe ? 117
6.1. Augmentation des exportations permise par l'utilisation des surplus potentiels de terres 118
6.1.1. Évaluation du potentiel d'exportations agricoles de l'Europe sur les surplus de terres 119
6.1.2. Contribution de l'Europe à l'allègement des tensions sur les surfaces africaines 121

6.2. Utilisation des surplus potentiels de terres pour diminuer la dépendance européenne aux importations de protéines végétales 122
6.2.1. Évaluation du potentiel de production de soja en Europe 123
6.2.2. Évaluation de l'évolution de la dépendance protéique de tourteaux en l'Europe 124
6.2.3. Traduction en équivalents surfaces préservées au Brésil-Argentine 125
6.3. Synthèse partielle 126

Chapitre 7. Rendements européens à l'horizon 2050 : marges de manœuvre et incertitudes 127
7.1. Relâchement de la pression sur les rendements des cultures en Europe 127
7.2. Sensibilité des rendements européens à un impact accentué du stress hydrique pendant la période de croissance des cultures 130
7.2.1. Modélisation de la contrainte intra-annuelle en eau et de ses impacts 130
7.2.2. Effets sur les agricultures européennes d'une accentuation des impacts liés à la limitation de la ressource en eau 133
7.3. Synthèse partielle 135

Chapitre 8. Conclusion générale : apports méthodologiques, enseignements, incertitudes et besoins de recherches 137
8.1. Principaux apports méthodologiques et enseignements de l'étude 137
8.1.1. Principaux apports méthodologiques 137
8.1.2. Principaux enseignements 139
8.2. Des facteurs d'incertitude non explicitement pris en compte 143
8.2.1. Adaptations au changement climatique 143
8.2.2. D'autres facteurs d'incertitude non explicitement pris en compte 146
8.3. De nombreux besoins de recherches 149

Références citées dans le rapport de synthèse 153

Introduction générale

Les effets du changement climatique sur la production agricole, affectant en cascade la sécurité alimentaire, les échanges mondiaux et l'environnement, sont protéiformes et, à plus d'un titre, incertains. Dans un contexte géopolitique global mouvant, dont l'instabilité pourrait être accentuée par les effets du changement climatique, les contributions des différentes régions du monde à la sécurité alimentaire mondiale pourraient être grandement modifiées, les orientations agricoles et les stratégies commerciales régionales pouvant évoluer assez profondément.

En Europe comme dans les autres régions du monde, l'agriculture est confrontée au double défi que représentent la réduction de ses impacts environnementaux et le maintien d'un niveau de production suffisant pour faire face aux évolutions des demandes domestiques et à la croissance de la demande mondiale. Parallèlement aux modifications des conditions de production, de fortes mutations des régimes alimentaires sont susceptibles d'affecter la demande en produits agricoles. Au-delà de leur impact sur la santé des consommateurs, de tels changements peuvent également être des facteurs significatifs d'accentuation ou d'atténuation du changement climatique. C'est donc pour examiner les évolutions possibles de la place des agricultures européennes sur les marchés agricoles mondiaux à l'horizon 2050, compte tenu des incertitudes relatives aux effets du changement climatique, des pressions foncières liées à l'extension des surfaces agricoles et des impacts des changements alimentaires, que l'association Pluriagri[1] a fait appel à l'Inra (devenu depuis INRAE) au début de l'année 2017.

La délicate quantification des effets futurs du changement climatique sur la production agricole

Les mécanismes généraux qui sous-tendent les effets du climat sur la production agricole sont aujourd'hui assez bien connus, comme en témoigne l'évolution, d'un rapport au suivant, du niveau de confiance attribué par les experts du GIEC[2] aux connaissances relatives à ces questions. Les rapports du GIEC les plus récents repèrent d'ailleurs des travaux qui proposent des quantifications des impacts du changement climatique sur l'évolution *passée* des rendements de certaines cultures et dans certaines régions du monde (Mbow *et al.*, 2019). Ces travaux tendent à montrer que l'évolution du climat a limité l'augmentation moyenne des rendements, liée, depuis les années 1960, à l'augmentation de l'usage des intrants et au progrès technique[3] (dont la combinaison est désignée ci-après « évolutions techniques »). La quantification, région du monde par région du monde, des effets *futurs* du changement climatique sur les productions agricoles demeure néanmoins très incertaine.

L'augmentation de la température annuelle moyenne, les variations de la pluviométrie et l'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 sont les principales variations des paramètres climatiques qui affectent directement le développement des végétaux, et donc la productivité (quantité et qualité) des cultures et des fourrages. Peu d'études considèrent conjointement les variations de ces trois paramètres climatiques clefs et de leurs interactions pour une large gamme de cultures et de régions. Ainsi, la combinaison de modèles de climat et de modèles de culture peut conclure, selon les modèles et les hypothèses retenues, à des estimations très variables. Le changement climatique agit également sur la disponibilité en eau pour l'irrigation, la pression de bioagresseurs ou encore les propriétés des sols, mais l'état actuel des connaissances scientifiques ne permet pas d'estimer de façon robuste les tendances d'évolution futures de tous ces phénomènes et de leurs

[1] Pluriagri est une association formée par des acteurs des filières des grandes cultures (Avril, Confédération générale des planteurs de betteraves, Unigrains) et le Crédit Agricole S.A. pour conduire des réflexions prospectives sur les marchés et les politiques agricoles.

[2] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement.

[3] En économie, le progrès technique représente l'amélioration des connaissances scientifiques et de l'organisation de la production qui permettent une amélioration de la productivité, autrement dit une augmentation de la production pour une quantité fixe de facteurs de production utilisés (en agriculture la terre, le travail, les intrants, etc.). Dans cette étude, la notion de progrès technique est à comprendre dans une acception large, incluant de multiples composantes, notamment le progrès génétique, les innovations technologiques, ou encore l'évolution des pratiques agricoles.

effets pour l'ensemble des situations pédoclimatiques et des cultures. À ces effets moyens directs et indirects s'ajoutent les conséquences des événements extrêmes (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, etc.), dont la fréquence et l'intensité devraient globalement augmenter à l'avenir. Par définition plus ponctuels, plus localisés et moins prévisibles, les impacts à long terme de ces événements sur les activités agricoles sont donc encore plus difficiles à appréhender.

Parallèlement, l'agriculture est un important contributeur au changement climatique[4] tout en constituant l'un des leviers de son atténuation. Dans la même logique, si certaines pratiques agricoles sont à l'origine d'impacts environnementaux qui s'additionnent et/ou modulent ceux du changement climatique, l'évolution de ces pratiques et des systèmes de culture et d'élevage est le levier majeur d'adaptation à ce dernier. Toute projection quantitative des effets du changement climatique sur la production agricole est donc nécessairement associée, de façon plus ou moins explicite, à des hypothèses d'évolution future des systèmes de production.

Parmi l'ensemble des incertitudes, la manière dont est traité l'effet fertilisant du CO_2[5] dans les projections existantes de rendements végétaux (projections mobilisées dans de nombreux travaux prospectifs sur la sécurité alimentaire mondiale), est un exemple de la difficulté à appréhender la multiplicité et l'intrication des facteurs listés précédemment. Cet effet potentiellement positif sur le rendement des végétaux est mis en évidence dans la littérature scientifique, mais son expression « au champ » est intimement liée à la génétique et à l'état hydrique et nutritif des cultures. Il est souvent non pris en compte dans les études prospectives au motif de la difficulté à prédire tant les effets du changement climatique sur les ressources en nutriments et en eau que les évolutions techniques conditionnant l'offre variétale et l'accès, l'utilisation et l'efficacité des intrants. Or la nature et l'ampleur de ces évolutions techniques sont difficiles à appréhender, leurs effets sur les rendements sont également incertains.

Démarche adoptée dans la présente étude

Cette étude prolonge les travaux prospectifs antérieurs ou contemporains menés sur les enjeux que représentent la sécurité alimentaire mondiale – tels que ceux conduits par l'Inra, le Cirad, la FAO (Organisation des Nations-unies pour l'alimentation et l'agriculture), l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*) ou encore l'IFPRI (*International Food Policy Research Institute*)[6]. Comme dans ces travaux, on examine à l'horizon 2050 l'évolution des surfaces, des niveaux de productions, et des échanges mondiaux de produits agricoles, en fonction (i) de celle de la demande en produits agricoles (notamment liée à la croissance démographique et aux évolutions des régimes alimentaires) et (ii) des caractéristiques clefs des systèmes agricoles que sont les rendements (végétaux et animaux), les intensités culturales[7], les disponibilités en terres. On se propose, dans cette étude, d'intégrer aussi explicitement que possible les effets du changement climatique dans la projection des variables clefs décrivant les systèmes agricoles, en mettant notamment l'accent sur la caractérisation des incertitudes relatives à l'évolution des rendements végétaux à l'horizon 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques agricoles (sélection variétale, pratiques agricoles, etc.).

Habituellement considérée comme une unique région dans la littérature prospective mondiale (voire englobée dans des ensembles géographiques encore plus vastes), l'Europe, objet central de cette étude, est ici subdivisée en huit régions afin de tenir compte de la diversité des agricultures européennes. On cherche ainsi à examiner l'évolution possible du potentiel de ces agricultures à la fois vis-à-vis de leur contribution à la sécurité alimentaire mondiale, appréhendée sous l'angle de la disponibilité des aliments[8], et des enjeux environnementaux liés à *l'extension des surfaces agricoles*, pouvant s'opérer au détriment d'écosystèmes naturels.

---

[4] Sur la période 2007-2016, l'agriculture mondiale est à l'origine d'environ 21 % des émissions anthropiques nettes annuelles de GES (12 % issus de la production agricole elle-même et 9 % du changement d'usage des sols – (IPCC, 2019).

[5] L'effet fertilisant du CO_2 est l'augmentation du taux de photosynthèse chez les plantes résultant de l'accroissement de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone.

[6] Pour une synthèse, on pourra se reporter à Le Mouël et Forslund (2017). Pour plus de détails sur ces travaux, on se reportera, par exemple, à FAO (2018), Popp *et al.* (2017), Le Mouël *et al.* (2018) ou encore Dury *et al.* (2019).

[7] L'intensité culturale peut être définie comme le rapport de la surface récoltée sur la surface cultivée.

[8] Les quatre piliers de la sécurité alimentaire sont l'accès à l'alimentation (capacité de produire ou d'acheter sa propre alimentation), sa disponibilité (quantités suffisantes d'aliments), la qualité (nutritionnelle, sanitaire, mais aussi socio-culturelle) des aliments et des régimes alimentaires, et la stabilité des trois piliers précédents.

Les scénarios élaborés et quantifiés dans cette étude répondent à une logique globalement tendancielle. On fait ainsi l'hypothèse générale que les mécanismes économiques, sociaux et politiques actuels prévaudraient toujours en 2050. Une telle hypothèse s'apparente au scénario socio-économique « *Middle Of The Road* » (SSP2)[9] définie par le GIEC, et peut se traduire par une trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre de type RCP6.0 (voire RCP8.5)[10]. Cette hypothèse, qui dessine l'esprit du monde hypothétique de 2050 considéré dans cette étude, fixe le cadre dans lequel sont projetées les évolutions de chacune des grandes variables constitutives des systèmes agricoles et alimentaires mondiaux. Pour établir ces projections, on ne se contente pas d'extrapoler, à l'horizon 2050, les tendances observées par le passé de chacune des variables du système. Ces tendances des deux dernières décennies jettent les bases des projections, mais leur prolongement est ajusté pour tenir compte d'incertitudes susceptibles de moduler les trajectoires d'évolution future des variables. Notons que les scénarios ainsi établis ne cherchent pas à prédire le futur, ni même à décrire les évolutions les plus probables.

Une analyse critique de la littérature scientifique relative aux effets du changement climatique sur la production agricole – plus précisément sur les rendements végétaux, la santé des plantes, les productions animales et la qualité et les superficies de terres cultivables – a été conduite pour caractériser l'incertitude associée à ces effets et identifier, parmi l'ensemble des facteurs qui sous-tendent la production, ceux dont la littérature permet de quantifier l'évolution future. Sur cette base, et en mobilisant les données disponibles dans la littérature, les déterminants de l'offre en produits agricoles (rendements végétaux et animaux, intensités culturales, surfaces cultivables disponibles) ont été projetés à l'horizon 2050, en veillant à la cohérence des hypothèses retenues pour l'ensemble des régions du monde. Ces projections permettent de dessiner une trajectoire d'évolution de la production agricole dans les 21 régions du monde considérées. En particulier, la prise en compte à la fois des effets du changement climatique et des évolutions techniques sur les rendements conduit à définir une fourchette [basse-haute] de ces rendements à l'horizon 2050 plutôt qu'un unique jeu de projections.

En complément et pour faire écho aux débats sur les nécessaires évolutions des régimes alimentaires (Searchinger *et al.*, 2018), deux options possibles d'évolutions des régimes alimentaires ont été envisagées à partir des hypothèses adoptées par la FAO (Alexandratos et Bruinsma, 2012) et dans la prospective Agrimonde-Terra conduite par l'Inra et le Cirad (Le Mouël *et al.*, 2018). La première correspond au prolongement tendanciel des régimes actuels, l'autre fait l'hypothèse normative que s'engage, au cours de la période considérée, une convergence des régimes alimentaires vers des consommations plus favorables à la santé.

Un ensemble de simulations a ensuite été réalisé à l'aide d'un modèle de bilan matière, GlobAgri-AE2050, initialement élaboré dans le cadre d'Agrimonde-Terra[11] et amélioré pour les besoins de la présente étude. Ce modèle simule l'équilibre entre la disponibilité (production et commerce extérieur) et les besoins (alimentation humaine et animale, utilisations non alimentaires) de chaque produit agricole dans chaque région du monde. Les simulations permettent ainsi de traduire ces scénarios en évolutions des surfaces agricoles (sous contrainte de la disponibilité en terres), des niveaux de production et de la contribution aux échanges commerciaux de chaque région du monde à l'horizon 2050. À partir des résultats des simulations, diverses stratégies visant à alléger les tensions foncières dans certaines régions du monde (au sens d'augmentations fortes des surfaces agricoles et/ou de saturation des contraintes en terres) ont été explorées en se posant pour chacune d'entre elles la question de la contribution relative des agricultures européennes à cet objectif.

Précisons que la caractérisation et la quantification des impacts environnementaux associés aux activités agricoles ne sont pas explicitement dans le champ de cette étude, tout comme les formes que pourraient prendre des stratégies d'atténuation du changement climatique. Les changements d'usages des sols induits par l'extension des surfaces agricoles, qui constitue une des variables d'intérêt majeur du travail présenté ici, sont néanmoins susceptibles d'induire un accroissement des émissions de gaz à effet de serre, d'engendrer des pollutions environnementales et/ou de porter atteinte à la biodiversité et à la fourniture de services écosystémiques. Le cadre d'analyse adopté ici permet d'identifier les zones de fortes tensions foncières à l'horizon 2050 et les leviers dont disposeraient les régions pour limiter ces extensions de surfaces agricoles sans porter préjudice à la disponibilité alimentaire. La caractérisation de la nature et de l'ampleur des impacts environnementaux associés aux scénarios simulés, tout comme des effets positifs (toujours sur le plan environnemental) des stratégies qui pourraient être mises en œuvre pour alléger les tensions foncières, ne relève cependant pas du cahier des charges de l'étude. En effet, un tel travail nécessiterait d'établir des hypothèses précises sur l'évolution des pratiques (notamment en matière de

[9] SSP pour Shared Socioeconomic Pathway.

[10] RCP pour *Representative Concentration Pathways*. Le RCP6.0 (RCP8.5) correspond à un forçage radiatif de +6,0 W/m^2 (+8,5 W/m^2) pour l'année 2100.

[11] Ce modèle a également été construit et mobilisé par Le Mouël et Schmitt (2018).

recours aux intrants de synthèse, à la mécanisation, etc.) et, plus globalement, des systèmes de production ainsi que sur la nature des écosystèmes concernés par les changements d'usage des sols. Or, dans l'analyse présentée ci-après comme dans de nombreux travaux prospectifs sur la sécurité alimentaire mondiale, la mesure de l'évolution des systèmes de production à l'horizon 2050 se résume à celle des rendements (végétaux et animaux) et des intensités culturales, quelle que soit la façon dont les évolutions des pratiques et systèmes agricoles sont décrites d'un point de vue « narratif ». Dans la même logique, et par construction, la réflexion développée dans cette étude n'explicite pas les implications économiques et sociales des scénarios, ainsi que les conditions socio-économiques, politiques et réglementaires nécessaires à la mise en œuvre des stratégies proposées.

Organisation du travail

La présente étude a été conduite par l'Inra (devenu depuis INRAE), en adoptant les principes et la méthode établis par sa Délégation à l'expertise collective, à la prospective et aux études (DEPE) pour la conduite des Expertises scientifiques collectives (ESCo). Ces principes sont décrits dans un guide rendu public (INRA-DEPE, 2018)[12].

Un collectif d'une vingtaine d'experts et de contributeurs scientifiques d'origines institutionnelles diverses et aux compétences disciplinaires complémentaires (climatologie, agronomie, sciences animales, génétique, écophysiologie, pédologie, hydrologie…) a été mobilisé par l'Inra pour réaliser le volet d'analyse de la littérature scientifique internationale de l'étude. En parallèle, un groupe de scénarisation, composé d'opérateurs et de quelques experts scientifiques, a été constitué par l'Inra et Pluriagri afin d'épauler l'équipe projet dans l'élaboration des hypothèses d'évolution des différentes variables du système et dans la construction des scénarios. La liste des membres de ces deux collectifs figure en dernière page du présent document.

L'équipe projet s'organise, quant à elle, autour de trois pôles : (i) La coordination générale de l'étude a été assurée par Anaïs Tibi, cheffe de projet au sein de la DEPE, aidée par Marc-Antoine Caillaud, Kim Girard et Samia Oukaci (DEPE) pour la gestion logistique et financière du projet ainsi que l'organisation du colloque de restitution des résultats. (ii) L'animation scientifique du travail a été placée sous la responsabilité de trois chercheurs d'INRAE : Philippe Debaeke (agronome), pilote de la revue bibliographique réalisée par les experts scientifiques, et Hervé Guyomard et Bertrand Schmitt (économistes), pilotes du volet de modélisation et de scénarisation. (iii) Une équipe de modélisation, constituée d'Agneta Forslund et d'Elodie Marajo-Petitzon (économistes, INRAE) a réalisé la quantification des variables d'entrée du modèle, les simulations des scénarios et leurs analyses complémentaires.

Un Comité de suivi, animé par la DEPE et composé de représentants de Pluriagri et d'INRAE, a enfin assuré l'interface entre le groupe de travail et les commanditaires et veillé au bon déroulement des travaux.

L'interprétation des résultats issus des simulations et de leurs analyses complémentaires, et la rédaction du présent document sont placées sous la responsabilité de l'équipe projet. Ce Rapport de synthèse, à destination d'un public non spécialiste mais averti, vise à donner une vision globale des résultats de l'étude. Ses Annexes rassemblent l'intégralité des résultats des simulations et des analyses complémentaires. Il s'accompagne d'un Rapport d'analyses bibliographiques complémentaires, compilant plusieurs synthèses de la littérature scientifique internationale rédigées par les experts scientifiques, ainsi que d'un Rapport technique, présentant en détail les modes de construction des variables d'entrée du modèle.

Plan du Rapport de synthèse

Le Chapitre 1 décrit de façon synthétique la place actuelle de l'Europe dans les échanges internationaux de produits agricoles et positionne la présente étude dans la famille de travaux que forment les études prospectives explorant le futur de la sécurité alimentaire mondiale. Il présente également le modèle GlobAgri-AE2050.

[12] https://www.inrae.fr/actualites/quels-principes-inrae-conduit-il-expertise-ou-etude-scientifique-collective

Les Chapitres 2 à 4 se positionnent en amont du volet de scénarisation et de modélisation de l'étude. Le Chapitre 2 décrit les principaux mécanismes par lesquels le changement climatique peut influer sur la production agricole végétale et animale et sur les surfaces cultivables. S'appuyant sur cette expertise, le Chapitre 3 expose les méthodologies et résultats de la quantification des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 relatives à l'offre agricole, que sont les rendements végétaux et animaux, les surfaces cultivables disponibles et les intensités culturales à l'horizon 2050. Le Chapitre 4 est le pendant du chapitre précédent en se positionnant du côté de la demande. Il présente donc les hypothèses retenues pour caractériser les évolutions de la demande (alimentaire et non alimentaire) en produits agricoles.

Le Chapitre 5 détaille les résultats de simulation des scénarios dits de référence définis dans cette étude. Il examine les évolutions possibles des surfaces agricoles, des productions et des échanges commerciaux de produits agricoles à l'horizon 2050. Une analyse de la sensibilité de ces résultats à la manière de définir les surfaces cultivables disponibles est également réalisée. Dans ce chapitre, sont notamment identifiées les menaces et les pressions foncières susceptibles de peser sur certaines régions du monde du fait de l'augmentation des besoins en terres agricoles, ainsi que les marges de manœuvre dont pourraient disposer d'autres régions en termes de disponibilité en terres.

Les Chapitres 6 et 7 prolongent les résultats de simulation présentés précédemment par deux types d'analyses complémentaires. Le Chapitre 6 explore les effets de la mise en œuvre, en Europe et dans certaines autres régions du monde, de stratégies agricoles visant à relâcher les tensions pesant sur la sécurité alimentaire et identifiées précédemment, alors que le Chapitre 7 se centre plus spécifiquement sur des enjeux et des incertitudes internes à l'Europe et à ses huit régions. En premier lieu, il engage une réflexion sur l'opportunité de développer dans certaines régions européennes des productions supplémentaires de céréales ou d'oléo-protéagineux. En second lieu, il propose une méthode de prise en compte des incertitudes relatives aux effets de l'évolution défavorable de la disponibilité en eau dans certaines régions européennes à l'horizon 2050.

Enfin, le Chapitre 8 discute l'ensemble de ces résultats au regard des facteurs de variabilité de la production agricole non pris en compte explicitement dans la quantification des scénarios de référence par manque de données et de connaissances. Il aborde plus spécifiquement les incertitudes liées aux impacts des évènements extrêmes et de la variabilité climatique, à la dynamique future du progrès génétique, aux effets du changement climatique sur la qualité nutritionnelle des récoltes ou encore aux pertes de récolte attribuables aux bioagresseurs à l'horizon 2050.

Composition du groupe de travail

• Équipe projet : conduite de l'étude

Marc-Antoine Caillaud, INRAE, UAR[13] DEPE – *Appui à l'organisation du colloque.*

Philippe Debaeke, INRAE, UMR AGIR – *Interactions génotypes-environnements, modélisation des cultures, contrainte hydrique, évaluation variétale, changement climatique. Co-pilote scientifique, volet d'analyse bibliographique.*

Agneta Forslund, INRAE, UAR DEPT EcoSocio – *Économie internationale, modélisation des marchés mondiaux. Responsable de la modélisation.*

Kim Girard, INRAE, UAR DEPE – *Suivi logistique et administratif.*

Hervé Guyomard, INRAE-SDAR "Bretagne-Normandie" – *Économie agricole, économie internationale, économie publique, modélisation des marchés. Co-pilote scientifique, volet de scénarisation.*

Elodie Marajo-Petitzon, INRAE, UAR DEPT EcoSocio – *Chargée de mission données et modélisation.*

Samia Oukaci, INRAE, UAR DEPE – *Suivi logistique et administratif.*

Bertrand Schmitt, INRAE, UMR CESAER – *Économie agricole, économie spatiale, démarches de prospective et de projection. Co-pilote scientifique, volet de scénarisation.*

Anaïs Tibi, INRAE, UAR DEPE – *Cheffe de projet.*

• Collectif d'experts scientifiques : réalisation de l'analyse bibliographique

En italique : compétences thématiques et/ou disciplinaires mobilisées dans l'étude

Experts scientifiques principaux

Jacques Agabriel, INRAE, UMR UMRH – *Systèmes d'élevage et alimentation ruminants, bovins viande.*

Tamara Ben Ari, INRAE, UMR Agronomie – *Agronomie Globale, stabilité de la production agricole, impacts climatiques.*

Annette Bérard, INRAE, UMR EMMAH – *Écologie microbienne (sol et milieux aquatiques), écologie du stress, rhizosphère, adaptation au changement climatique/pratiques agricoles.*

Antonio Bispo, INRAE, US INFOSOL – *Sol, biodiversité, surveillance, changement climatique, usage des sols.*

Jean-Louis Durand, INRAE, UR P3F – *Agronomie, bioclimatologie, impact du changement climatique sur la croissance et la productivité des peuplements végétaux.*

Philippe Faverdin, INRAE, UMR PEGASE – *Alimentation animale (ruminants), systèmes d'élevage, élevage et environnement, modélisation systémique.*

Jacques le Gouis, INRAE – Université Clermont-Auvergne, UMR GDEC – *Génétique de l'adaptation aux contraintes abiotiques, blé tendre, progrès génétique.*

David Makowski, INRAE, UMR Agronomie – *Agronomie, méta-analyse, modélisation, statistique.*

Hélène Marrou, Montpellier SupAgro – *Modélisation biophysique, contrainte hydrique, céréales, légumineuses, physiologie végétale.*

Serge Planton, Association Météo et Climat – *Scénarios de changement climatique.*

Eric Sauquet, INRAE, UR RiverLy – *Hydrologie, aléa, changement climatique.*

Experts scientifiques contributeurs ponctuels

Ludovic Brossard, INRAE, UMR PEGASE – *Estimation des coefficients d'efficience animale (porcs).*

Alain Charcosset, INRAE, UMR GQE – *Évolution du progrès génétique à l'horizon 2050 (maïs).*

Jean-Yves Dourmad, INRAE, UMR PEGASE – *Estimation des coefficients d'efficience animale (porcs).*

Yves Dronne, INRAE, UMR SMART-LERECO – *Estimation des coefficients d'efficience animale (monogastriques).*

Michel Lessire, INRAE, UMR BOA – *Estimation des coefficients d'efficience animale (volailles).*

Serge Savary, INRAE, UMR AGIR – *Effets du changement climatique sur les relations biotiques plantes/pathogènes.*

Laetitia Willocquet-Savary, INRAE, UMR AGIR – *Effets du changement climatique sur les relations biotiques plantes/pathogènes.*

[13] Acronymes des unités : UMR : Unité mixte de recherche ; UAR : Unité d'appui à la recherche ; US : Unité de service ; UR : Unité de recherche.

• **Groupe de scénarisation :** appui à l'équipe projet pour l'élaboration des hypothèses d'évolution des variables du système

Les membres du groupe de scénarisation ont été mobilisés par l'Inra et Pluriagri au titre de leur compétences thématiques individuelles et non de leur organisation d'appartenance[14].

Céline Ansart – Unigrains (Responsable d'études économiques et stratégiques) – *Filières céréalières.*

Bénédicte Carlotti – Pluriagri (Chargée d'études)

Xavier Cassedane – Crédit Agricole SA (Expertise filière Céréales Amont-Aval) – *Économie, marché.*

Jean-Christophe Debar – Pluriagri (Directeur) – *Économie et politique agricole internationales.*

Francky Duchâteau – CGB (Directeur Économie) – *Prospective économique, politiques publiques, gestion des risques.*

Jean-Louis Durand – INRAE – membre du collectif d'experts scientifiques de l'étude

Philippe Faverdin – INRAE – membre du collectif d'experts scientifiques de l'étude

Philippe Gate – Arvalis (Directeur scientifique) – *Agronomie, écophysiologie, modélisation, système de culture.*

Michel Petit – CIHEAM-IAM Montpellier – *Politiques agricoles, négociations commerciales internationales.*

Etienne Pilorgé – Terres Inovia (Service d'appui au pilotage, à la veille stratégique et à l'action internationale) - *Agronomie (cultures oléagineuses et protéagineuses), prospective.*

Dominique Rollin – Irstea (Directeur adjoint UMR G-EAU) puis CGAAER – *Gestion de l'eau, systèmes de production agricole.*

Perrine Tonin – Avril (Responsable des études économiques) – *Marchés oléagineux et protéagineux.*

Yves Tregaro – Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Médiateur délégué des Relations Commerciales Agricoles) – *Productions animales, prospective, marchés mondiaux.*

Les auteurs remercient Sacha Desbourdes, pour la réalisation des cartes présentées en Figures 1-2, 5-2 et 5-4, et Vincent Mairy pour la mise en page de la couverture du document.

[14] Les organismes d'appartenance indiqués entre parenthèses sont ceux des membres du groupe de scénarisation au moment de leur participation à l'étude.

Chapitre 1. Place actuelle de l'Europe agricole dans le monde et démarche de simulation à l'horizon 2050

Dans cette étude qui analyse les évolutions possibles de la place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050, l'Europe est découpée en huit régions afin de prendre en compte les lignes de différenciation interne à cette zone, considérée comme un seul bloc régional dans la plupart des exercices s'intéressant à la sécurité alimentaire mondiale. Ce chapitre commence donc par présenter le **découpage géographique adopté dans l'étude**.

Point de départ des scénarios établis dans cette étude, la **place actuelle de l'Europe agricole dans le monde, en termes de surfaces, de productions et d'échanges de produits agricoles**, est ensuite décrite de manière synthétique.

Enfin, ce chapitre replace le travail entrepris ici dans le contexte scientifique riche et foisonnant dans lequel il s'inscrit. Il précise le **positionnement de notre démarche parmi les travaux récents qui, dans la littérature prospective, explorent les futurs possibles de la sécurité alimentaire mondiale**. Il est également l'occasion de présenter notre méthodologie, qui repose sur l'**utilisation du modèle de bilan-matières GlobAgri-AE2050** pour simuler des scénarios d'évolution de la place des agricultures européennes dans l'agriculture mondiale à l'horizon 2050. L'établissement de ces scénarios requiert de poser des hypothèses (présentées dans les chapitres suivants) sur les évolutions à cet horizon des variables d'entrée relatives à l'offre et à la demande pour chacune des huit régions européennes et des 13 autres régions du monde considérées.

1.1. Découpage géographique de l'Europe et du reste du Monde

Définir la place de l'agriculture européenne dans le concert mondial à l'horizon 2050 sous influence du changement climatique requiert de projeter les agricultures européennes et mondiales à cet horizon, et de caractériser comment le changement climatique devrait ou pourrait affecter ces différentes agricultures. À l'évidence, une décomposition du monde en deux zones seulement (l'Europe et le Reste du Monde) est trop fruste, compte tenu de la grande diversité des agricultures de par le monde. Il n'existe cependant pas de réponse unique à la question du choix optimal de degré de décomposition du monde en régions. À la diversité des agricultures et de leurs évolutions possibles sur les prochaines décennies (en termes de surfaces totales et consacrées à chaque culture, de rendements des différentes cultures, de structures des exploitations agricoles, de prix et de politiques agricoles, etc.) s'ajoutent une diversité des utilisations des produits agricoles (usages alimentaires et non alimentaires domestiques *versus* échangés, les usages alimentaires intérieurs dépendant directement des régimes alimentaires eux-mêmes influencés par la démographie, les revenus, les habitudes alimentaires, etc.) et une diversité régionale du changement climatique (en termes notamment de températures et de précipitations) et de ses effets.

En outre, les statistiques mondiales relatives aux productions, aux consommations et aux échanges sont définies à l'échelle des pays ou groupes de pays alors que les considérations géographiques, pédologiques, agronomiques ou climatiques exigeraient parfois un découpage du monde mobilisant des découpages infranationaux.

Dans ce contexte, le découpage géographique adopté essaye de concilier parcimonie, en distinguant un nombre limité de régions correspondant à un pays ou plusieurs pays, et pertinence au regard des objectifs assignés à l'étude. Ceci conduit à distinguer huit régions européennes représentatives de la diversité des conditions de production agricole de cet ensemble (Figure 1-1 et Tableau A.1 en Annexe A). En adoptant un tel découpage géographique, ce travail se distingue de façon originale de nombreux autres travaux[15], qui considèrent l'Europe comme un seul bloc homogène.

[15] Comme, par exemple, la prospective Agrimonde-Terra (Le Mouël *et al.*, 2018) ou le travail prospectif de la FAO sur le futur de l'alimentation et de l'agriculture (FAO, 2018).

Figure 1-1. Composition des huit régions européennes

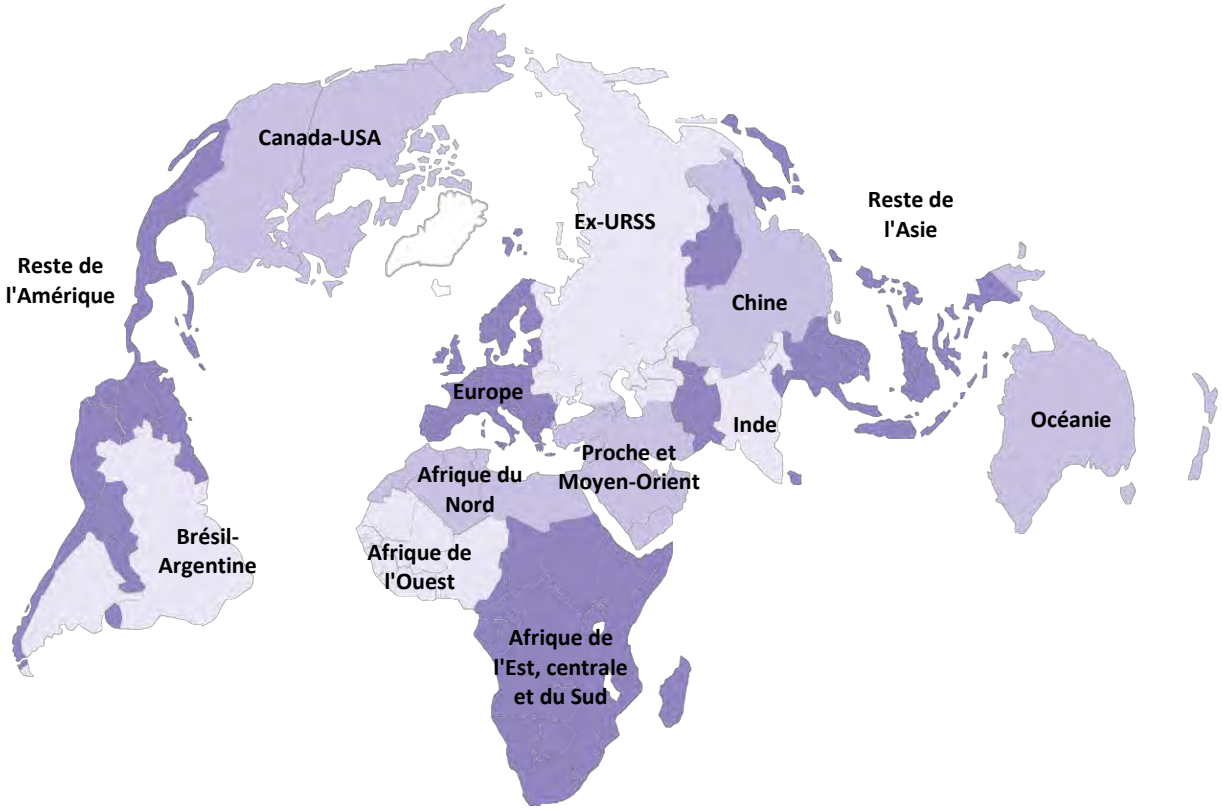


L'Europe est prise au sens de l'Union européenne étendue à la Suisse, la Norvège, la Serbie et aux pays balkaniques occidentaux. La **France**, l'**Allemagne**, la **Pologne** et le **Royaume-Uni** sont individualisés du fait de leur taille et de leurs spécificités agricoles et géopolitiques. Afin de ne pas multiplier le nombre de régions, l'Espagne et l'Italie, deux autres grandes nations agricoles, sont incluses dans l'**Europe du Sud**, région qui intègre aussi le Portugal et les pays balkaniques à l'exception de la Bulgarie et la Serbie. La Roumanie constitue le socle de la région **Europe de l'Est** qui intègre également la Bulgarie, la Hongrie et la Serbie. L'**Europe centrale** regroupe l'Autriche, la République tchèque et la Slovaquie, pays auxquels a été ajoutée la Suisse. Enfin, le **reste de l'Europe** est essentiellement composée des pays de l'Europe du Nord complétés par l'Irlande, la Belgique, les Pays-Bas et le Luxembourg.

Le reste du monde est ici constitué de 13 régions[16] (Figure 1-2 et Tableau A.1 en Annexe A) selon un découpage souvent utilisé dans les exercices visant à explorer les futurs de l'agriculture et de l'alimentation à l'échelle de la planète.

[16] La treizième région regroupe les territoires les moins peuplés de la planète (Groenland, Antarctique) où l'agriculture est quasi inexistante. Elle n'apparaît pas sur cette carte car contrairement aux autres régions, son découpage ne répond pas à une logique de cohérence géographique.

Figure 1-2. Découpage du reste du monde en 13 régions adopté dans cette étude



1.2. L'Europe dans l'agriculture mondiale

À l'échelle du monde, l'**Europe**, considérée au sens défini ci-dessus d'une zone plus large que l'Union européenne à 28 (UE-28), est une région relativement limitée en termes de surfaces agricoles et en termes de contribution à la production agricole mondiale. Elle représente en effet environ 8 % des surfaces cultivées dans le monde, soit 127,1 millions d'hectares (Mha) sur un total de 1,54 milliard d'hectares (Tableau 1-1)[17]. Ses surfaces en prairies permanentes représentent un peu plus de 2 % des prairies mondiales, soit 72 Mha sur les 3,2 milliards d'hectares de prairies répertoriés par la FAO. Avec 1 556 milliards de Kcal produites, elle contribue à hauteur de 11,5 % à la production agricole mondiale convertie en disponibilités caloriques et exprimée en Kcal (Tableau 1-1 ; voir aussi Tableau A.2 en Annexe A).

La **France** est le premier pays agricole européen à l'aune des volumes produits, contribuant à hauteur de 20 % à la production agricole de la zone en disponibilités caloriques. L'**Europe du Sud**, avec des surfaces cultivées et en prairies permanentes plus importantes que la France (36 *versus* 19 Mha de surfaces cultivées et 24 *versus* près de 10 Mha de surfaces en prairies permanentes), arrive en seconde position avec une production agricole représentant près de 18 % de la production européenne, l'Espagne et l'Italie jouant ici des rôles prépondérants. Vient ensuite l'**Allemagne** qui contribue à plus de 15 % à la production agricole européenne avec des surfaces bien plus réduites que l'Europe du Sud (12 Mha de terres cultivées et moins de 5 Mha de prairies permanentes). L'**Europe de l'Est**, qui inclut notamment la Roumanie et la Bulgarie, est aussi un grand acteur agricole européen, en représentant environ 13,5 % de la production européenne sur des surfaces cultivées et en prairies permanentes de même étendue que celles mises en œuvre par la France. Considérée isolément dans cette étude, la **Pologne** contribue à hauteur de 8,5 % à la production agricole totale en mobilisant près de 15 % des surfaces agricoles européennes (9 % des surfaces cultivées et près de 5 % des prairies permanentes). Enfin, le **Royaume-Uni**, l'**Europe centrale** et le **reste de l'Europe** (région dans laquelle pèsent surtout l'Irlande et les pays du Benelux) mobilisent, respectivement, 6,1, 6,7 et 15,2 Mha de terres cultivées, et produisent 6,9, 5,5 et 11,8 % de la production agricole européenne totale.

[17] Les données rapportées ici, tout comme celle du Tableau 1-1, concernent ce que nous nommerons notre situation initiale, qui servira de base aux projections des scénarios développés par la suite. Constituée de la moyenne des années 2009, 2010 et 2011, elle sera considérée comme se référant à l'année « 2010 ».

Tableau 1-1. Surfaces (millions d'ha, Mha), production et échanges agricoles (milliards de kcal, Md Kcal) dans les régions européennes en « 2010 »

	Surfaces cultivées		Surfaces en prairies permanentes		Productions		Exports *	Part de marché **	Imports ***	Dép. nette ****	Exports moins Imports
	Mha	%	Mha	%	Md Kcal	%	Md Kcal	%	Md Kcal	%	Md Kcal
TOTAL Europe	127	100	71,7	100	1 556	100					
France	19,3	15,2	9,6	13,5	315,6	20,3	163	6%	73,9	-36%	89
Allemagne	12,1	9,5	4,7	6,5	241,5	15,5	103,1	4%	141,9	11%	-39
Royaume-Uni	6,1	4,8	11,2	15,6	108,1	6,9	31,4	1%	76,2	28%	-45
Pologne	11,7	9,2	3,2	4,5	132,4	8,5	24,2	1%	29,9	4%	-6
Europe Sud	36,0	28,3	24,1	33,7	277,5	17,8	71,4	2%	245,7	34%	-174
Europe Est	20,3	15,9	7,7	10,8	211,1	13,6	80,8	3%	21,5	-36%	59
Europe centrale	6,5	5,1	3,9	5,5	85,4	5,5	30,6	1%	37,9	7%	-7
Reste de l'Europe	15,2	11,9	7,2	10	184,3	11,8	122,9	4%	208,9	29%	-86

Source : FAOSTAT

* Exportations de chaque région européenne vers toutes les autres régions du monde, intégrant donc les exportations vers les autres régions européennes (exportations intra-européennes) ;

** Part de marché calculée comme le ratio des exportations de la région sur les importations mondiales ;

*** Importations de chaque région européenne en provenance de toutes les autres régions du monde, incluant donc les importations depuis les autres régions européennes (importations intra-européennes) ;

**** Dépendance nette calculée comme la différence entre les importations et les exportations divisée par les utilisations domestiques totales ;

NB : La somme des exportations et importations des différentes régions européennes ne peut être calculée car les échanges de chaque région incluent les échanges intra-européens.

Ainsi, la plus grande partie des surfaces cultivées et la grande majorité de la production agricole mondiale se trouvent dans les régions du monde hors Europe. En termes de surfaces cultivées, l'**ex-URSS** et la région **Canada-USA** arrivent largement en tête avec, respectivement, 202 Mha (13,1 % des surfaces cultivées mondiales en « 2010 ») et 193 Mha (12,6 %). Puis viennent l'**Inde** (169 Mha) et le **reste de l'Asie** qui regroupe un nombre élevé de pays (172 Mha). La **Chine**, le **Brésil-Argentine** et la vaste région constituant l'**Afrique de l'Est, centrale et du Sud**, cultivent des surfaces assez proches des superficies cultivées en Europe avec respectivement 123, 116 et 134 Mha. Notons néanmoins que les deux régions d'Afrique subsaharienne, soit l'**Afrique de l'Ouest** et l'**Afrique de l'Est, centrale et du Sud**, représentent ensemble 233 Mha, soit 15 % des surfaces cultivées dans le monde. Les autres régions disposent de relativement peu de surfaces agricoles. C'est notamment le cas des régions **Afrique du Nord** et **Proche et Moyen-Orient** (avec, respectivement, 28 et 57 Mha), du **reste de l'Amérique** (69 Mha) et de l'**Océanie** (48 Mha) (voir aussi Tableau A.2 en Annexe A).

Compte tenu des spécificités des agricultures de chaque région du monde, c'est la **Chine** qui reste le premier producteur agricole mondial avec 19 % des disponibilités caloriques produites par ce seul pays (Tableau A.2 en Annexe A). Elle est suivie par la région **Canada-USA** qui approche les 15 % de la production agricole mondiale. Le **Brésil-Argentine**, l'**Inde** et le **reste de l'Asie** sont des régions dont la contribution à la production agricole mondiale sont comparables à celle de l'Europe prise dans son ensemble. Elles représentent entre 10 % et 12 % de la production agricole mondiale. L'**ex-URSS**, en dépit des vastes surfaces cultivées qu'elle exploite, n'arrive que loin derrière avec une contribution à la production mondiale de seulement 6 %. De même, les **deux régions d'Afrique subsaharienne** restent très en deçà de leurs capacités productives avec seulement 7 % de la production agricole mondiale.

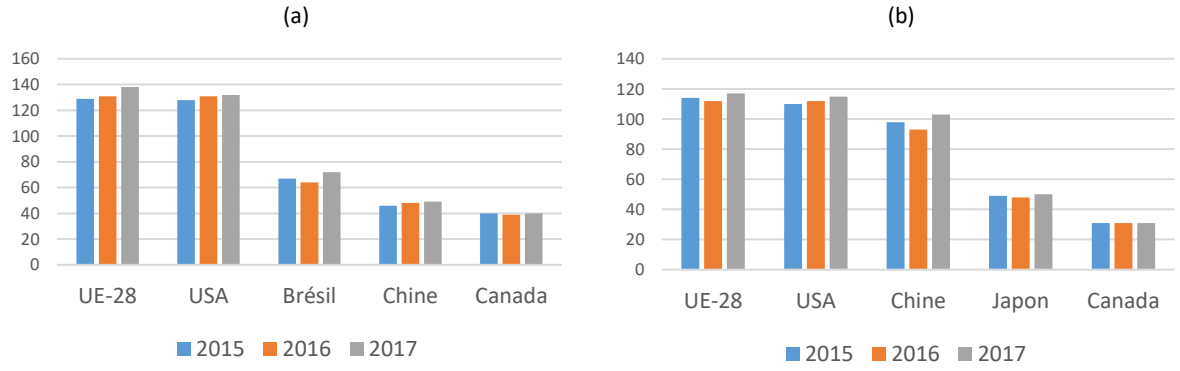
Malgré sa taille relativement limitée en termes de surfaces cultivées, l'**Europe** occupe donc une place non négligeable sur la scène mondiale en termes de production agricole. Elle occupe même une place importante pour certains produits. Ainsi, l'Europe produit plus de 20 % de la production mondiale de produits laitiers, environ 13 % de la production mondiale de céréales (blé, maïs, autres céréales et riz), les deux tiers de la production mondiale de vin, la moitié de la production mondiale de betteraves sucrières et les trois quarts de la production mondiale d'huile d'olive (EEA, 2019 ; EEA, 2017a), alors que son

niveau de consommation domestique tend à se stabiliser sous l'effet à la fois de sa démographie et de ses habitudes alimentaires[18].

Ainsi, selon les chiffres les plus récents disponibles, les exportations (extra-communautaires) de **l'UE-28** représentaient 138 Milliards (Mds) EUR en 2017, soit environ un tiers de sa production agricole (EC, 2018)[19]. L'UE-28 est à la fois le premier exportateur mondial de produits agro-alimentaires, et le premier importateur mondial (117 Mds EUR)[20]. Le commerce extra-européen de l'UE-28 en valeur a plus que doublé sur la période 2002-2018 (EC, 2019a). L'UE-28 est suivie de très près par les **États-Unis** en termes à la fois d'exportations (132 Mds EUR en 2017) et d'importations (115 Mds EUR) ; voir Figure 1-3. Le **Brésil**, avec 72 Mds EUR, est le troisième exportateur mondial, toutefois loin derrière l'UE-28 et les États-Unis ; il est suivi par la **Chine** (49 Mds EUR) et le **Canada** (40 Mds EUR). La **Chine** occupe le troisième rang à l'importation (103 Mds EUR), proche de l'UE-28 et des États-Unis, précédant très largement le **Japon** (50 Mds EUR) et le **Canada** (31 Mds EUR). Les premiers pays producteurs agricoles mondiaux sont donc à la fois exportateurs et importateurs. La forte montée en puissance de la Chine parmi ces pays doit être atténuée par sa balance agro-alimentaire largement déficitaire, déficit qui se creuse notamment pour les oléagineux (en raison de l'augmentation de la consommation de produits carnés). La région **Brésil-Argentine** et l'**Océanie** (Australie et Nouvelle-Zélande) sont des fournisseurs importants du marché mondial, tandis que le **Japon** et la **Russie** sont des importateurs nets.

Les principales destinations des exportations agro-alimentaires extra-communautaires européennes sont ainsi les **États-Unis** (16 %), la **Chine** (9 %), la **Suisse**, la **Russie** et le **Japon**. Ces cinq destinations représentaient 40 % des exportations agro-alimentaires européennes en 2017 (EC, 2018). Depuis 2010, les exportations vers les États-Unis et la Chine ont augmenté assez fortement, tandis que les flux d'exportations vers la Russie ont diminué, suite à l'embargo sur de nombreux produits alimentaires à destination de ce pays. Les exportations vers la Suisse et le Japon restent relativement stables. D'autres destinations importantes pour les exportations européennes sont l'**Afrique du Nord** et le **Proche et Moyen Orient**, qui tendent cependant à diminuer en importance relative.

Figure 1-3. Principaux exportateurs (a) et importateurs (b) dans le monde en 2015, 2016 et 2017 (Mds EUR) *



* Les échanges européens excluent les exportations et les importations intra-communautaires. Source : COMEXT, GTA selon la Commission européenne (EC, 2018).

Toutes les régions européennes ne contribuent pas avec la même intensité au commerce mondial (y compris au commerce intra-européen). La **France** est le premier pays exportateur européen, contribuant en « 2010 » à 6 % des exportations mondiales (en kcal) vers d'autres régions européennes et/ou du reste du monde. Sa position d'exportatrice nette (exportations moins importations) est également importante avec près de 90 Mds de Kcal d'excédents en « 2010 » (Tableau 1-1). Bien qu'à un niveau deux fois plus faible que la France, l'**Europe de l'Est** participe également fortement aux marchés européens et

[18] Il existe toutefois des disparités entre régions européennes. Une certaine marge d'augmentation de la demande alimentaire existe surtout en Europe de l'Est, où le niveau des disponibilités caloriques par habitant est de 10 % inférieur à celui de la France ou de l'Allemagne. Cette possible augmentation de la diète individuelle risque cependant d'être compensée à l'avenir par une dynamique démographique très faible qui évolue vers une stabilisation ou une baisse de sa population.

[19] Ces exportations extracommunautaires ne représentent en fait que 28 % de la somme des exportations de chacun des États-membres, les exportations intra-communautaires s'établissant à 348 Mds EUR (en considérant les données de la catégorie « *Food, drinks and tobacco* » en 2018 ; EC, 2019b).

[20] En équivalent calories, les exportations des 8 régions européennes de notre étude, intégrant les échanges intra-européens, représentaient 22 % des exportations mondiales de « 2010 » ; et ses importations 29 % des importations mondiales à cette date.

mondiaux ; elle constitue la seconde région de notre découpage européen à être en situation d'exportatrice nette. L'**Europe du Sud** est, par contraste, dans une position largement déficitaire : elle importe 3,5 fois plus de produits agricoles qu'elle n'en exporte et affiche ainsi un taux de dépendance nette aux importations de 34 %[21]. Le **Royaume-Uni** et l'**Allemagne** sont également déficitaires, leurs exportations, même si elles sont loin d'être négligeables en volume, ne couvrant qu'une partie de leurs importations. Il en est de même pour le **reste de l'Europe**, mais cette dernière région est très hétérogène ; elle intègre en particulier des exportateurs importants comme les Pays-Bas et le Danemark, la région dans son ensemble représentant 4 % du marché mondial. La **Pologne** et l'**Europe centrale** ont des bilans exports-imports plutôt équilibrés, avec des échanges cependant relativement limités par rapport aux autres régions européennes.

La position européenne est différente selon les catégories de produits échangés. L'**UE-28** est largement excédentaire en produits transformés, légèrement excédentaire en produits animaux et largement déficitaire en produits végétaux[22], déficit qui a tendance à s'accroître depuis le début de la décennie 2010[23]. La majeure partie des exportations brutes de l'UE-28 est donc réalisée sous forme de produits transformés (57 %), tandis que les produits végétaux et animaux représentent respectivement 22 et 21 % de ses exportations brutes totales en valeur en 2018 (EC, 2019a). Parmi les produits transformés et les produits végétaux, les produits les plus exportés sont le vin et les alcools (17 % des exportations alimentaires totales en valeur en 2017) principalement à destination des **États-Unis**, auxquels il faut ajouter les préparations alimentaires (9 % au total des exportations alimentaires en valeur) dont les préparations infantiles (5 %) destinées principalement à la **Chine**, le chocolat et les confiseries (4 %) destinés surtout aux **États-Unis**, mais aussi à la **Russie** et la **Suisse** notamment ainsi que les céréales (environ 4 %[24]) destinés principalement aux pays de l'**Afrique du Nord** et du **Proche et Moyen-Orient**. En matière de produits animaux, l'UE-28 exporte surtout des produits laitiers (environ 7 % en valeur), de la viande blanche (porc et volaille pour un total de 5 % en valeur), ainsi que de la viande bovine mais de moins en moins. Ces exportations vont principalement vers la **Chine**, les **États-Unis** et le **Japon**. Les principales destinations des exportations alimentaires extra-européennes sont ainsi les États-Unis (16 % des exportations alimentaires totales en valeur) loin devant la Chine (9 %), la Suisse (6 %), puis la Russie (5 %) et le Japon (5 %) (EC, 2018)

Du côté des importations, près de la moitié des importations agro-alimentaires de l'**UE-28** en valeur étaient des produits végétaux, les produits transformés et les produits animaux représentant 32 et 20 %, respectivement. Les produits les plus importés sont les fruits (notamment tropicaux), les noix et les épices (17 % de la valeur 2017), les produits oléagineux sous forme de graines, de tourteaux et d'huile (16 %[25]), et le café et le thé (7 %). Les principaux fournisseurs sont le **Brésil**, les **États-Unis**, l'**Argentine**, l'**Ukraine** et la **Chine** (Brésil et États-Unis occupant à égalité la première place, très loin devant les autres fournisseurs). Les importations européennes en provenance d'Ukraine et de Chine augmentent depuis 2010.

Ainsi, l'Europe dans son ensemble apparaît comme un acteur relativement important de la production agricole mondiale. Sur des surfaces agricoles assez restreintes, elle contribue à la production mondiale à un niveau certes inférieur à celui de la Chine

[21] Le taux de dépendance nette est calculé comme la différence entre les importations et les exportations de la région rapportée à ses utilisations domestiques totales, chaque variable étant exprimée en équivalent calories.

[22] Les produits classés dans la catégorie « transformés » par la Commission Européenne (EC, 2019a) consistent en divers types de biens dérivés des produits végétaux et animaux tels que les boissons (y compris vins et les alcools), diverses préparations alimentaires (de céréales, de farines, d'amidon, de cacao, de produits animaux…), les résidus et déchets des industries agro-alimentaires, les aliments pour animaux, le tabac, le sucre et les confiseries. Les produits animaux comprennent notamment les animaux vivants et la viande, les poissons et les crustacés, les produits laitiers, les œufs et le miel. Les produits végétaux comprennent notamment les fruits et légumes, le café, le thé et les céréales, les produits d'oléagineux, les graisses et les huiles.

[23] Depuis le début de la décennie 2010, les exportations de produits animaux augmentant plus vite que les importations de ces mêmes produits, l'UE-28 est devenue légèrement excédentaire en produits animaux (passant d'un solde net légèrement négatif de -2 Mds EUR en 2010 à un solde net légèrement positif de +1.2 Md EUR en 2018). Par contraste, l'UE-28 est largement déficitaire en produits végétaux, et ce déficit a tendance à se creuser depuis 2010 (-36 Mds EUR en 2018 *versus* aux environs de -22 Mds EUR en 2010). L'excédent des produits transformés a tendance à s'accroître puisqu'il est passé de +12 Mds EUR en 2010 à +35 Mds EUR en 2018, les exportations brutes augmentent nettement plus rapidement que les importations brutes.

[24] Notons que les exportations céréalières des régions européennes traduites en équivalent Kcal et intégrant le contenu en céréales des produits transformés représentaient, en « 2010 », plus de la moitié des exportations de produits agricoles de la zone (Tableau C.3 en Annexe C), allant jusqu'à 70 % pour la France (Tableau C.5 en Annexe C).

[25] Transcrits en équivalent kcal, ces importations des produits oléo-protéagineux (graines, tourteaux et huiles) représentent plus de 40 % des importations totales des régions européennes (Tableau C.3 en Annexe C).

ou de la région Canada-USA, mais proche du Brésil-Argentine, de l'Inde et du reste de l'Asie. Ramenée à la taille de sa population, sa production (en kcal produites par habitant) devance largement les régions d'Asie citées ci-dessus mais reste très en deçà des performances des deux régions du continent américain ci-dessus. Elle se rapproche alors de celle de la région de l'ex-URSS, avec néanmoins une productivité à l'hectare bien plus élevée. L'Europe participe de ce fait au commerce mondial tant du côté des exportations que des importations, le sens de cette participation variant selon les produits considérés. Les agricultures européennes se différencient entre elles selon les régions que nous avons distinguées. La France se distingue par son important niveau de production et sa forte position d'exportateur net. Avec une productivité à l'hectare bien moindre et donc une production bien inférieure, l'Europe de l'Est, qui exploite presque autant de surfaces agricoles que la France, est également dans une position d'exportateur net. A l'inverse, avec une productivité à l'hectare comparable à celle de la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni sont en position d'importateur net, en dépit de l'importance des exportations brutes, allemandes notamment. La Pologne et l'Europe centrale interviennent relativement peu sur les marchés agricoles européens et mondiaux et leur niveau de production couvre assez bien leurs besoins agricoles ; les exportations intra- et extra-communautaires de la Pologne ont néanmoins tendance à augmenter depuis le début de la décennie 2010. L'Europe du Sud est, quant à elle, dans une position plus délicate. Grâce aux importantes surfaces qu'elle consacre à l'agriculture, cette région est un producteur important mais, du fait de sa relativement faible productivité à l'hectare, elle est également un importateur net très conséquent.

1.3. Méthodologie de simulation à l'horizon 2050

1.3.1. Des projections établies sur la base d'un modèle de bilans emplois-ressources

Notre travail s'inscrit dans le cadre général des études qui visent à apprécier les disponibilités alimentaires mondiales futures. Outre leur découpage géographique souvent moins précis que le nôtre en ce qui concerne l'Europe (*cf. supra*), ces études diffèrent par leur nature et le cadre de modélisation utilisé.

Au titre du premier critère de différenciation, Reilly et Willenbockel (2010) distinguent trois types d'exercices : i) les analyses dites de projections qui cherchent à caractériser le futur dans une logique de poursuite des tendances passées (projections de type *Business as Usual*) et à évaluer, relativement à la situation de départ ou à la situation finale dans la projection tendancielle, les impacts d'un choc sur une ou plusieurs variables d'intérêt ; ii) les analyses dites d'explorations qui cherchent à investiguer la diversité des futurs possibles en permettant des modifications de la structure du système et des bornes de validité des possibles ; et iii) les analyses normatives qui sont mobilisées pour soutenir des visions du monde en développant des narratifs d'évolution du système permettant d'atteindre, ou pas, des objectifs prédéterminés. Les études relevant du premier type sont le plus souvent des projections toujours quantifiées alors que celles relevant de deux autres types sont le plus souvent considérées comme des prospectives et sont de plus en plus souvent quantifiées. Cette classification est quelque peu arbitraire dans la mesure où les trois types de travaux partagent plusieurs caractéristiques communes (Le Mouël et Forslund, 2017). En particulier, dans les trois cas, le futur du système analysé est déterminé, dans un premier temps, en considérant les évolutions passées et, dans un deuxième temps, en prolongeant ou infléchissant celles-ci sur la base d'hypothèses (explicites ou implicites), intégrant des ruptures plus ou moins marquées de la tendance passée. Ce sont ces hypothèses qui permettent de justifier de possibles écarts par rapport à la « simple » extrapolation des tendances passées.

Notre étude suit cette logique en mobilisant l'information passée pour construire le futur, plus précisément différents futurs possibles, y compris en posant des hypothèses autres que la stricte prolongation des évolutions passées pour certaines variables clefs. C'est le cas, notamment, des régimes alimentaires qui évolueront à l'horizon 2050 selon deux hypothèses alternatives, soit la poursuite des tendances passées (hypothèse des régimes alimentaires tendanciels) ou, au contraire, une évolution vers des régimes alimentaires (plus) sains sur le plan nutritionnel en termes à la fois de calories totales consommées et d'équilibre entre aliments (hypothèse des régimes alimentaires sains – *cf.* Chapitre 4).

Notre étude se situe cependant davantage dans la lignée des projections que des prospectives. Au-delà des hypothèses alternatives d'évolution des régimes alimentaires et des effets que le changement climatique pourrait avoir sur certaines variables clefs du système, nous nous inscrirons globalement dans la poursuite des tendances passées, afin de conserver un mode de raisonnement « toutes choses égales par ailleurs ». Ces tendances pourront cependant faire l'objet de variantes divergentes, essentiellement définies en fonction des incertitudes que la littérature scientifique affiche quant aux évolutions

futures de certaines variables clefs du modèle et donc, du système alimentaire mondial. C'est notamment le cas pour les ampleurs des impacts des évolutions techniques sur les rendements végétaux et la capacité, ou non, des systèmes agricoles futurs de valoriser « au champ » l'effet de fertilisation du CO_2. D'autres hypothèses alternatives que celles relatives aux régimes alimentaires pourront en outre être ponctuellement testées dans le cadre d'analyses de sensibilité. C'est le cas, par exemple, de restrictions qui pourraient être mises en place en matière d'extension des terres cultivées ou de limitation plus ou moins prononcée d'accès aux ressources en eau.

C'est donc plus par les cadres de modélisation mobilisés que par leur nature intrinsèque que les études sur la sécurité alimentaire se différencient. Deux grands types de modèles peuvent être distingués, d'une part, les modèles de bilans matières cherchant à égaliser les volumes des ressources à leurs emplois, et, d'autre part, les modèles économiques dans lesquels les équilibres entre les ressources (les offres) et les emplois (les demandes) sont assurés par les prix, ce qui permet des analyses en volume et en valeur. Les modèles économiques se distinguent en outre selon qu'ils prennent en compte l'ensemble de l'économie (modèles d'équilibre général calculable) ou qu'ils ne s'intéressent qu'à tout ou partie des produits agricoles (modèles d'équilibre partiel).

Les deux approches reposent sur un tronc commun. En effet, pour chaque produit distingué, en particulier chaque produit agricole, les deux approches visent la vérification en volume de l'identité comptable égalisant les ressources aux emplois (et la vérification de cette même équation en valeur pour les modèles économiques intégrant les prix). Dit autrement, pour un produit donné, dans une région donnée, à une date donnée, l'équation suivante est vérifiée dans la situation initiale et dans la situation finale (sous réserve de convergence de la simulation et donc, que le scénario simulé n'aboutisse pas à une infaisabilité) :

$$\textit{Production domestique} + \textit{Importations} = \textit{Usages domestiques} + \textit{Exportations} + \textit{Variation des stocks} + \textit{Pertes et Gaspillages}\ ^{26} \quad (1)$$

Dans le cas d'un produit végétal, la production est le plus souvent modélisée comme le produit du rendement par la surface récoltée[27], cette dernière étant elle-même le produit de la surface cultivée par un coefficient d'intensité culturale[28]. On notera cependant que très nombreux sont les modèles qui ne font pas la distinction explicite entre les surfaces cultivées et les surfaces récoltées au détriment alors d'une vision claire des utilisations des terres à des fins agricoles. Du côté de la demande, les usages domestiques distinguent généralement les consommations alimentaires, les utilisations pour l'alimentation des animaux et les utilisations non alimentaires dont les usages énergétiques, certains postes pouvant être nuls. Les échanges sont pris en compte, soit une forme brute nécessitant alors de définir comment évoluent à la fois les importations (brutes) et les exportations (brutes), soit sous une forme nette en ne spécifiant et ne modélisant alors que la différence entre les importations et les exportations. La variation des stocks (différence entre le stock final de l'année et le stock initial de la même année) est le plus souvent supposée inchangée dans les deux situations, finale et initiale, dans un contexte où les déterminants du stockage public et privé sont difficiles à mesurer : de nombreux travaux spécifiques s'intéressent néanmoins à la question du stockage des denrées agricoles au prisme de sa capacité potentielle à lisser les fluctuations des prix agricoles (pour une synthèse, voir, par exemple, European Commission et Gouel, 2016). Les pertes et gaspillages vont des pertes au champ aux pertes et gaspillages au stade de la consommation finale. Modélisée souvent comme des pourcentages affectant à la baisse la production effectivement disponible et les usages effectivement réalisés, cette variable fait plutôt l'objet d'analyses de sensibilité (nouvelle situation finale si, par exemple, les pertes et gaspillages diminuent) et d'analyse des leviers pouvant être mobilisés pour réduire les pertes et les gaspillages (voir, par exemple, Lipinski *et al.*, 2013). Réduire les pertes et gaspillages est un levier majeur de la sécurité alimentaire mondiale, notamment sous l'angle des disponibilités, compte tenu de leur ampleur, un peu moins du tiers de la production agricole mondiale en 2009 selon la FAO (2011).

[26] Inscrire les pertes et gaspillages dans le terme de droite de l'équation ne doit pas laisser croire que ceux-ci ne concernent que les usages, domestiques et étrangers. Ils concernent aussi les productions, domestiques et étrangères, qu'ils affectent négativement dans le terme de gauche de l'équation et donc avec un signe positif dès lors qu'elles sont reportées dans le terme de droite de l'équation.

[27] Ce n'est néanmoins pas le cas de certains modèles d'équilibre général ou partiel qui ne prennent pas en compte de façon explicite le facteur terre et le marché de la terre.

[28] Le coefficient d'intensité culturale est défini comme le ratio de la surface récoltée à la surface cultivée. Il peut être inférieur, égal ou supérieur à 1. Pour plus de détails, voir Chapitre 3, Encadré 3-1.

Les modèles de bilans matières ne tiennent compte que des flux physiques modélisés à travers les équations (1) ou des variantes de celles-ci, possiblement sous contraintes physiques, par exemple sur les terres cultivables. Les modèles économiques sont plus complets au sens où les équations (1) sont vérifiées non seulement en volume mais aussi en valeur moyennant l'ajout de prix. Les variables entrant dans les équations (1) sont alors définies comme des fonctions des prix. Ces fonctions sont explicitement ou implicitement dérivées d'hypothèses portant sur les comportements des agents économiques : les producteurs d'un produit donné cherchent à maximiser leur profit qui dépend positivement du prix de ce produit et négativement des prix des facteurs de production, les consommateurs cherchent à maximiser leur utilité sous contrainte de revenu disponible de sorte que leurs consommations augmentent quand les prix à la consommation diminuent ou leur revenu augmente. Le passage d'une situation initiale équilibrée en volume et en valeur à une situation finale elle aussi équilibrée en volume et en valeur se fait donc moyennant des ajustements des prix qui déterminent les évolutions des volumes offerts et demandés, y compris les exportations et les importations dès lors que la modélisation opte pour une représentation des échanges sous une forme brute (exportations et importations brutes). Cet ajustement par les prix sur la base de représentations sous-jacentes des comportements des agents économiques est l'atout premier des modèles économiques.

Cette force ne doit pas laisser croire à la supériorité indiscutable des modèles économiques relativement aux modèles de bilans. Ceci tient essentiellement à la difficulté de déterminer les réactions des offres et des demandes aux variations des prix. Ces réactions sont le plus souvent résumées par des élasticités prix toujours très délicates à calibrer, encore plus à estimer (y compris parce que les données requises pour cette estimation ne sont pas toutes disponibles) et plus encore à considérer systématiquement comme invariantes dans le temps ou à projeter à des horizons lointains. Ce calibrage est d'autant plus difficile que les prix, à la production, à la demande, à l'importation et à l'exportation, sont largement influencés par les politiques publiques de façon différenciée de par le monde, en outre en utilisant une très large palette d'instruments dont il importe de comprendre le fonctionnement et de projeter les modalités de mise en œuvre à l'horizon des simulations : en se limitant aux instruments des seules politiques agricoles domestiques et commerciales, l'intervention publique peut en effet prendre des formes aussi variées que le soutien direct des prix à la production, des aides directes plus ou moins déconnectées des choix productifs (aides assises sur les productions courantes ou historiques, aides basées sur les hectares courants ou historiques, etc.), des subventions ou des taxes sur les achats ou usages d'intrants, des droits de douane, des contingents tarifaires ou des barrières non tarifaires sur les importations, des subventions ou des taxes sur les exportations, etc. Le calibrage des élasticités prix est rendu encore plus complexe dès lors qu'il s'agit de prendre en compte des ruptures comportementales qui ne passent pas directement par les prix et des politiques publiques qui les influencent directement, sous les effets d'évolutions sociétales en matière d'attitudes vis-à-vis, par exemple, des consommations de produits animaux et plus généralement de l'élevage. Ces évolutions sociétales se refléteront *in fine* dans les prix, mais les déterminants premiers des évolutions des quantités offertes et demandées sont ici des facteurs hors-prix.

Plus généralement, les deux types de modèles, modèles de bilans et modèles économiques, nous paraissent complémentaires au sens où ils permettent tous deux d'explorer les futurs possibles du système alimentaire mondial. L'enjeu est suffisamment important et complexe pour privilégier un outil d'analyse au détriment d'un autre, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients, chacun étant plus ou moins bien adapté à tel ou tel type de sous-question. En pratique, la problématique de cette étude nous conduit à opter pour un modèle de bilans, décrit en détails dans la Sous-Section suivante, pour trois raisons principales. En premier lieu, pour des raisons de « traçabilité ». En effet, dans les modèles économiques, d'autant plus quand ils sont en équilibre général, de très nombreuses variables sont endogènes et déterminées par le modèle comme résultats des simulations (les variables exogènes sont alors essentiellement les politiques publiques, les évolutions techniques et les variables climatiques). Il n'est donc pas facile, même si ce n'est pas impossible *via* des modifications des préférences des consommateurs, de contraindre les évolutions des régimes alimentaires alors que ceci est chose plus aisée dans un modèle de bilans. En deuxième lieu, pour des raisons de transparence et de lisibilité des résultats, ceci parce qu'un modèle de bilans permet de mettre en œuvre de façon relativement simple les chocs de façon séquentielle et ainsi, d'analyser les contributions relatives de chaque déterminant de l'équation alimentaire mondiale et de son évolution à l'horizon des simulations (Le Mouël *et al.*, 2018). En troisième lieu, parce que l'emploi d'un modèle de bilans permet d'éviter de poser des hypothèses sur « l'ordre économique mondial » à l'horizon des simulations, par exemple en termes d'accords commerciaux multilatéraux et/ou bilatéraux à un moment où le système multilatéral est aujourd'hui dans une impasse et où se multiplient, en quelque sorte en contrepartie, les accords bilatéraux qui peinent toutefois à intégrer des considérations autres que commerciales, notamment environnementales et climatiques. La contrepartie négative de ce troisième point est que notre travail ne peut pas être utilisé, ou seulement très partiellement et très indirectement sous une forme narrative commentant les résultats des simulations, pour analyser les effets des politiques publiques susceptibles de favoriser des évolutions souhaitables ou, au contraire, de contrecarrer des évolutions non souhaitables sur toutes les dimensions de la durabilité.

1.3.2. Le modèle GlobAgri-AE2050

Le modèle GlobAgri est un modèle de bilans ressources - emplois des produits agricoles et agro-alimentaires. Dans la version utilisée dans cette étude (version GlobAgri-AE2050), le monde est décomposé en 21 régions dont huit régions européennes (Figures 1-1 et 1-2, et Tableau A.1 en Annexe A pour la composition précise des régions) et la production agricole en 33 produits et cinq fourrages (Tableau A.3 en Annexe A). Dans chacune de ces 21 régions et pour chacun des 38 produits ou fourrages, le modèle définit un bilan matière telle que la production domestique augmentée des importations égalise la somme des utilisations domestiques (alimentation humaine, alimentation animale, autres utilisations), des exportations, de la variation des stocks et des pertes et gaspillages, soit :

$$Q + M = \sum U + X + \Delta S + G \quad (2)$$ [29]

où Q est la production, M sont les importations, U sont les utilisations, X sont les exportations, ΔS est la variation de stock et G sont les pertes et gaspillages.

La situation initiale (année de base « 2010 » correspondant à la moyenne des années 2009, 2010 et 2011) est établie principalement à partir de la base de données FAOStat[30], complétée de sources additionnelles utilisées en particulier pour répartir la variable de bilan de l'alimentation animale entre les différents secteurs d'élevage (Herrero *et al.*, 2013 ; Bouwman *et al.*, 2005) et établir les bilans relatifs aux ressources fourragères (Monfreda *et al.*, 2008). À partir de ces données, sont calculées, pour chaque région et chaque produit, i) les coefficients de dépendance à l'importation CM (ratio des importations brutes sur les utilisations domestiques totales), ii) les parts de marchés à l'exportation PX (ratio des exportations sur la somme des exportations mondiales ou, de façon équivalente, sur la somme des importations mondiales puisqu'à l'échelle mondiale, tout ce qui est exporté par les uns est importé par les autres) et iii) les coefficients d'intensité culturale IC (ratio des surfaces récoltées sur les surfaces cultivées) de l'année de base « 2010 ». L'équation (2) peut alors s'écrire comme suit, pour tous les produits (équation 3) et plus spécifiquement pour les produits végétaux (équation 4) :

$$Q + CM.\sum U = \sum U + PX.MT + \Delta S + G \quad (3)$$

$$R.SC.IC + CM.\sum U = \sum U + PX.MT + \Delta S + G \quad (4)$$

où R est le rendement, SC est la surface cultivée et MT la somme des importations de toutes les régions (importations mondiales).

Les équations (3) et (4) sont vérifiées pour l'année de base « 2010 ». Elles doivent également l'être pour l'année terminale correspondant à l'horizon de simulation (ici, 2050). Nous expliquons ci-après comment, partant d'une situation initiale « 2010 » équilibrée pour tous les produits dans toutes les zones du monde, nous projetons cette situation à l'horizon 2050 de façon différenciée selon les scénarios considérés. Ceci requiert de distinguer les variables et paramètres dits d'entrée du modèle sur lesquelles nous formulons des hypothèses qui définissent les scénarios, et les variables dites de sortie qui sont déterminées de façon endogène par le modèle (Tableau 1-2).

Variables et paramètres d'entrée du modèle

Les pertes et gaspillages sont supposées inchangés (en pourcent) entre les situations initiale (« 2010 ») et finale (2050), de même que les variations de stocks supposées inchangées (en niveaux). Nous n'avons donc pas analysé, dans cette étude, les effets de modifications de ces deux variables. Précisons que le poste des pertes et gaspillages du modèle GlobAgri-AE2050 correspond aux pertes et gaspillages aux stades du stockage, du transport, de la transformation et de la distribution. Les pertes à la récolte sont comptabilisées dans les rendements. Les pertes et gaspillages à la consommation sont, quant à elles, comptabilisées au niveau des usages alimentaires qui correspondent aux disponibilités, *i.e.* aux quantités réellement ingérées augmentées des pertes et gaspillage à la consommation. Les pertes et gaspillages du modèle (au sens précisé ci-dessus) varient au prorata des utilisations domestiques totales.

[29] Afin de simplifier l'écriture, les indices *i* relatifs au produit et *j* à la région sont omis.

[30] http://www.fao.org/faostat/fr/#home

Tableau 1-2. Variables d'entrée, paramètres d'entrée et variables de sortie du modèle GlobAgri-AE2050

Variables d'entrée	Définition
R_{vj}	Rendement à l'hectare du produit végétal *v* dans la région *j*
$\overline{Surf_j}$	Surface cultivable (cultures arables et permanentes) dans la région *j* (contrainte de surface)
$Food_{ij}$	Consommation humaine du produit *i* dans la région *j* (produit du régime alimentaire par tête de la région par la population régionale)
Oth_{ij}	Autres utilisations (énergétiques et industrielles) du produit *i* dans la région *j*
ΔS_{ij}	Variation de stocks du produit *i* dans la région *j*
Paramètres d'entrée	**Définition**
β_{vaj}	Coefficient d'efficience animale (coefficient input-output) de transformation du produit végétal *v* en produit animal *a* dans la région *j*
IC_j	Coefficient d'intensité culturale (part de la somme des surfaces récoltées dans la somme des surfaces cultivées) de la région *j*
γ_{ij}	Coefficient de perte (part des pertes et gaspillages liés au stockage, à la distribution et au transport dans les utilisations domestiques totales) du produit *i* dans la région *j*
CM_{ij}	Coefficient de dépendance aux importations ($M_{ij}/\sum_i U_{ij}$) pour le produit *i* dans la région *j*
PX_{ij}	Part du marché mondial ($X_{ij}/\sum_j M_{ij}$) pour le produit *i* dans la région *j*
Variables de sortie	**Définition**
Q_{ij}	Production du produit *i* dans la région *j* (produit végétal *v* ou animal *a*)
$Feed_{ij}$	Demande pour l'alimentation animale du produit végétal *v* par le produit animal *a* dans la région j ($\beta_{vaj}.Q_{aj}$)
$\sum_i U_{ij}$	Utilisations domestiques totales du produit *i* dans la région *j* ($Food_{ij} + Feed_{ij} + Oth_{ij} + \Delta S_{ij}$)
G_{ij}	Pertes et gaspillages du produit *i* dans la région *j* ($\gamma_{ij}.\sum_i U_{ij}$)
M_{ij}	Importations du produit *i* par la région *j* ($CM_{ij}.\sum_i U_{ij}$)
X_{ij}	Exportations du produit *i* par la région *j* ($PX_{ij}.\sum_j M_{ij}$)
SR_{vj}	Surface récoltée du produit végétal *v* dans la région *j* (Q_{ij}/R_{vj})
SC_j	Surface cultivée totale de la région *j* ($\sum_v SR_{vj}/IC_j$)

NB : Les coefficients régionaux de dépendance aux importations et les parts régionales du marché mondial deviennent des variables endogènes quand la région bute sur sa contrainte des terres cultivables.

Les utilisations alimentaires évoluent dans chacune des 21 régions du modèle entre les situations initiale et finale selon deux grandes hypothèses décrites dans le Chapitre 4, correspondant à, d'une part, une évolution tendancielle des régimes alimentaires et, d'autre part, une évolution en rupture vers des régimes alimentaires sains. Chaque régime fournit, dans chaque région, les consommations caloriques par individu et leur décomposition en produits (décomposition variable selon les régions). Les consommations alimentaires régionales en 2050 sont ensuite obtenues en multipliant ces consommations individuelles par les populations régionales, les évolutions des populations régionales entre « 2010 » et 2050 étant basées sur les projections démographiques médianes de l'ONU (ONU, 2017). Les projections démographiques sont les mêmes dans tous les scénarios.

Les évolutions des utilisations non alimentaires des produits sont également décrites dans le Chapitre 4. Les utilisations en 2050 des différentes ressources agricoles mobilisées pour la production de biocarburants ont été établies à partir d'une synthèse de la littérature. Les autres utilisations non alimentaires ont été maintenues, pour la plupart d'entre elles[31], à leurs niveaux de l'année de base « 2010 ».

Du côté de l'offre agricole, trois variables doivent aussi faire l'objet d'hypothèses d'évolution entre les situations initiale et finale, soit i) les intensités culturales annuelles, ii) les rendements des végétaux, fourrages inclus et iii) les efficiences animales. Ces hypothèses sont détaillées dans le Chapitre 3.

[31] À l'exception des usages non alimentaires des huiles végétales : pour plus de détails sur ce point, se référer au rapport technique.

Les intensités culturales annuelles de l'année « 2010 » ainsi que leur évolution à 2050 ont été définies à partir de l'étude FAO (2018). Elles sont supposées identiques dans tous les scénarios.

Les évolutions des rendements végétaux à l'horizon 2050 ont fait l'objet d'un travail spécifique à l'aune de deux déterminants : d'une part, le changement climatique (apprécié *via* les trois paramètres de la température, de la pluviométrie et de la concentration en CO_2) et, d'autre part, des évolutions techniques (qui regroupent ici à la fois les utilisations d'intrants et le progrès technique). Ces évolutions des rendements varient selon les scénarios. Elles sont à l'évidence un paramètre clef de l'équation alimentaire mondiale en 2050, et de la plus ou moins grande capacité de chaque région à satisfaire, ou non, sa demande intérieure.

Les efficiences animales, qui définissent la quantité d'aliments et de fourrages ingérées par unité de production animale, ont, elles aussi, fait l'objet d'une attention particulière dans cette étude. Ces efficiences animales sont des coefficients input-output rapportant la quantité de chaque matière première végétale, y compris de chaque fourrage, à la quantité de chaque produit animal. Ces coefficients ont été calibrés pour l'année de référence « 2010 », puis projetés à l'horizon 2050.

Enfin, les surfaces cultivables disponibles à l'horizon 2050 dans chaque région sont une variable cruciale dans la mesure où le fonctionnement du modèle varie selon que la région sature, ou non, sa contrainte de terres cultivables.

Bouclage et variables de sortie du modèle

Les régimes alimentaires définissent les consommations alimentaires des différents produits végétaux (céréales, huiles végétales, sucre, fruits et légumes, etc.) et animaux (viandes, lait et produits laitiers, etc.). Les matières premières végétales mobilisées pour produire les biens animaux sont alors calculées sur la base des efficiences animales. Sur cette base, les autres hypothèses relatives aux variables et paramètres d'entrée du modèle (variation des stocks, pertes et gaspillages, utilisations non alimentaires, intensités culturales et rendements) et les principes de modélisation définissant les importations brutes de chaque produit et les exportations brutes de chaque produit (équations 2 et 3)[32] permettent alors de définir la situation d'équilibre en 2050, quand elle existe.

Commençons par le cas le plus simple en supposant, par anticipation, qu'aucune région ne bute en 2050 sur sa contrainte de terres cultivées. Dans ce cas, le bouclage du modèle est assuré en égalisant, pour chaque produit, la somme des ressources (productions et importations) à la somme des emplois (usages domestiques et exportations) dans chaque région et par suite, au niveau global de l'ensemble des régions. Les surfaces récoltées se déduisent à partir des productions *via* les rendements végétaux, et les surfaces cultivées s'obtiennent en divisant les surfaces récoltées par les intensités culturales. Les offres et les demandes domestiques étant définies, il est alors possible de calculer les importations et les exportations brutes moyennant leurs modalités de calcul dans le modèle[32]. Cette présentation séquentielle de la détermination des variables de sortie est néanmoins trompeuse dans la mesure où celles-ci sont déterminées simultanément comme fruit de l'équilibre.

La résolution du modèle est modifiée quand une ou plusieurs régions butent, en 2050, sur leurs contraintes respectives de terres cultivables. Supposons que sans prise en compte de la contrainte sur les terres cultivables, l'équilibre aboutisse, dans une région A donnée, à des surfaces cultivées supérieures aux surfaces cultivables. Dans ce cas, l'équilibre avec saturation de la contrainte sur les terres cultivables est obtenu d'abord en ajustant à la baisse les exportations agricoles brutes de cette région A (en réduisant la part de cette région sur le marché mondial des exportations), et ensuite, si le premier mécanisme d'ajustement ne suffit pas à ce que les surfaces cultivées de la région soient maintenant plus faibles que les surfaces cultivables, en augmentant les importations agricoles brutes de la région (en augmentant le coefficient de dépendance aux importations CM_{ij}).

En l'absence de mécanismes économiques et en particulier de prix, le fonctionnement du modèle GlobAgri-AE2050 pourra paraître rigide, même si les ajustements des parts du marché à l'exportation et des coefficients d'importation quand la contrainte sur les surfaces cultivables est saturée miment, en première approche, les réactions potentielles des quantités échangées aux variations des prix relatifs qui résulteraient des mouvements sur le marché domestique et le marché

[32] Les importations (brutes) de 2050 de chaque produit dans une région donnée peuvent être calculées à partir des utilisations domestiques totales de ce produit dans cette région (*via* les coefficients *CM*). Par sommation des importations de ce produit sur toutes les régions, il est ensuite possible de calculer les exportations de ce produit de chaque région sous l'hypothèse d'une participation au marché mondial à l'exportation en 2050 égale à celle de l'année de base « 2010 ».

mondial[33]. Quand la surface cultivable n'est pas limitante, le modèle détermine les productions nécessaires en 2050 pour satisfaire l'ensemble des demandes domestiques tout en maintenant les taux de dépendance aux importations et en préservant les parts de marché à l'exportation aux valeurs de l'année de base « 2010 » dans les conditions techniques définies *a priori* pour 2050 (*via* les hypothèses posées sur les variables d'entrée du modèle et les principes de modélisation des besoins pour l'alimentation animale). Le modèle évalue donc les productions, les surfaces consacrées aux cultures et aux fourrages et le besoin total en terres agricoles (surfaces cultivées et surfaces toujours en herbe) en permettant qu'une région diminue sa surface cultivée même si elle est importatrice nette de produits agricoles en 2050 alors qu'il est possible, si ce n'est plausible, que, dans un tel cas, la région considérée diminue aussi ses importations agricoles brutes et la part de celles-ci dans les utilisations domestiques totales en augmentant sa surface cultivée (*cf.* Chapitre 5). Pour pallier cette limite du modèle, des calculs *ex post* ont été réalisés en proposant des stratégies d'utilisation des terres cultivées qui pourraient être « libérées » en 2050 relativement à « 2010 » dans certaines régions dans les scénarios de référence (*cf.* Chapitre 6).

[33] Quand la demande domestique augmente, les prix domestiques s'ajustent à la hausse ce qui a pour effet d'avantager l'écoulement des quantités produites sur le marché domestique au détriment du marché mondial (diminution des exportations) ; de même, des prix intérieurs plus élevés que les cours mondiaux incitent à davantage recourir au importations pour satisfaire la demande intérieure (augmentation des importations).

Chapitre 2. Les effets du changement climatique sur la production agricole végétale et animale

Le niveau de production agricole (en quantité et en qualité) résulte de plusieurs composantes en interactions :

- le potentiel génétique de la plante cultivée ou de l'animal d'élevage, qui détermine la manière dont s'opèrent les différentes fonctions biologiques dans un environnement donné, et donc le niveau du rendement potentiel lorsque les conditions sont optimales pour le développement des organismes ;
- les facteurs biotiques et abiotiques qui constituent des facteurs de stress et limitent voire réduisent l'expression du rendement potentiel : paramètres climatiques (rayonnement solaire, température), facteurs liés aux sols, disponibilité en eau et en nutriments (quantité et qualité de la ration pour les animaux), présence de polluants, pression de bioagresseurs (maladies, parasites, ravageurs, adventices), etc.
- l'ensemble des ressources, des techniques et des pratiques mises en œuvre par l'agriculteur pour compenser les facteurs « limitants » et « réducteurs » et atteindre le niveau de rendement réel « au champ » : le travail du sol, l'irrigation, la fertilisation minérale et organique, les pratiques de lutte contre les bioagresseurs, les modalités de gestion de la biomasse (ex. enfouissement des résidus), les modalités de conduite du troupeau (part du pâturage et de la conduite en bâtiment), etc.

Chacune de ces composantes évolue sous l'effet de plusieurs facteurs :

- l'évolution du contexte socio-économique, politique et réglementaire, ce dernier fixant les prix des produits agricoles et les objectifs de production, et influant sur le développement des innovations, la mise en œuvre de certaines techniques/pratiques, l'accès et/ou le recours à certaines ressources. Citons par exemple l'orientation des efforts de sélection génétique, les politiques d'usage de l'eau, les coûts des engrais de synthèse, les réglementations concernant l'utilisation des produits phytosanitaires, ou encore des usages des sols ;
- le changement climatique, qui agit directement sur les composantes biotiques des systèmes de culture et d'élevage (modulation du fonctionnement des organismes), ainsi que sur la disponibilité de certains facteurs de production (terres[34] cultivables, eau d'irrigation).

Pour rappel, les scénarios élaborés dans la présente étude reposent sur l'hypothèse d'une pérennisation du contexte socio-économique, politique et réglementaire actuel à l'horizon 2050, et ce pour l'ensemble des régions du monde. En corollaire, on suppose que la tendance actuelle d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) (compte tenu des objectifs politiques d'aujourd'hui) se poursuit, tendance sur laquelle on s'appuie pour formuler une hypothèse de changement climatique « tendanciel ».

In fine, l'on peut considérer que la production agricole évolue sous les effets conjoints du changement climatique et d'un ensemble d'autres facteurs désignés dans cette étude comme « évolutions techniques ». Ces dernières correspondent à la fois à l'évolution du recours aux facteurs de production (semences, travail, eau, engrais, pesticides, etc.) et au progrès technique (progrès génétique, innovations technologiques, évolution des pratiques agricoles, etc.). Leurs effets sur la productivité agricole sont donc multifactoriels, et les mécanismes qui les sous-tendent difficiles à caractériser.

Étant donnés les objectifs de l'étude (*cf.* Introduction générale), l'analyse de la littérature scientifique internationale conduite dans le cadre de cette étude a prioritairement porté sur les mécanismes par lesquels le changement climatique affecte la production agricole et le potentiel agronomique des sols, notamment du fait des variations moyennes de la température et des précipitations et de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2. Les conclusions de cette analyse bibliographique sont synthétisées dans ce chapitre.

Ce chapitre décrit d'abord la **nature du changement climatique à l'œuvre dans la première moitié du XXIe siècle**, notamment en termes de variations de la température et de la pluviométrie annuelles liées à l'évolution de la concentration en GES.

[34] Les terres correspondent à la portion de la biosphère incluant à la fois les ressources naturelles (le sol, la couche de l'atmosphère proche de la surface, l'eau, les êtres vivants), les processus écologiques et les infrastructures humaines qui s'inscrivent dans ce système.

Il présente ensuite les **principaux effets du changement climatique sur les productions agricoles**. Dans le cas des **productions végétales**, l'analyse a essentiellement porté sur les effets sur le rendement (directement *via* les variations de la température, de la pluviométrie et de la concentrations atmosphérique en CO_2, ou indirectement *via* l'évolution de la pression de bioagresseurs), autrement dit la composante quantitative de la production. Le changement climatique peut également avoir des effets sur la qualité nutritionnelle des produits végétaux récoltés (teneurs en protéines, en certains oligoéléments et/ou vitamines, etc.). Il n'est pas facile de tenir compte explicitement de ces évolutions qualitatives dans des simulations réalisées avec le modèle GlobAgri-AE2050, modèle de flux qui se base sur les volumes exprimés en tonnes ou en équivalent calories (*cf.* Sous-Section 1.3.2). Ceci est d'autant plus difficile qu'il s'agit là d'un front nouveau de recherches non encore stabilisé. Les effets qualitatifs du changement climatique n'ont donc pas fait l'objet d'une analyse spécifique. Il est pourtant évident qu'une baisse de la richesse en nutriments des cultures nécessitera d'accroitre les rendements et/ou les surfaces cultivées pour maintenir les niveaux d'apports en nutriments des régimes alimentaires. La caractérisation des variations futures de la qualité nutritionnelle des produits agricoles resterait donc à réaliser pour compléter le travail quantitatif de simulation présenté dans les chapitres suivants.

Dans le cas des **productions animales**, la littérature permet d'analyser les effets physiologiques directs du changement climatique sur la productivité des animaux d'élevage, ainsi que ses effets indirects *via* les disponibilités et la qualité des fourrages qu'ils consomment.

Enfin, le potentiel agronomique des sols évolue sous l'effet de facteurs naturels et anthropiques, parmi lesquels le changement climatique. De cette évolution découlent des pertes et des gains potentiels de surfaces propices aux cultures (surfaces cultivables) à l'horizon 2050. Une section de ce chapitre présente les **mécanismes par lesquels le changement climatique affecte la disponibilité en terres cultivables**.

Ce chapitre conclut en résumant, parmi les différents facteurs de variabilité de la production agricole liée au changement climatique, ceux dont il est possible de quantifier les effets à l'horizon 2050 et ceux dont les effets futurs sont encore trop ambigus, difficiles à caractériser et/ou délicats à modéliser pour en établir des estimations réalistes à cet horizon temporel.

2.1. Manifestations futures du changement climatique

Le réchauffement global du système climatique, dont l'une des caractéristiques est la hausse de la moyenne globale de la température de surface[35] depuis la fin du XIX^{e} siècle, résulte d'une déstabilisation de l'équilibre radiatif[36] de la Terre sous l'action d'agents de forçage externes au système. Il est désormais bien établi par le GIEC[37] dans son 5^{e} rapport d'évaluation (IPCC, 2013) que le CO_2 est le principal facteur de forçage radiatif depuis la fin du XVIII^{e} siècle[38], et que son rôle est prépondérant dans l'évolution de ce forçage depuis 1970.

L'augmentation de la température a pour conséquence une modification du bilan hydrique, par le biais de l'augmentation de l'évapotranspiration. Si les tendances passées d'évolution des régimes des précipitations sont moins nettes que celles des températures, le GIEC (IPCC, 2013) estime probable que la moyenne des précipitations observée sur les terres émergées des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord a augmenté depuis le début du XX^{e} siècle, notamment après 1951 (le degré de confiance est moindre pour les autres latitudes).

Depuis le 4^{e} rapport d'évaluation du GIEC, les preuves du lien de causalité entre les émissions anthropiques de GES et le réchauffement climatique passé se sont renforcées, et le GIEC estime extrêmement probable que les effets de ces émissions aient été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{e} siècle (IPCC, 2013). Les scénarios d'évolution future du climat dépendent donc largement de l'évolution des émissions anthropiques de GES. Depuis son 5^{e} rapport d'évaluation, le GIEC fonde ses projections climatiques sur des « Profils représentatifs d'évolution de concentration » (ou RCP pour *Representative Concentration Pathways*), décrivant des trajectoires possibles d'émissions ou de concentration de GES, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols. Les quatre RCP retenus par le GIEC sont issus d'une sélection effectuée

[35] Terres émergées et océans.

[36] Équilibre entre le rayonnement solaire net entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère.

[37] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

[38] Environ 1,7 Watt par m^2 entre 1750 et 2011 à comparer à 3,0 Watts par m^2 pour l'ensemble des GES anthropiques, dont 1,0 Watts par m^2 pour le seul méthane.

par ses experts sur la base de centaines de scénarios publiés dans la littérature. Le RCP2.6[39] est un scénario d'atténuation dans lequel des politiques climatiques efficaces sont mises en place et conduisent à limiter le réchauffement planétaire en 2100 à environ +2°C au-dessus des niveaux préindustriels. Les RCP4.5 et 6.0 sont des scénarios intermédiaires, et le RCP8.5 correspond à un scénario d'émissions très élevées de GES. En guise d'illustration, la concentration atmosphérique en CO_2, qui a évolué rapidement depuis le début du XXe siècle pour atteindre 390,5 ppm en 2011, devrait atteindre 442,7 et 540,5 ppm en 2050 selon, respectivement, les RCP2.6 et 8.5, avec une faible variabilité régionale et saisonnière.

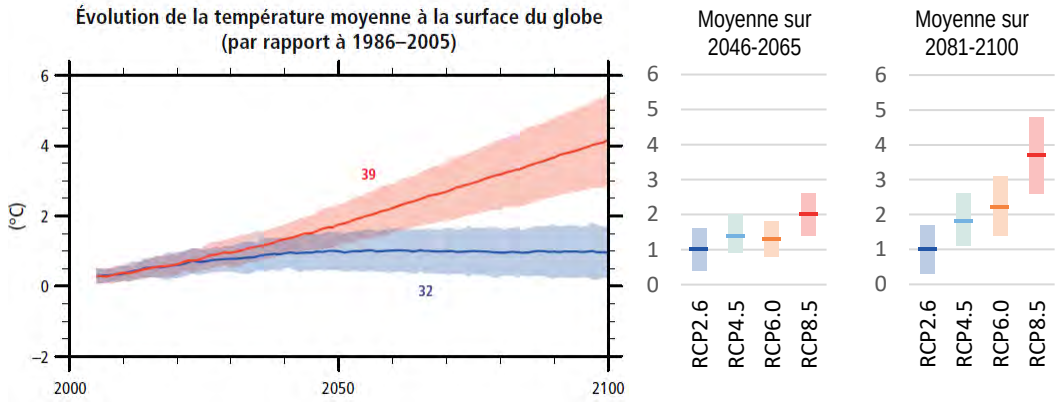
Pour estimer les évolutions futures possibles de la température de surface et des précipitations induites par l'évolution des concentrations en GES des différents scénarios RCP, le GIEC reprend les projections obtenues par un ensemble de modèles climatiques dans le cadre du projet CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5*[40]).

2.1.1. Évolution future de la température moyenne annuelle de surface

Quel que soit le scénario d'émissions considéré, les projections indiquent une augmentation de la température au cours du XXIe siècle (Figure 2-1). L'ampleur des changements projetés dépend fortement du choix du scénario d'émissions. Ainsi, dans le scénario médian RCP6.0, la variation de la température tend à évoluer de façon relativement linéaire entre la période de référence (1986-2005) et 2100, tandis qu'on observe une accélération progressive du réchauffement au cours du XXIe siècle selon le RCP8.5. Au contraire, la température tend à se stabiliser vers la fin du siècle dans le scénario RCP4.5, et au milieu du siècle dans le scénario RCP2.6.

Figure 2-1. Évolution de la température moyenne annuelle de surface entre 2006 et 2100 par rapport à la période 1986–2005 selon les scénarios RCP du GIEC

Projections moyennes multi-modèles de la température moyenne annuelle à la surface du globe (moyenne mondiale).
Les séries chronologiques des projections et une mesure de l'incertitude (parties ombrées) sont présentées pour les scénarios RCP2.6 (en bleu) et RCP8.5 (en rouge). Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne est indiqué dans le graphique.
Les moyennes et incertitudes (plage de 5-95 % de l'ensemble des modèles) associées sur les périodes 2046-2065 et 2081-2100 sont fournies pour les différents scénarios RCP sous forme de bandes verticales de couleur sur les deux panneaux de droite.



Source : d'après GIEC, 2014.

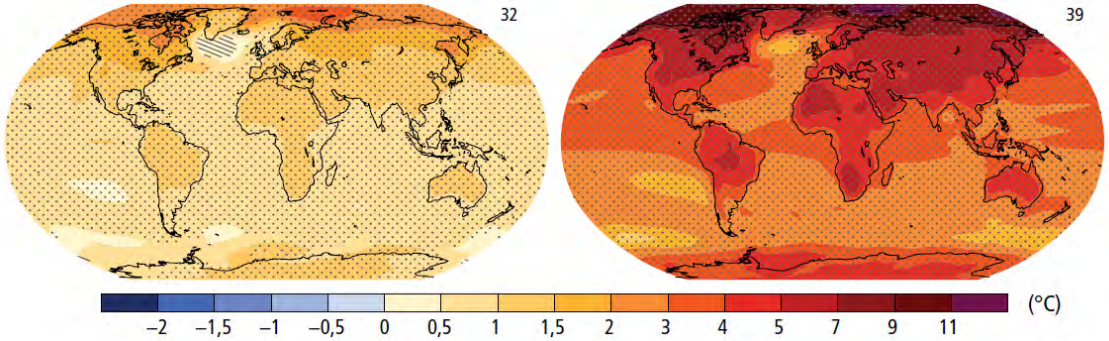
Les modèles calculent des évolutions non uniformes des températures à la surface du globe (Figure 2-2). Il est très probable que la région arctique se réchauffe plus rapidement que la moyenne mondiale, et que le réchauffement moyen soit plus important à la surface des continents qu'à la surface des océans, comme observé par le passé.

[39] La valeur associée à la dénomination de chaque RCP correspond au forçage radiatif obtenu pour l'année 2100 selon la trajectoire d'émissions de GES correspondante. Ainsi, le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 Watts par m^2.

[40] https://cmip.llnl.gov/cmip5/

Figure 2-2. Variations de la température moyenne annuelle de surface entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite)

Les valeurs présentées ici (et sur la figure 2-3) correspondent aux moyennes multi-modèles des projections réalisées dans le cadre du projet CMIP5 pour les deux scénarios du RCP2.6 et du RCP8.5. Le nombre de modèles CMIP5 employés pour calculer la moyenne multi-modèles est indiqué dans le coin supérieur droit de chaque planisphère. Les pointillés indiquent les régions où les variations prévues sont importantes par rapport à la variabilité naturelle interne (variations supérieures à deux écarts types de la variabilité interne des moyennes sur 20 ans) et où 90 % des modèles indiquent le même signe de variation. Les hachures indiquent les régions où les variations prévues sont inférieures à un écart type de la variabilité naturelle interne des moyennes sur 20 ans.



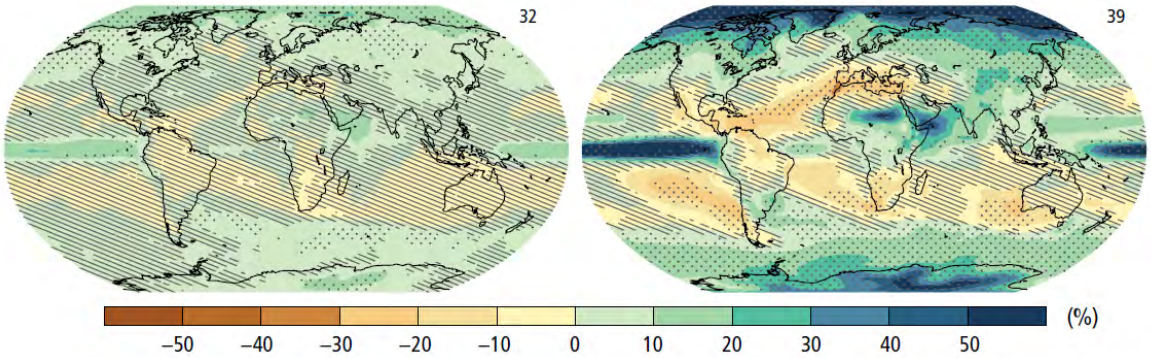
Source : GIEC, 2014.

2.1.2. Évolution future des précipitations moyennes annuelles

La dispersion des résultats entre modèles en termes de précipitations futures est plus forte que celle relative aux températures, et ce sans que les raisons des différences de prédiction soient aujourd'hui totalement comprises. Les projections concernant les précipitations sont donc plus incertaines que celles concernant les températures. Quel que soit le scénario RCP considéré, l'évolution projetée des précipitations moyennes ne se distingue pas de la variabilité climatique naturelle dans de nombreuses régions continentales du globe, surtout dans la première moitié du XXIe siècle. En revanche, selon les grandes zones géographiques considérées, on s'attend vraisemblablement à une accentuation des contrastes entre régions sèches et humides, même si des régions pourront déroger à cette règle globale, dans la deuxième moitié du XXIe siècle ; ceci est plus particulièrement le cas avec le scénario RCP8.5 (Figure 2-3).

Figure 2-3. Variations des précipitations moyennes annuelles entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite)

Clef de lecture identique à celle de la Figure 2-2.



Source : GIEC, 2014.

Il est probable que les précipitations moyennes annuelles augmentent aux hautes latitudes et dans certaines régions humides de latitude moyenne d'ici la fin du XXIe siècle. Au contraire, les précipitations tendraient à diminuer dans de nombreuses régions de latitude moyenne, et dans les régions subtropicales arides (bien que le degré de confiance soit moindre). Ainsi, le pourtour méditerranéen devrait connaître un plus fort déficit pluviométrique à l'avenir alors que les

régions septentrionales de l'Europe pourraient bénéficier d'un supplément de précipitations, ces différences étant renforcées par le scénario RCP8.5 relativement aux autres scénarios RCP. À une échelle régionale plus fine, les variations de précipitations seront probablement influencées par les émissions anthropiques d'aérosols. À une telle échelle, les variations moyennes projetées imputables au changement climatique sont néanmoins dans la plupart des cas inférieures aux variations dues à la variabilité naturelle.

Enfin, notons qu'un consensus entre modèles n'est pas nécessairement synonyme d'une grande robustesse des résultats. En effet, certaines comparaisons entre observations et simulations du climat passé récent montrent que les modèles climatiques peuvent sous-estimer l'amplitude des variations de précipitations dans plusieurs régions.

2.1.3. Changement climatique et événements extrêmes

Les événements climatiques extrêmes sont classiquement définis comme les bornes des gammes de valeurs que prennent les variables ou autres indicateurs climatiques.

L'évolution future des températures extrêmes (fréquence, intensité et durée des vagues de chaleur[41]) est désormais bien établie. Ainsi, le 5e rapport du GIEC (IPCC, 2013) estime de façon quasi certaine que dans la plupart des régions continentales, les extrêmes chauds seront plus nombreux et les extrêmes froids moins nombreux aux échelles quotidienne et saisonnière, à mesure que la température moyenne à la surface du globe augmentera. Il est également jugé très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et dureront plus longtemps.

L'évolution des précipitations extrêmes est moins certaine. Néanmoins, un climat plus chaud s'accompagnant d'une augmentation de l'évapotranspiration, on peut s'attendre à ce que le réchauffement intensifie le cycle hydrologique, entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes dans de nombreuses régions, comme cela a déjà été observé en Europe et en Amérique du Nord. Dans son 5e rapport d'évaluation, le GIEC estime ainsi que les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et plus fréquents aux latitudes moyennes et dans les régions tropicales humides. À l'échelle mondiale, quel que soit le scénario RCP, il est probable que les régions soumises aux régimes de mousson vont s'étendre, que les précipitations de mousson s'intensifieront et que la variabilité régionale des précipitations liée au phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO) augmentera.

L'occurrence des sécheresses (à l'échelle saisonnière, annuelle et décennale) est une manifestation normale de la variabilité climatique naturelle, contrôlée notamment par la température de surface des océans. Du fait de cette variabilité naturelle, les tendances d'évolutions à long terme des sécheresses sont difficiles à déterminer. D'après le 5e rapport d'évaluation du GIEC, les projections à l'échelle régionale ou globale des sécheresses demeurent relativement incertaines comparées à d'autres aspects du cycle hydrologique. Cependant, une baisse de l'humidité du sol dans le bassin méditerranéen, dans le Sud-Ouest des États-Unis et en Afrique Australe rend une augmentation du risque de sécheresse probable dans ces régions pour le scénario RCP8.5.

2.2. Effets du changement climatique sur la production agricole végétale

Les effets de la hausse des températures, de la variation des précipitations et de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 sur la production végétale sont de natures diverses. Les impacts les plus documentés dans la littérature scientifique concernent les dates d'atteinte de stades phénologiques des cultures, les dates de récolte et les rendements. Mais le changement climatique peut aussi avoir un impact sur la qualité de la production. L'analyse bibliographique a principalement porté sur les effets du changement climatique sur le rendement. Ces effets résumés ci-après sont susceptibles de varier en fonction de nombreux paramètres non directement liés au changement climatique, notamment les types de culture (espèces et variétés), les caractéristiques du sol et les pratiques et systèmes agricoles, dont certaines permettent d'atténuer les impacts négatifs du changement climatique.

[41] Périodes de plusieurs jours consécutifs avec des températures diurnes et nocturnes anormalement élevées.

2.2.1. Méthodes utilisées pour étudier l'impact du changement climatique sur la production agricole végétale

L'impact du changement climatique dépend de nombreux facteurs dont les effets individuels ou combinés peuvent être estimés selon trois approches principales, soit en recourant (i) à des expérimentations, (ii) à des modèles de culture et (iii) à des modèles statistiques.

Deux types d'expérimentations ont été mises en place pour mesurer l'effet du changement climatique sur la productivité des espèces cultivées en parcelles expérimentales. D'une part, les *field warming experiments* dans lesquelles des placettes sont soumises à un microclimat contrôlé (chauffage, utilisation de rideaux permettant de contrôler les précipitations). D'autre part, les expérimentations visant à étudier l'effet d'une augmentation de la teneur en CO_2 grâce à des diffuseurs de CO_2 mécaniques permettant de modifier les caractéristiques de l'atmosphère environnant la parcelle cultivée (expérimentations de type *Open Top Chambers* (OTC) ou *Free Air Carbon Enrichment* (FACE) – voir Encadré 2-1). L'inconvénient de l'approche expérimentale est qu'elle ne permet de tester qu'un nombre limité de situations pédoclimatiques et agronomiques.

Les modèles de culture mécanistes permettent de tester différentes combinaisons de variables climatiques, par exemple en appliquant une modification forfaitaire des variables d'entrées (+2 °C, +180 ppm, etc.) ou en simulant le développement d'une culture pour des scénarios de changement climatique générés par des modèles climatiques. Ils intègrent de nombreuses variables d'intérêt (biomasse, dates d'atteinte de stades clés, rendements, qualité des récoltes, etc.) et peuvent être utilisés pour simuler les réponses des cultures dans de nombreuses conditions pédoclimatiques. Les modèles diffèrent quant à leur façon de représenter le développement et la croissance des cultures, ainsi que par le nombre de processus pris en compte et leurs interactions. L'incertitude structurelle des équations constitutives de ces modèles, le mode d'estimation et/ou de calibration des paramètres et la difficulté à obtenir des données fiables pour quantifier leurs variables d'entrée, expliquent la variabilité des résultats et les incertitudes associées. Dans ce contexte, l'usage simultané d'un ensemble de modèles est l'approche la plus robuste pour simuler l'impact du changement climatique sur les rendements. Certains auteurs estiment qu'il convient d'analyser les résultats d'au moins cinq à huit modèles pour obtenir des variations de rendement robustes (Asseng *et al.*, 2013 ; Bassu *et al.*, 2014)[42].

Les modèles statistiques (ex : régression linéaire) ou fondés sur des méthodes de *machine learning* (i.e., reposant sur des algorithmes d'apprentissage) représentent une alternative intéressante. Ces modèles sont développés à partir d'observations historiques ou expérimentales. Contrairement aux modèles de culture mécanistes, ils ne décrivent pas en détail les processus biophysiques en jeu mais présentent l'avantage de pouvoir être plus facilement calibrés à partir de séries chronologiques de rendements et d'utiliser un nombre limité de variables d'entrée, sans que la précision de leurs prédictions soit nécessairement plus faible que celle des modèles mécanistes. Il est néanmoins nécessaire que le signal du changement climatique soit suffisamment visible dans les observations passées à partir desquelles sont réalisées les projections. Or on sait, par exemple, que sur la période récente (depuis l'après-guerre), l'effet de la variation de la teneur en CO_2 sur les rendements est trop faible par rapport aux variations de rendement interannuelles ou liées à d'autres évolutions (progrès technologiques, changements de pratiques, etc.) pour être détectable de façon fiable par un modèle statistique.

2.2.2. Effets d'une augmentation des températures sur les rendements des cultures

La durée totale du cycle d'une culture dépend de la température moyenne pendant la saison culturale. En effet, les végétaux répondent à l'accumulation thermique qui se calcule comme une somme de degrés-jours au-dessus d'une température de base dépendant de l'espèce et parfois de la variété. Si les besoins en température nécessaires au développement (*e.g.* le déclenchement de la floraison) sont mieux satisfaits plus tôt dans la saison culturale (*e.g.* du fait d'une température en moyenne plus élevée induite par le changement climatique), la durée de la période de croissance est écourtée. *A priori*, cette accélération de la croissance s'accompagne d'une diminution de la quantité de rayonnement solaire intercepté, ce qui peut en retour pénaliser l'accumulation de biomasse. Mais cette modification du rythme de croissance peut aussi permettre à la plante de se développer sous un régime thermique et hydrique plus favorable en esquivant des périodes de stress hydrique.

[42] Approche ensembliste explorée, par exemple, dans le programme international AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) ; pour plus de détails, voir : https://agmip.org/

La photopériode est le deuxième paramètre clef dans la détermination des dates d'atteinte des stades phénologiques. L'évolution du couple température-photopériode peut avoir des effets contrastés sur le rendement selon les espèces, les variétés ou encore les conditions de culture. Ainsi, elle peut être bénéfique *via* un allongement de la période de remplissage des grains, ou négative si les conditions ne permettent plus de remplir les besoins en vernalisation[43] (par exemple, pour le blé d'hiver).

Enfin, des évolutions extrêmes plus ponctuelles des températures peuvent également avoir des effets délétères sur les cultures. Des extrêmes positifs peuvent provoquer un échaudage thermique (moindre croissance des grains) qui pénalise le rendement ou induisent une sénescence accélérée par altération du photosystème foliaire. La diminution de la fréquence de températures extrêmement basses, par exemple à l'automne, pourrait, au contraire, avoir un effet positif direct sur le rendement des cultures d'hiver dans certaines régions. Dans son récent rapport spécial « *Climate Change and Land* », le GIEC indique cependant que des gelées printanières pourraient pénaliser la croissance et la floraison de la végétation en raison d'une avancée des stades permise par le réchauffement d'automne-hiver (Jia *et al.*, 2019).

2.2.3. Effets d'une modification du régime des précipitations sur les rendements des cultures

L'effet d'une variation de la pluviométrie sur les rendements des cultures dépend de plusieurs paramètres : la quantité et la répartition des précipitations dans la saison de culture, la réserve utile du sol et la profondeur d'enracinement des plantes, les besoins en eau des espèces et des variétés (surface foliaire, conductance stomatique, durée de cycle, etc.) et les pratiques agricoles (irrigation, drainage, travail du sol, etc.) qui peuvent moduler offre et demande en eau pour les plantes. En agriculture pluviale, une augmentation des précipitations a le plus souvent un effet bénéfique sur le rendement, notamment dans les régions arides ou semi-arides. Les excès de pluie peuvent néanmoins être délétères, surtout s'ils sont très concentrés dans le temps et qu'ils interviennent lors de phases particulièrement sensibles du cycle cultural comme la levée, la floraison ou la maturité (Ben-Ari *et al.*, 2018). Des précipitations soutenues contribuent par ailleurs au développement de maladies fongiques pénalisantes pour les rendements. La prédiction de l'évolution future des précipitations étant incertaine, il est difficile d'anticiper l'effet d'une modification du régime des précipitations sur les cultures comme le montrent les exercices de simulation du rendement utilisant différents modèles climatiques pour l'Europe (voir, par exemple, Donatelli *et al.*, 2015).

D'autre part, des précipitations plus intenses peuvent entraîner une redistribution de la répartition entre eaux de surface et eaux souterraines résultant d'une augmentation des volumes d'eau stockés dans les réservoirs et des eaux de ruissellement, et d'une diminution de la capacité de stockage du sol. Il en résulte un risque accru d'inondation et d'érosion du sol, et de stress hydrique de la végétation par excès d'eau (Jia *et al.*, 2019).

Enfin, l'impact sur les rendements des cultures des précipitations extrêmes est globalement moins important ou plus incertain et moins bien compris/modélisé que celui des températures extrêmes et de la sécheresse (Jia *et al.*, 2019). Toutefois, dans certaines régions et pour certaines cultures, par exemple dans le cas du maïs dans la moitié Ouest des États-Unis et dans le Sud de l'Afrique, les précipitations extrêmes expliquent la majorité de la variabilité du rendement observée aujourd'hui. Dans les régions tropicales (par exemple, en Inde) et dans certaines régions de moyennes et hautes latitudes (telles que la Chine et l'Europe centrale et du Nord), les inondations peuvent également affecter davantage le rendement que les sécheresses. Bien que les sols se rétablissent assez rapidement d'une inondation après le retrait des eaux, l'impact à plus long terme d'inondations répétées et intenses sur les propriétés des sols reste méconnu (Jia *et al.*, 2019).

2.2.4. Effets de l'augmentation de la teneur en CO_2 sur les rendements des cultures

Entre 40 et 60 % de la masse sèche des produits végétaux (grain, tige, racine, etc.) est constituée de carbone, provenant exclusivement de l'assimilation du CO_2 atmosphérique grâce à la photosynthèse. Les effets positifs de l'élévation de la teneur en CO_2 sur le développement des plantes sont bien connus, et de mieux en mieux quantifiés.

[43] La vernalisation est une période de froid subie par une plante nécessaire pour la faire passer du stade végétatif au stade reproductif, c'est-à-dire pour enclencher la floraison.

En conditions lumineuses, hydriques, thermiques et d'alimentation minérale optimales, l'élévation de la teneur en CO_2 améliore la photosynthèse, surtout chez les plantes en C3[44] (parmi lesquelles on trouve la plupart des espèces cultivées : blé, orge, soja, colza, tournesol, betterave sucrière, etc.). La teneur actuelle en CO_2 est en effet un facteur limitant du taux d'assimilation du CO_2 chez les plantes en C3, alors qu'elle ne l'est pas chez les plantes en C4 (maïs, sorgho, canne à sucre, etc.) qui disposent d'un mécanisme de concentration du CO_2. Par ailleurs, l'élévation de la teneur en CO_2 limite également la transpiration foliaire, dans des ampleurs identiques chez les plantes en C3 et en C4. Ces deux phénomènes concourent à l'augmentation de la surface de feuilles et à la production de biomasse. Du fait de la cascade de phénomènes qui découlent de la photosynthèse et de la transpiration, ces effets positifs sur le rendement sont en interactions étroites avec les conditions pédoclimatiques, et peuvent être contrebalancés par d'autres manifestations du changement climatique telles que l'augmentation de la température, qui tend à raccourcir le cycle de croissance, ou la réduction de la disponibilité en eau, qui réduit la croissance des feuilles et le taux d'assimilation du CO_2. L'amplitude de l'effet du CO_2 dépend également de la disponibilité en nutriments pour la plante.

Le nombre de résultats expérimentaux sur des cultures en situation de teneur en CO_2 élevée est aujourd'hui suffisamment important pour en quantifier les impacts sur les rendements agricoles. Une synthèse récente des résultats obtenus avec des dispositifs FACE pour différentes cultures permet d'identifier de grandes tendances d'évolution du rendement en réponse à une variation de la teneur en CO_2 de 350 ppm (teneur ambiante de la fin des années 1980) à 550 ppm (approximativement atteinte en 2070 sous le scénario RCP6.0, ou un peu après 2050 sous le scénario RCP8.5) compte tenu de la satisfaction des besoins en eau et en azote des plantes (Kimball, 2016 ; *cf.* Encadré 2-1).

Encadré 2-1. Quantification expérimentale des effets de la teneur en CO_2 sur le rendement

Deux grands types de dispositifs expérimentaux ont été utilisés dans la littérature pour étudier les conséquences de l'augmentation de la teneur en CO_2 ($[CO_2]$) sur les rendements sous diverses conditions de culture et pour différentes espèces cultivées. Les dispositifs les plus utilisés dans le monde sont de petites chambres climatisées sans toit (OTC pour *Open Top Chambers),* installées sur des parcelles cultivées durant tout le cycle cultural pour élever localement la $[CO_2]$. Il est également possible d'injecter directement du CO_2 à l'air libre sur la végétation (dispositifs FACE pour *Free Air Carbon Enrichment*).

Certains auteurs font l'hypothèse que les résultats acquis par le biais des OTC, qui mettent en évidence les augmentations des rendements les plus fortes (de près de +50 % par rapport au témoin placé dans une enceinte non enrichie) sont probablement surestimés, en raison des conditions de croissance meilleures sous OTC que dans le reste de la parcelle du fait d'artefacts liés aux parois des chambres. Les dispositifs FACE ont donc jusqu'ici été considérés comme les plus proches de la réalité. Néanmoins, la possibilité cette fois d'une sous-estimation de l'impact réel de la $[CO_2]$ sur les rendements par les dispositifs FACE a récemment été soulevée. En effet, dans ces dispositifs, la $[CO_2]$ subie par les plantes varie fortement et très rapidement (typiquement de +/- 50 ppm par minute). Or, le taux de photosynthèse des plantes dans un régime de $[CO_2]$ stable est d'environ 50 % supérieur à celui de la même plante exposée à cette très forte variabilité temporelle de la $[CO_2]$ (Bunce *et al.,* 2017 ; Allen *et al.,* 2020).

Les conclusions de ces expérimentations doivent s'interpréter en fonction des mécanismes décrits dans le corps du texte. Kimball (2016) a synthétisé les travaux réalisés sur différentes cultures avec des dispositifs FACE, certains d'entre eux manipulant également les deux autres variables ayant une influence sur l'expression de l'effet CO_2, soit l'eau et l'azote. L'absence de standardisation des teneurs-cibles en CO_2 testées dans les différents travaux rend difficile la comparaison des résultats. Néanmoins, la croissance des plantes répond de façon approximativement linéaire à l'augmentation de la $[CO_2]$ entre 300 et 900 ppm. L'auteur a donc ajusté linéairement les résultats à une variation de la $[CO_2]$ de 350 à 550 ppm.

En conditions d'azote et d'eau non limitantes, la variation moyenne du rendement est quasi nulle (voire légèrement négative) pour une culture en C4, alors que le rendement augmenterait de l'ordre de +10 % pour la betterave à sucre, de +10 à +20 % pour les protéagineux, de +20 % pour le colza, le blé, l'orge et le riz (Figure 1). En complément de cette synthèse, et pour la même gamme de variation de la $[CO_2]$, deux expérimentations OTC concluent à une augmentation du rendement du tournesol de l'ordre de +30 %.

Dans les conditions d'alimentation en eau limitante, l'effet d'atténuation de la $[CO_2]$ sur l'impact de la sécheresse se manifeste plus fortement chez les plantes en C4 dont le rendement est supérieur d'environ 30 % à celui de la culture en sec sous 550 ppm (Figure 1). Ceci est cohérent avec l'écophysiologie des deux principaux types de plantes. La réduction de la transpiration foliaire induite par l'élévation de la $[CO_2]$ prolonge la durée de vie des feuilles (ce qui accroit la photosynthèse) et permet d'esquiver la sécheresse aux

[44] Les plantes en C3 convertissent le CO_2 en un composé à trois carbones (l'acide phosphoglycérique - PGA) alors que les plantes en C4 le convertissent en un intermédiaire à quatre carbones (l'oxaloacetate - OAA).

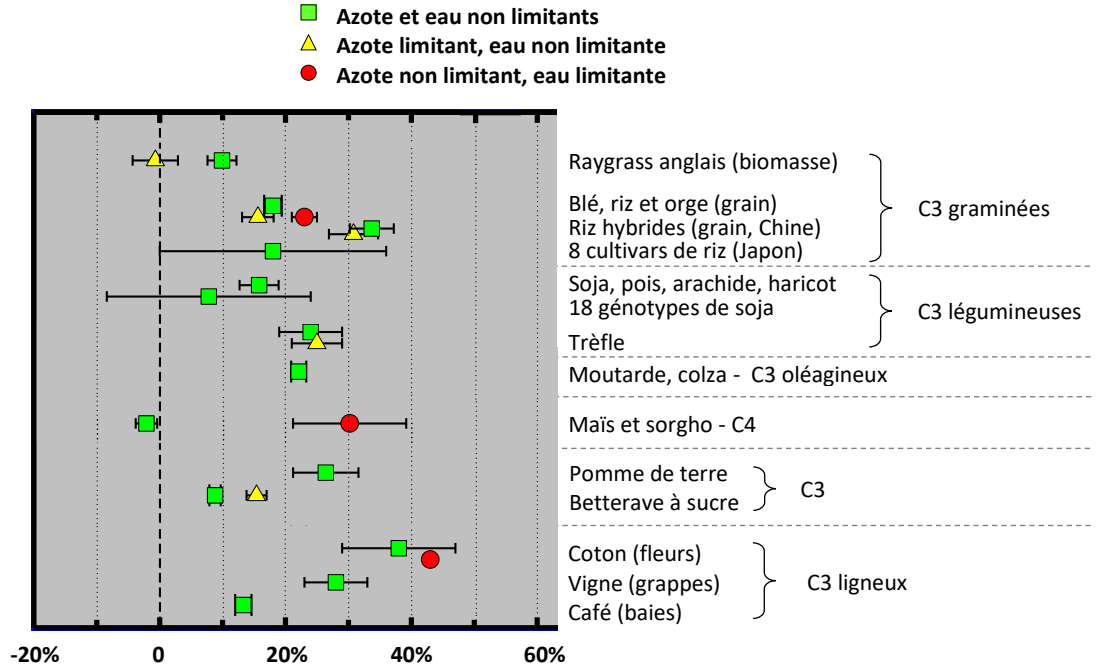
périodes clefs de floraison et de formation des graines, ces deux phénomènes conduisant à l'augmentation de la production de biomasse. Cette limitation de la transpiration est due à un faible degré d'ouverture des stomates, dont les plantes en C4 tirent un meilleur avantage que les plantes en C3 du fait du mécanisme de concentration du CO_2 dont elles disposent. Chez les plantes en C3, cette amélioration relative de l'état hydrique permise par la diminution de la transpiration est en partie compensée par une diminution du flux entrant de CO_2 dans les feuilles, et c'est l'effet sur la photosynthèse qui domine. Notons néanmoins que les rendements obtenus en sec restent ainsi plus faibles que ceux des témoins irrigués cultivés sous une [CO_2] de 350 ppm.

Dans les situations de contrainte azotée, l'effet positif de l'accroissement de la [CO_2] sur les rendements semble inchangé ou légèrement réduit (Figure 1). Néanmoins, l'auteur fait l'hypothèse que dans de nombreux cas, le « faible » niveau d'azote appliqué n'est pas suffisamment faible pour être réellement limitant, ce qui biaise les résultats. La variation positive du rendement en situation de [CO_2] élevée et de contrainte azotée pourrait donc être surestimée.

Par ailleurs, les études comparant les résultats obtenus pour différents génotypes d'une même espèce cultivée mettent en évidence la forte variabilité génétique de la réponse des cultures à l'élévation de la [CO_2]. Dans une étude comparant le rendement de huit cultivars de riz (Hasagawa *et al.*, 2013), les auteurs obtiennent une gamme de variations allant de 0 à +36 %. De même, la réponse du rendement de 18 génotypes de soja est comprise entre -9 et +22 % (Bishop *et al.*, 2015).

Figure 1. Réponse du rendement (%) à un enrichissement en CO_2 atmosphérique (de +200 ppm en dispositif FACE) pour différentes cultures et sous différentes conditions hydriques et azotées (d'après Kimball, 2016)

Le nombre de données répertoriées est de 18 pour le ray-grass, 151 pour les céréales en C3, 29 pour les protéagineux, 12 pour les céréales en C4, 6 pour la pomme de terre, 2 pour la betterave sucrière, 10 pour le trèfle et 2 pour le colza.



Selon d'autres études (Myers *et al.*, 2014), une baisse des teneurs en protéines et autres nutriments a été observée sous atmosphère enrichie en CO_2. Une partie de cette baisse peut être liée à l'accroissement des rendements qui dilue les éléments autres que le carbone dans la biomasse. S'y ajoutent des processus biochimiques et/ou morphologiques moins bien connus à l'heure actuelle. Sans compensation par la fertilisation, on pourrait donc s'attendre à une dégradation de la qualité des grains (teneur en protéines) avec l'augmentation de la [CO_2].

Récemment, des expérimentations de type FACE combinant élévation de la [CO_2] et élévation de la température ont été développées. Leurs résultats sont également synthétisés par Kimball (2016). Pour le maïs, le soja, le blé et le riz, l'effet CO_2 ne compense que partiellement l'effet plutôt négatif de l'élévation de la température sur le rendement, en particulier si l'élévation de la température est trop importante. Une autre expérimentation sur prairies conclut que si la seule élévation de la [CO_2] est favorable au rendement des graminées en C3, sa combinaison avec une élévation de la température favorise au contraire les graminées en C4 (Morgan *et al.*, 2011).

En conditions d'azote et d'eau non limitantes, les résultats montrent une augmentation du rendement chez toutes les espèces en C3 (en moyenne +19 % pour les céréales, et jusqu'à +40 % pour le coton), mais pas chez les C4. C'est en conditions d'alimentation en eau limitantes que l'effet positif de l'élévation de la teneur en CO_2 s'exprime chez les espèces en C4 *via* une forte atténuation de l'impact de la sécheresse, ceci du fait de l'amélioration relative de l'état hydrique de la culture découlant de la limitation de la transpiration. Cette amplification de l'effet CO_2 est également présent chez les plantes en C3, mais dans une moindre ampleur. Néanmoins, les niveaux absolus de rendements obtenus restent généralement plus faibles que ceux des témoins irrigués ou ne souffrant pas d'un apport en eau limitant : l'augmentation de la teneur en CO_2 ne compenserait donc pas le manque d'eau là où la sécheresse s'intensifierait. Une limitation de l'alimentation azotée ne permet pas aux plantes d'exprimer l'effet positif attendu de l'accroissement de la teneur en CO_2 sur les rendements, ce qui s'explique notamment par le fait que l'azote peut manquer à la synthèse des enzymes photosynthétiques nécessaires à la valorisation du CO_2 supplémentaire et à la croissance foliaire.

La plupart des études montrent par ailleurs une forte variabilité génétique de la réponse des cultures à la teneur en CO_2. Ceci est notamment observé chez le riz et le soja (Kimball, 2016), suggérant que le progrès génétique a un rôle à jouer dans la sélection de génotypes adaptés à des teneurs futures élevées en CO_2 atmosphérique.

Enfin, notons que la température, variable pourtant essentielle du changement climatique, est rarement manipulée dans les dispositifs OTC et FACE. Quand c'est le cas, les expérimentations tendent à montrer, pour le maïs, le soja, le blé et le riz, que plus l'élévation de la température est importante, moins l'effet positif de la teneur en CO_2 parvient à compenser l'effet plutôt négatif des températures élevées sur le rendement.

En complément des résultats synthétisés précédemment pour les cultures, divers travaux mesurent un accroissement du rendement de l'ordre de 10 %, pour les prairies et les plantes fourragères non légumineuses sur la base d'expérimentations généralement conduites sous des conditions où la fertilisation azotée ne satisfait pas tous les besoins d'une productivité maximale. En conditions minérales et hydriques non limitantes, l'effet positif du CO_2 rejoindrait celui mesuré sur les céréales en C3.

Les estimations obtenues avec des modèles mécanistes confirment les résultats des dispositifs expérimentaux pour le blé, le riz, le maïs, la pomme de terre et les prairies[45]. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux rendre compte de l'effet de la variabilité intra-annuelle des facteurs qui modulent l'impact du CO_2. Ainsi, une étude récente sur le maïs montre que si les modèles de culture en C4 reproduisent bien, en général, une absence d'effet sur les rendements de la teneur en CO_2 en conditions hydriques non limitantes, ils peuvent sous-estimer cet effet en cas de déficit hydrique du fait d'une trop forte imprécision temporelle du bilan hydrique pendant le cycle cultural (Durand *et al.*, 2018). On déplore par ailleurs une quasi absence de modèles (ou de données) pour les fruits et légumes, bien que les mécanismes sous-jacents de l'effet de la teneur en CO_2 sur les rendements soient les mêmes.

2.2.5. Effets du changement climatique sur la santé des plantes

Cette Sous-Section cherche à analyser comment le changement climatique pourrait affecter la santé des plantes cultivées en jouant sur les populations de pathogènes, de ravageurs et d'adventices, y compris en modifiant la biologie de leurs vecteurs (dans le cas, par exemple, des maladies à virus) ou celle des populations d'insectes entomophages (insectes prédateurs, parasites ou parasitoïdes qui se développent aux dépens d'autres insectes), avec, *in fine*, des conséquences sur les rendements des cultures.

Les cultures sont exposées à un cortège de bioagresseurs (champignons, virus, adventices, ravageurs) dont la biologie est très diverse (cycles de reproduction, préférences écologiques, etc.). En conséquence, la réponse de ces organismes aux manifestations du changement climatique (*cf.* Section 2.1) et aux pratiques culturales est également très variable. De plus, ces organismes ont co-évolué avec leurs plantes hôtes et les systèmes de culture mis en œuvre, s'adaptant de fait progressivement aux grandes tendances d'évolution du climat. Les dynamiques des populations et les aires de répartition des bioagresseurs ont donc déjà été modifiées par ces évolutions.

[45] Voir, par exemple : pour le blé, O'Leary *et al.* (2015), Asseng *et al.* (2018) ; pour le riz, Hasegawa *et al.* (2017) ; pour le maïs, Durand *et al.* (2018) ; pour la pomme de terre, Wolf et Van Oijen (2003), Raymundo *et al.* (2018) ; pour les prairies, Li *et al.* (2014).

Les impacts du changement climatique sur la santé des plantes s'apprécient en considérant deux types distincts de processus : (i) les épidémies et dynamiques de populations de bioagresseurs (ou de leurs vecteurs) et (ii) les pertes de récolte (rendement, qualité technologique, nutritionnelle ou sanitaire) pour les cultures d'intérêt. Les changements d'environnements (climat, systèmes de culture) agissent différemment sur ces deux types de processus. De ce fait, cette Sous-Section tente d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : Le changement climatique va-t-il, et avec quelle ampleur, modifier les épidémies ? Et, pour un même niveau d'épidémie, doit-on s'attendre à des impacts négatifs sur la quantité et la qualité des récoltes ?

Les effets du changement climatique sur les bioagresseurs sont à la fois directs et indirects. Les effets directs correspondent aux conséquences de variations du microenvironnement (par exemple, les températures) sur les cycles (par exemple, les taux d'infection, de reproduction). S'y ajoutent des effets indirects dus à l'adaptation progressive (incrémentale) des situations de production au changement climatique : par exemple, la distribution des dates de semis dans un territoire ou le niveau d'irrigation (volume et fréquence) peuvent influencer les dynamiques des bioagresseurs. La question de l'émergence (ou de la réémergence) de maladies et de ravageurs dans certaines zones géographiques est intuitivement associée au changement climatique. Mais les « invasions biologiques » sont également induites par la multiplication et la rapidité des échanges mondiaux. Cependant, des évènements extrêmes résultant du dérèglement climatique (tempêtes, inondations, sécheresses) peuvent introduire des espèces étrangères invasives dans de nouveaux biotopes et décroître la résistance des habitats aux invasions (Hulme, 2017). C'est ainsi que le changement climatique peut avoir des effets graduels sur les populations, permettant l'établissement de bioagresseurs dans des régions jusqu'alors peu propices (ou leur déclin dès lors que les conditions deviennent durablement défavorables). Les émergences (ou réémergences) soudaines peuvent également être causées par des modifications de la structure génétique des populations pathogènes liées à des facteurs anthropiques.

Pour ce qui est des épidémies, on distingue couramment trois types selon qu'elles sont chroniques, aigües ou émergentes. Les épidémies chroniques se produisent régulièrement, sur des zones très étendues, avec des pertes de récoltes de faibles à modérées. Il s'agit, par exemple, en blé, de l'oïdium (en déclin en Europe), de la septoriose ou encore de la rouille brune. Les épidémies aigües sont sporadiques, interviennent sur des zones géographiques limitées et induisent des pertes de récoltes de modérées à fortes. C'est le cas, par exemple, de la fusariose et de la rouille jaune (anciens pathotypes). Les épidémies émergentes enfin sont caractérisées par une expansion géographique au cours de plusieurs saisons. Leurs impacts sont inconnus, potentiellement très forts sur la production. Des exemples en sont la rouille noire, la rouille jaune (nouveaux pathotypes) ou le blast du blé.

S'agissant des épidémies chroniques, des effets épidémiologiques du changement climatique sont très vraisemblables (positifs ou négatifs) car les conditions climatiques sont susceptibles d'affecter la survie de l'inoculum entre saisons et les dynamiques des populations proprement dites. S'agissant des épidémies aiguës ou émergentes, le changement climatique peut avoir pour effet d'étendre l'espace où les épidémies peuvent se produire. C'est ce que l'on observe avec les nouvelles souches de rouille jaune et pour la fusariose (périodes plus humides et plus chaudes autour de la floraison). L'expansion de la rouille noire, une maladie des régions à étés chauds, pourrait logiquement être favorisée en Europe. Dans ces deux conditions épidémiques, il est en revanche très difficile de prévoir les effets du changement climatique sur la physiologie de la plante (ou du peuplement) malade, faute d'études. Comme indiqué précédemment, ces hypothèses sont très difficiles à tester en conditions expérimentales puisque l'évolution de la santé végétale dépend également des effets des pratiques agricoles (rotations, travail du sol, dates de semis, modalités de la fertilisation, organisation des paysages), des variétés (rotation des gènes de résistance, contournements, évolution des priorités de protection), et des méthodes directes de protection des cultures.

S'agissant des pertes de récolte, on sait, par exemple, qu'un stress hydrique est susceptible d'aggraver l'effet physiologique de certaines maladies (cas, par exemple, de la rouille brune en blé) ; on sait aussi qu'une épidémie précoce de rouille jaune peut induire une croissance racinaire réduite, augmentant la vulnérabilité du peuplement à un stress hydrique ultérieur. Pour autant, la physiologie de la plante ou du peuplement malades ne sont pas des objets de recherche actifs aujourd'hui.

La diversité des productions végétales conjuguée à celle des bioagresseurs ne permet pas donc pas d'apporter de réponse générale aux questions posées plus haut (West *et al.*, 2012). Les nombreux travaux conduits sur le blé, culture majeure en Europe et dans le Monde, ont permis d'éclairer et de quantifier les effets du climat et de ses variations sur quelques éléments des cycles parasitaires, avec une portée néanmoins limitée pour expliquer les épidémies. La revue de littérature réalisée dans le cadre de cette étude n'a pas mis en évidence de travaux dédiés à l'analyse expérimentale, quantitative, des effets du

changement climatique et de sa variabilité sur les épidémies, qu'il s'agisse des dynamiques saisonnières au sein du peuplement cultivé et à l'échelle des paysages, ou des dynamiques inter-saisonnières qui conditionnent l'inoculum primaire.

L'analyse de terrain se heurte à la rareté des données disponibles et à la confusion des effets, ceci parce que les pratiques agricoles évoluent pour faire face au renforcement des contraintes climatiques. Dans la plupart des cas, les productions végétales ne sont pas exposées à un bioagresseur isolé, mais à un ensemble de pathogènes, d'adventices et de ravageurs, correspondant à un profil de dégâts qui est susceptible d'évoluer sous l'effet du changement climatique.

Des modèles mécanistes (publiés, accessibles, validés) permettent toutefois de simuler (1) des épidémies pour différentes maladies (notamment sur blé) et (2) des pertes de récoltes occasionnées par ces maladies, prises isolément ou en combinaisons (Newberry *et al.,* 2016 ; Donatelli *et al.,* 2017). Il serait possible de s'appuyer sur ces modèles pour explorer des scénarios de santé végétale combinant des niveaux d'épidémies donnés associés à des contextes climatiques et agronomiques donnés. Ceci nécessiterait (1) une anticipation des dynamiques de dégâts (épidémies, infestations), (2) une anticipation des situations futures de production (climat et pratiques) et (3) une quantification des performances en l'absence et en présence des dommages anticipés. Il est en revanche plus difficile de prédire des invasions biologiques. Tout au plus peut-on identifier des zones à « risques d'invasions » à l'aide de différentes approches empiriques, par exemple les modèles de niche utilisés en écologie.

Si la littérature tend à conclure à une plus grande vulnérabilité aux bioagresseurs des systèmes agricoles soumis au changement climatique (Mbow *et al.,* 2019), cette conclusion, qualitative, s'appuie principalement sur des études d'impact théoriques, peu nombreuses et concentrées sur quelques espèces cultivées et quelques pathogènes. Les tendances qu'elles énoncent sont incertaines : d'une part, les modèles de prévision des épidémies et pertes de récolte sont incomplets et peu nombreux ; d'autre part, les effets prédits sont parfois opposés pour une même culture selon les pathogènes considérés, et les tendances mises en évidence variables selon les zones géographiques et les horizons temporels. Enfin, ces prévisions n'intègrent pas explicitement les adaptations des systèmes de culture. Les obstacles mis en évidence dans la revue de littérature conduite dans le cadre de cette étude conduit donc à conclure que l'on ne peut chiffrer de façon réaliste et robuste les pertes attribuables aux bioagresseurs à l'horizon 2050. En outre, on peut considérer que l'instrument privilégié d'une adaptation efficace restera la sélection variétale, avec des variétés résistantes aux nouveaux profils de dégâts.

2.3. Effets du changement climatique sur les productions animales

Le changement climatique peut affecter les animaux d'élevage et les systèmes d'élevage qui les sous-tendent *via* trois canaux principaux agissant en interactions, soit *via* un impact sur (i) les efficiences alimentaires et les performances productives des animaux et des troupeaux, (ii) leur santé et leur bien-être et (iii) la quantité, la qualité et nature des ressources alimentaires des animaux et donc, *in fine*, la digestibilité de ces ressources, sans oublier les disponibilités de la ressource eau pour l'abreuvement. Naturellement, le changement climatique peut aussi impacter les systèmes d'élevage dans le cadre du processus d'adaptation de ces derniers *via* le choix de pratiques d'élevage mieux adaptées, y compris le choix d'espèces et de races possiblement moins productives mais mieux adaptées aux manifestations moyennes et extrêmes du changement climatique. Nous analysons ci-après les trois canaux d'impacts, en illustrant le propos essentiellement sur la base de la situation européenne. Ce propos se veut surtout illustratif des effets possibles ; il ne prétend pas à couvrir toutes les espèces dans toutes les régions de la planète.

2.3.1. Effets du changement climatique sur les animaux, leur productivité, leur santé et leur bien-être

La fréquence accrue de températures extrêmes induite par le changement climatique devrait augmenter le nombre de périodes durant lesquelles les animaux d'élevage seront en dehors de leurs zones de confort, avec des conséquences potentiellement négatives sur les productions de viande, de lait ou d'œufs si des mesures correctrices ne sont pas adoptées, ainsi que sur la santé et le bien-être des animaux. En dehors de cette zone de confort dite de neutralité thermique, l'animal est en effet en situation de stress thermique qu'il cherche à contrecarrer en modifiant son comportement (davantage de déplacements, recherche d'abris, etc.) et/ou *via* des réactions physiologiques (modifications de la respiration, de l'ingestion, etc.). Ces deux stratégies d'adaptation des animaux entrainent une diminution de l'ingestion et une baisse quantitative et qualitative des productions (St-Pierre *et al.,* 2003). Notons que l'ingestion a tendance à diminuer plus rapidement que la

production quand la température augmente. Par suite, les efficiences alimentaires ne diminuent de manière significative que si les températures sont vraiment très élevées (Renaudeau *et al.,* 2011).

Au total, à l'horizon 2050 considéré dans cette étude, l'impact des évolutions des températures sur les indices de consommation devrait donc être limité. Faute de références scientifiques permettant de quantifier cet impact pour toutes les productions animales dans toutes les régions du monde, nous avons supposé que cet impact pouvait être considéré comme marginal (négligeable) tout en reconnaissant qu'il s'agit là d'une hypothèse forte dans le cas des élevages de monogastriques, notamment de volailles, conduits en bâtiments souvent anciens et donc ne bénéficiant de possibilités optimales de ventilation et de rafraichissement des ambiances. En appui de notre hypothèse d'impact marginal dans le cas des bovins laitiers, Key et Sneeringer (2014) montrent qu'à l'horizon 2030, le stress thermique entrainerait une diminution de la production laitière aux États-Unis comprise entre 0,60 et 1,35 % « seulement », en fonction du modèle climatique utilisé (la baisse de la production serait néanmoins supérieure à 2 % dans certains états du Sud des États-Unis). Ces auteurs concluent qu'il est vraisemblablement plus coûteux (en termes de litres de lait perdus) de réagir aux fluctuations annuelles ou intra-annuelles du stress thermique que d'anticiper ce dernier sur le long terme par des investissements d'adaptation qui ne sont pas nécessairement très élevés car correspondant surtout à des aménagements des bâtiments.

Plusieurs travaux ont par ailleurs montré que le changement climatique avait déjà eu des incidences sur les formes de maladies du bétail (Purse *et al.,* 2005 ; Wilson et Mellor, 2008 ; Kenyon *et al.,* 2009), et que son accélération devrait accroître ces incidences (Fox *et al.,* 2011 ; Fox *et al.,* 2015). Celles-ci résultent du double développement, d'une part, des agents pathogènes par élargissement de leurs biotopes, et, d'autre part, des épidémies que les conditions climatiques futures pourraient favoriser.

Plusieurs paramètres climatiques, notamment l'humidité, la température et les niveaux d'ultra-violets, peuvent influencer la suivie et le développement des agents pathogènes en affectant leur distribution spatiale, les intensités du parasite et de la maladie ainsi que les profils saisonniers d'infection (Fox *et al.,* 2011). Ces paramètres du changement climatique ne joueront pas de façon identique sur tous les agents pathogènes, les parasites à transmission vectorielle (par exemple, le virus de la *blue tongue* – langue bleue – qui, à l'échelle de la planète, peut toucher les ruminants et les camélidés) apparaissant particulièrement sensibles du fait de la dépendance du cycle de vie des vecteurs et de leur capacité vectorielle aux conditions abiotiques ; de même pour les macro-parasites du fait de la dépendance de leurs stades à l'air libre aux conditions ambiantes de température et d'humidité. Des travaux de modélisation ont pu montrer que des changements des paramètres climatiques, même faibles, pouvaient accroître les risques d'infection de tel agent pathogène (par exemple, le risque d'infection des ruminants au pâturage par des nématodes ; Rose *et al.,* 2015). Pour utiliser ces travaux de modélisation dans des exercices globaux de simulations tels que celui-ci, il faudrait les paramétrer pour les différents types d'agents pathogènes et les appliquer aux différents systèmes d'élevage et aux différentes espèces animales de par le monde, ceci afin de produire des projections d'impacts quantitatifs de ces parasites en fonction de différents scénarios climatiques. Il s'agit là, à l'évidence, d'une tâche immense. On notera d'ailleurs que les impacts sur la production ne sont pas toujours négatifs, comme le montrent, par exemple, Scasta *et al.* (2017) dans le cas de la mouche du bétail.

De façon générale, les effets négatifs du changement climatique sur la santé et le bien-être des animaux d'élevage résulteront de la combinaison de variations des températures de l'air (extérieures et à l'intérieur des bâtiments), des précipitations et des fréquences et amplitudes des évènements extrêmes (Lacetera, 2019). Les effets directs seront d'abord liés à l'augmentation des températures et aux vagues de chaleur. De façon variable selon leur durée et leur intensité, les stress thermiques pourront affecter la santé et le bien-être des animaux en causant des désordres métaboliques, des stress oxydatifs et des défaillances immunitaires à l'origine d'infections. Mais ces effets sont très difficiles à estimer et modéliser et ils seront d'autant moins sévères que des mesures d'adaptation seront mises en place pour limiter les conséquences comme c'est déjà le cas dans les régions fortement exposés à ces évènements. Les effets indirects seront, quant à eux, essentiellement liés à la disponibilité et à la qualité des ressources alimentaires et de l'eau d'abreuvement, ainsi qu'aux conditions de survie et à la distribution des pathogènes et/ou de leurs vecteurs.

2.3.2. Effets du changement climatique sur les ressources alimentaires des animaux

Au-delà de l'eau d'abreuvement, le changement climatique pourra également avoir un impact sur les productions animales *via* l'alimentation des animaux, au titre à la fois des ressources disponibles (impact quantitatif) et de la composition de celles-ci qui va jouer sur la digestibilité des rations alimentaires (impact qualitatif).

L'impact quantitatif fait référence à la disponibilité d'une ressource et plus globalement de l'ensemble des ressources mobilisées et/ou mobilisables par les animaux. Dans le cas des aliments concentrés comme les céréales ou les oléo-protéagineux, la problématique des impacts possibles du changement climatique sur leurs rendements a déjà été abordée (*Cf.* Section 2.1). Attachons-nous ici plus spécifiquement aux fourrages, cultivés ou non, dans un contexte où ceux-ci correspondent à une part très importante de l'ensemble des terres utilisées à des fins agricoles, y compris sous la forme de surfaces toujours en herbe. Ces ressources nécessaires en quantités importantes dans les élevages ruminants sont généralement produites dans l'exploitation et les conditions climatiques locales impactent donc directement les systèmes de production.

Dellar *et al.* (2018) ont cherché à synthétiser (dans le cadre d'une méta-analyse) l'ensemble de travaux visant à évaluer les impacts du changement climatique (appréhendé à l'aune de ses paramètres principaux que sont le taux de CO_2, la température et l'humidité, et leurs combinaisons) sur la productivité et la qualité des pâtures européennes. Selon leurs résultats, l'augmentation de la concentration en CO_2 aurait un effet positif sur les rendements (plus précisément le poids de matière sèche de la biomasse), mais un effet négatif sur la concentration en azote de cette biomasse. L'effet sur les rendements de l'augmentation des températures serait positif dans les régions européennes alpines et nord-européennes[46], nul ou très faiblement négatif dans les autres régions européennes ; l'effet sur la concentration en azote serait négatif. Les disponibilités en eau vont renforcer ou contrecarrer ces impacts. Dans le Nord-Est du continent, qui devrait être considérablement plus humide, une humidité plus forte augmenterait les rendements. Inversement, dans le Sud du continent, qui devrait être plus sec, une humidité moins importante aurait un impact négatif sur les rendements. Les auteurs analysent ensuite les effets combinés des trois paramètres climatiques. Ils notent ainsi que l'effet négatif sur la biomasse d'une baisse de l'humidité contrecarrerait l'effet positif des augmentations de la teneur en CO_2 et de la température, en ajoutant que l'irrigation des pâtures, notamment en Europe du Sud et en Europe continentale, pourrait s'avérer de plus en plus nécessaire mais au prix alors de pressions additionnelles sur les disponibilités en eau à la baisse (EEA, 2017b). Ils notent aussi qu'aucune étude n'a analysé les effets conjoints d'augmentations de la teneur en CO_2, de la température et de l'humidité alors que cette combinaison des trois paramètres climatiques devrait être demain plus fréquente dans la zone Nord-européenne. Au total, on résumera leur analyse selon un gradient Nord-Sud du continent européen, la décroissance de l'humidité le long de cet axe ayant pour conséquence de réduire les effets positifs sur les rendements des augmentations des teneurs en CO_2 et de la température. De façon générale, les conclusions sont donc qualitativement identiques à ceux déjà recensés pour les cultures avec un effet positif de la concentration atmosphérique en CO_2 (et la même incertitude quant à l'effectivité de l'effet de fertilisation du CO_2 « au champ ») et de la température, mais un impact négatif de la baisse de la pluviométrie et de l'humidité. Notons enfin que l'impact quantitatif peut varier selon la saison, avec à l'extrême, une disponibilité annuelle en fourrages identique mais répartie différemment sur l'année, soit, dans les latitudes européennes, une production plus grande au printemps mais plus faible en été.

Le changement climatique aura également un effet potentiel sur la composition chimique et nutritive des plantes consommées par les animaux et par suite, sur la digestibilité de leurs rations. De façon générale, une augmentation des températures aura un effet négatif sur la teneur en azote des fourrages par un effet de dilution, en quelque sorte en contrepartie de la croissance des rendements induite par cette augmentation des températures ; les éleveurs pourraient alors chercher à compenser cette moindre teneur en azote des fourrages par un recours accru aux aliments concentrés de façon à (ré)équilibrer les rations alimentaires des animaux (également, possiblement, par davantage de fourrages conservés (par exemple, sous forme d'ensilage) au détriment de fourrages pâturés). Il convient naturellement de ne pas limiter l'analyse au seul paramètre des températures en prenant en compte de façon simultanée l'ensemble des paramètres climatiques, notamment la pluviométrie et la teneur de l'atmosphère en CO_2. C'est ce qu'ont cherché à faire Dumont *et al.* (2015) dans un travail de synthèse que l'on résumera ainsi : (i) il n'y aurait pas d'effet de l'augmentation de la teneur en CO_2 sur les glucides de structure des fourrages (glucides des parois) et leur digestibilité ; par contraste, (ii) l'effet serait positif pour les autres glucides du cytoplasme cellulaire et négatif pour l'azote, effet négatif qui peut être réduit à zéro dans le cas des prairies multispécifiques riches en légumineuses ; (iii) contrairement à ce que concluent Dellar *et al.* (2018), Dumont *et al.* (2015) ne trouvent pas d'effet significatif de l'augmentation des seules températures sur la teneur en azote, pas plus sur les glucides (de structure et cellulaires) et donc, *in fine*, sur la digestibilité enzymatique ; enfin, (iv) une moindre humidité (pluviométrie) aurait un effet positif sur la teneur en azote, effet très variable selon les études prises en compte dans leur méta-analyse.

[46] Le découpage géographique de Dellar *et al.* (2018) diffère de celui de cette étude au sens où, par exemple, la France (une zone dans le modèle GlobAgri-AE2050) serait pour une large part (au nord d'une ligne Biarritz-Mulhouse) qualifiée d'atlantique, le reste du pays étant soit en zone alpine soit en zone sud.

2.4. Effets du changement climatique sur la qualité et la quantité des terres cultivables

L'évolution de la production agricole dépend mécaniquement de celle de la disponibilité en terres dites « cultivables », *i.e.* propices à la culture. Le caractère cultivable des terres, indépendamment de leur usage réel, résulte donc de la combinaison entre des propriétés des sols (taux de matière organique, richesse en nutriments utilisables par les plantes, capacité de rétention en eau, pH, etc.) et des conditions climatiques locales (température, pluviométrie, ensoleillement, etc.) favorables à l'implantation et au développement des cultures. Par ses effets sur ces deux composantes, le changement climatique peut entraîner une modification de la superficie et de la localisation des terres cultivables. Les modalités d'usage et de gestion des terres (apports d'intrants, mise en œuvre de l'irrigation, changements d'usage des sols, etc.) modulent aussi le caractère cultivable des terres.

Les travaux cherchant à caractériser et quantifier les évolutions des surfaces potentiellement cultivables en lien avec le changement climatique reposent généralement sur la définition de classes de « cultivabilité » des terres (classes de *suitability*) qui représentent les aptitudes des terres à la culture selon ces classes (voir, par exemple, Ramankutty *et al.*, 2002 ; Zabel *et al.*, 2014).

L'effet du changement climatique sur l'évolution des sols est assez mal connu et documenté. Il est probable que les modifications de températures et de régimes hydriques, tout comme les évènements extrêmes (sécheresses, inondations, intensités des pluies, incendies) vont modifier la stabilité des sols (par exemple, son érosion) et leur fertilité (par exemple, *via* le contenu en matière organique, le pH ou encore la salinité). Parmi les diverses propriétés étudiées, les caractéristiques de la matière organique (MO)[47] sont des déterminants majeurs de la qualité agronomique des sols, et des niveaux de fourniture de nombreux services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles (voir, par exemple, Tibi et Therond, 2018). La MO influence (et est influencée en retour par) de nombreux paramètres physicochimiques et biologiques des sols. Les caractéristiques de la MO des sols sont sous l'influence directe du climat au travers du bilan hydrique et de la température du sol qui influencent sa rétention en eau, sa chimie, les biomasses (dont les biomasses microbiennes) et leurs diversités biologiques, et la minéralisation du carbone (Bradford *et al.*, 2016). Il est cependant difficile de quantifier à l'échelle de l'ensemble de la planète les impacts du changement climatique sur la MO des sols (taux et caractéristiques), ceci parce que les modèles peinent à intégrer l'ensemble des facteurs qui modulent l'activité microbienne du sol, notamment les interactions sol-microorganismes-plantes et les effets du climat sur chacune de ces composantes. Certains phénomènes, par exemple la sur-minéralisation de la matière organique du sol après un apport de matière organique fraiche (*priming effect*) sont susceptibles d'être exacerbés par les évènements climatiques extrêmes (Jia *et al.*, 2019). D'autres phénomènes directement induits par le changement climatique, par exemple l'accroissement des incendies ou la décongélation du permafrost, sont en outre insuffisamment pris en compte dans ces modélisations. Les travaux consistant à soumettre expérimentalement les sols à des variations de la température et de l'humidité mettent en évidence, quant à eux, une importante variabilité des réponses de l'activité biologique du sol fonctions des biomes et les climats testés.

Notons également que les caractéristiques de la MO des sols sont sous l'influence des modalités de gestion des sols, en particulier de certaines pratiques agricoles (le travail du sol, l'épandage d'effluents d'élevage, etc.), et d'un certain nombre de processus impliqués dans la dégradation des sols (érosion, compaction, contamination, perte de biodiversité, etc.). Avec l'érosion (éolienne et hydrique), la diminution du taux de MO est d'ailleurs l'un des processus majeurs et intégrateur de dégradation des sols (Lorenz et Lal, 2016).

Le changement climatique agit également sur la localisation et la superficie des terres cultivables par le biais de l'élévation du niveau des mers. La dilatation thermique de l'océan, la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires et les changements de cycles hydrologiques continentaux ont déjà induit une hausse moyenne du niveau des mers de près de 20 cm depuis un siècle ; et le phénomène a tendance à s'accélérer. À l'avenir, il induira mécaniquement une augmentation de la fréquence des phénomènes de submersion, d'érosion et d'intrusion d'eau salée, en surface et dans les aquifères, participant à la dégradation des sols par salinisation, en particulier dans certaines zones deltaïques très agricoles (Lacroix *et*

[47] Les caractéristiques de la MO du sol sont abordées selon sa stabilité ou la dynamique possible de sa décomposition. Cette dynamique dépend non seulement de la composition chimique de la MO (par exemple, le rapport carbone sur azote), mais également de la manière dont la MO est plus ou moins accessible à la minéralisation. La MO du sol est ainsi étudiée par fractionnements chimique et physique (voir, par exemple, Puissant *et al.*, 2017).

al., 2019). À l'échelle mondiale, les surfaces concernées par l'élévation du niveau des mers seraient comprises entre 15 et plus de 40 millions d'hectares à l'horizon 2100, selon les scénarios climatiques et la prise en compte des marées les plus hautes. Il est néanmoins difficile d'évaluer la part que représentent les seules terres cultivées ou cultivables dans cette fourchette.

Notons enfin que si les phénomènes de dégradation des sols et les changements d'usages des terres peuvent induire une réduction de la disponibilité en terres cultivables, l'adaptation des modes de gestion des sols agricoles à ce contexte changeant pourrait, à l'inverse, contribuer à reconquérir des surfaces. Ces modes de gestion vertueux relèvent, de façon générale, de l'agroécologie (Wezel *et al.*, 2009 ; Mbow *et al.*, 2019) et des pratiques afférentes : fertilisation organique, diversification des cultures et allongement des rotations, introduction de prairies dans les systèmes de culture, agroforesterie, etc. Les effets bénéfiques de ces adaptations sur la qualité des sols, effets qui dépendent fortement des conditions agronomiques et pédoclimatiques locales, concernent principalement la diversité biologique, le taux de MO, la rétention en eau du sol et la limitation de l'érosion. La littérature ne permet toutefois pas de quantifier les effets futurs de telles stratégies sur l'extension des surfaces cultivables.

2.5. Synthèse partielle

La revue de littérature dont les principales conclusions sont synthétisées ci-dessus a été conduite en amont de la quantification des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 dans le but d'identifier, parmi les différents facteurs de variabilité de la production agricole liée au changement climatique, ceux dont il est possible de projeter les effets à l'horizon 2050 et ceux dont les effets futurs sont trop ambigus et difficiles à caractériser pour en établir des projections réalistes à cet horizon temporel. Pour rappel (*cf.* Chapitre 1), les variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 décrivant les systèmes de culture et d'élevage sont les rendements végétaux, les intensités culturales, les coefficients des efficiences animales et les disponibilités en terres cultivables.

Les données disponibles dans la littérature scientifique internationale permettent de **prendre en compte explicitement les impacts du changement climatique sur les rendements moyens des cultures et des prairies permanentes** dans le modèle GlobAgri-AE2050. Plus précisément, les effets quantitatifs liés aux variations moyennes de la température, de la pluviométrie et de la concentration atmosphérique en CO_2, peuvent être quantifiés pour des scénarios climatiques donnés à l'horizon 2050.

Les données disponibles permettent également de **prendre en compte explicitement les impacts du changement climatique sur l'extension des terres potentiellement cultivables en 2050**, *i.e.* les terres dont les caractéristiques agro-climatiques les rendent aptes à la culture, indépendamment de leur usage réel.

Certains facteurs de variabilité de la production agricole, dont l'évolution est trop incertaine en l'état actuel des connaissances, n'ont en revanche pas pu être intégrés dans les scénarios de référence.

Concernant les rendements végétaux, il s'agit en premier lieu des **impacts du changement climatique sur la disponibilité en eau pour l'irrigation**, qui affectent dans notre modèle l'évolution de la part des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées. En effet, les connaissances actuelles ne permettent pas de quantifier de façon robuste l'évolution de la disponibilité totale en eau bleue. Traduire cette disponibilité totale en quantité d'eau disponible pour l'irrigation nécessiterait en outre de formuler des hypothèses sur la répartition des usages de l'eau bleue à l'horizon 2050. Cette question fait néanmoins l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique (présentée dans le Chapitre 7) afin de proposer, à titre exploratoire, de premiers éléments de quantification des incertitudes liées aux impacts de la disponibilité en eau sur la production végétale dans les différentes régions européennes. Plus précisément, cette analyse explore les conséquences d'une accentuation des effets sur les rendements de la moindre disponibilité en eau qui affectera certaines régions européennes en 2050 pendant les périodes de croissance des cultures. Les **effets de la variation future de la pression de bioagresseurs en fonction du changement climatique** n'ont également pas été pris en compte explicitement. Notons toutefois que les projections de rendements retenues dans cette étude reposant en partie sur le prolongement des tendances d'évolutions des rendements observées par le passé. Celles-ci intègrent au moins implicitement les évolutions moyennes des pertes de récoltes liées aux bioagresseurs ; elles n'intègrent pas une aggravation possible de ces pertes. Enfin, le modèle n'inclut pas de variable d'entrée relative à la **qualité nutritionnelle des produits végétaux récoltés** alors que l'on sait aujourd'hui, par exemple, que le changement climatique pourrait avoir un effet sur la teneur en azote des grains et des fourrages, ainsi que sur leur composition en micronutriments et vitamines.

Concernant les systèmes d'élevage, seuls les impacts indirects du changement climatique *via* l'évolution des rendements des fourrages cultivés et des prairies permanentes ont été pris en compte. Ses **impacts directs sur la productivité des systèmes animaux** n'ont pas pu être intégrés explicitement dans les projections à 2050 des coefficients des efficiences animales.

Concernant les surfaces cultivables, les **impacts du changement climatique sur la qualité des sols** sont particulièrement difficiles à caractériser et à estimer car ils résultent, comme on l'a vu, d'un ensemble de processus en interactions. Les projections de surfaces potentiellement cultivables utilisées dans les scénarios n'intègrent pas cet effet.

Enfin, au-delà des effets de l'évolution moyenne des paramètres climatiques, le modèle GlobAgri-AE2050 ne permet pas de simuler les **impacts de la survenue d'événements extrêmes** ni de la **variabilité interannuelle du climat**.

Les différents aspects non pris en compte dans le volet de simulation de cette étude sont discutés dans le Chapitre 8 de ce rapport de synthèse, notamment afin d'identifier les questions de recherche prioritaires dont l'exploration permettrait de réduire les incertitudes liées aux facteurs non pris en compte de façon explicite dans les scénarios et les simulations.

Chapitre 3. Projections des variables clefs de l'offre agricole à l'horizon 2050

Les variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 relatives à l'offre agricole sont (i) les rendements végétaux, (ii) les coefficients d'efficience animale (rapport entre la quantité de matières végétales ingérée par les animaux et la quantité produite de viande, de lait ou d'œufs produite), (iii) les coefficients d'intensité culturale (ratio de la surface récoltée sur la surface cultivée) et (iv) la disponibilité en terres cultivables.

Dans les simulations réalisées dans cette étude et présentées dans les chapitres ultérieurs de ce rapport, les effets du changement climatique sur la production agricole à l'horizon 2050 sont explicitement pris en compte au niveau des projections des rendements végétaux et des disponibilités en terres cultivables. Après une description des hypothèses quantitatives retenues pour caractériser le climat futur, ce chapitre présente en détail les méthodologies retenues pour caractériser ces deux variables à l'horizon 2050. Le travail de quantification **des rendements végétaux** s'est particulièrement attaché à rendre compte des incertitudes relatives aux effets du changement climatique et à la dynamique des évolutions techniques. Les **surfaces cultivables**, qui agissent comme une contrainte dans le modèle GlobAgri-AE2050, sont définies sur la base d'une estimation du potentiel agronomique des terres et de son évolution sous l'effet du changement climatique à l'horizon 2050. Leur définition est indépendante de l'usage actuel des terres ; elles sont à considérer comme des surfaces potentiellement cultivables.

Les projections retenues à l'horizon 2050 pour les autres variables d'entrée du modèle sont également présentées. Les **coefficients d'efficience animale** ont fait l'objet d'un travail spécifique approfondi de façon à corriger certaines « incohérences » du jeu de coefficients utilisé antérieurement dans le modèle GlobAgri. Il n'a cependant pas été possible, faute d'informations robustes, de quantifier explicitement l'impact du changement climatique à l'horizon 2050 sur ces nouveaux coefficients d'efficience animale. Il en est de même pour **les coefficients d'intensité culturale**, qui n'ont pas fait l'objet d'un travail spécifique et dont les évolutions à l'horizon 2050 sont tirées du rapport de 2018 de la FAO sur le futur de l'alimentation et de l'agriculture (FAO, 2018).

3.1. Caractérisation du climat en 2050 dans les 21 régions de l'étude

Parmi les manifestations du changement climatique, la hausse de la température annuelle moyenne (T°), la modification du régime des précipitations (P) et l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique ([CO_2]) sont les principaux changements susceptibles d'affecter la production agricole. Afin d'estimer l'effet du changement climatique sur la production agricole, il est donc nécessaire de caractériser les variations de ces trois paramètres pour chaque région AE2050 entre la situation « 2010 » et l'horizon 2050.

Les scénarios AE2050 adoptent une logique essentiellement tendancielle, projetant à l'horizon 2050 les caractéristiques « majoritaires » du monde d'aujourd'hui et des évolutions actuellement en cours. D'après le rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire de 1,5°C (Allen *et al.*, 2018), l'atteinte des objectifs nationaux actuels de réduction des émissions de GES conduirait à un réchauffement compris entre +3 et +4°C en 2100 relativement aux températures préindustrielles. Cette estimation se situe dans la fourchette haute des projections 2100 sous scénario RCP6.0 (de +2,0 à +3,7°C[48]), et dans la fourchette basse des projections 2081-2100 sous scénario RCP8.5 (de +3,2 à +5,4°C). Si le RCP8.5 peut être qualifié de « laisser faire », le RCP6.0 est également représentatif des scénarios de la littérature dans lesquels les politiques climatiques sont peu efficaces (ou, en tout état de cause, insuffisantes pour maintenir l'augmentation des températures en dessous de la barre des +2°C en 2100) : le RCP8.5 peut être considéré comme une variante pessimiste du RCP6.0.

Les scénarios RCP6.0 et RCP 8.5 correspondent à la logique qui sous-tend la construction des scénarios AE2050. Dans la suite de cette Section, seules ces deux trajectoires et les projections climatiques associées ont donc été considérées pour caractériser le changement climatique et le climat qui en résulte à l'horizon 2050.

[48] D'après le 5e rapport d'évaluation du GIEC ; intervalle de confiance à 90%.

Sous l'hypothèse d'un changement climatique tendanciel tel que découlant du RCP6.0, [CO_2] augmenterait de +87,2 ppm à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 ». Sous l'hypothèse d'un changement climatique aggravé tel que découlant du RCP8.5, cette augmentation serait de +150 ppm (IPCC, 2013). Le Tableau 3-1 présente les variations régionales de T° et de P à l'horizon 2050 relativement à « 2010 », estimées, selon les deux trajectoires de changement climatique retenues dans cette étude, à partir des données du *Climate Change Knowledge Portal* de la Banque Mondiale[49]. Les méthodes d'estimation de ces variations sont détaillées dans le Chapitre 5 du Rapport technique.

Le Tableau 3-1 illustre l'évolution non uniforme de T° et de P selon les régions AE2050 considérées. Les variations régionales de T° sont relativement proches de la moyenne mondiale, à l'exception du Canada-USA et de l'ex-URSS qui connaîtraient les augmentations les plus élevées (+1,7 et +1,6 °C, respectivement) et du Royaume-Uni, pays dans lequel l'augmentation serait la plus faible (+0,8 °C). La moyenne mondiale de la variation de P à l'horizon 2050 masque une plus large dispersion des valeurs entre régions. Les régions qui connaitraient les déficits de P les plus importants seraient l'Europe du Sud et l'Europe de l'Est, ainsi que la France, l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud, le Reste de l'Amérique et l'Océanie. À l'opposé, le Proche et Moyen-Orient, l'ex-URSS, le Canada-USA et la Chine connaitraient des augmentations plus importantes.

Tableau 3-1. Variations régionales de la température moyenne annuelle à la surface du globe (en °C) et du cumul des précipitations moyennes annuelles (en %) utilisées dans AE2050 pour caractériser le changement climatique entre « 2010 » et 2050

Les valeurs correspondent aux variations des deux paramètres climatiques entre la période de référence 1996-2015 et l'horizon de projection 2040-2059, recalculées à partir des données du *Climate Change Knowledge Portal de la Banque Mondiale*.

	Δ Température (°C)		**Δ Précipitations (%)**	
	RCP6.0	**RCP8.5**	**RCP6.0**	**RCP8.5**
France	+1,1	+1,7	-2	-3
Allemagne	+1,1	+1,7	+3	+5
Royaume-Uni	+0,8	+1,2	-1	+1
Pologne	+1,4	+1,7	-2	0
Europe du Sud	+1,1	+1,8	-7	-11
Europe de l'Est	+1,1	+1,7	-9	-10
Europe centrale	+1,3	+1,8	-1	-1
Reste de l'Europe	+1,2	+2,1	+5	+7
EUROPE (moyenne)	***+1,1***	***+1,8***	***-2***	***-2***
Canada-USA	+1,7	+2,6	+6	+10
Brésil-Argentine	+1,0	+1,6	0	-1
Reste de l'Amérique	+1,1	+1,7	-2	-4
Ex-URSS	+1,6	+2,4	+7	+10
Chine	+1,3	+2,1	+5	+11
Inde	+1,1	+1,7	+2	+4
Reste de l'Asie	+1,1	+1,7	+2	+6
Proche et Moyen-Orient	+1,1	+1,8	+10	+9
Afrique du Nord	+1,1	+2,0	+3	-1
Afrique de l'Ouest	+1,2	+1,8	-3	-2
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	+1,1	+1,7	-4	-3
Océanie	+1,3	+1,6	-4	-3
Reste du monde	+1,0	+1,7	0	0
MONDE (moyenne)	***+1,3***	***+2,0***	***+2***	***+3***

[49] https://climateknowledgeportal.worldbank.org/

3.2. Projections des rendements végétaux en 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques

Les projections utilisées dans les travaux prospectifs sur les évolutions de la disponibilité alimentaire mondiale reposent souvent sur des taux moyens de variation des rendements végétaux estimés par grands ensembles de pays ou régions du monde. Dans leur revue des de littérature sur ces travaux prospectifs, Le Mouël et Forslund (2017) mettent en évidence la grande variabilité des projections de rendements associées aux scénarios de types « tendanciels » et/ou *Business as Usual*, témoignant de la diversité des modalités de prise en compte des effets des différents facteurs qui jouent sur les rendements. Établir de telles projections pour une large gamme de cultures et pour les différentes régions du monde nécessite en effet de formuler des hypothèses sur l'évolution du contexte physique (sous l'influence du changement climatique), du contexte économique et sociétal (qui conditionne la dynamique des évolutions techniques) et de la nature des systèmes de culture (par exemple, systèmes irrigués *versus* pluviaux). Peu d'auteurs explicitent les poids relatifs de ces facteurs (notamment celui du changement climatique – quand il est pris en compte – par rapport à celui des évolutions techniques), et les hypothèses sous-jacentes.

Les projections de rendements retenues dans les différentes études sont en outre difficilement comparables, pour deux raisons principales. En premier lieu, quand le changement climatique est pris en compte, les études ne considèrent pas nécessairement les mêmes scénarios d'évolution du climat, les mêmes horizons de projection ni les mêmes méthodes pour estimer ses impacts sur les rendements, et plus généralement les productions agricoles (*cf.* Sous-Section 2.2.1). En second lieu, la variable « rendements » n'a pas toujours le même statut dans les modèles. Elle peut être exogène, comme dans le modèle GlobAgri-AE2050 : dans ce cas, les taux annuels d'évolution des rendements sont introduits par le modélisateur comme une variable d'entrée du modèle. Elle peut être endogène et les taux sont alors déterminés par le modèle, en sortie des simulations, en fonction de paramètres eux-mêmes exogènes et/ou endogènes. Malgré la diversité des approches mobilisées, la confrontation des projections de rendements utilisées dans les scénarios tendanciels et/ou de type *Business as Usual* examinées par Le Mouël et Forslund (2017) montre que celles-ci convergent au sens où il y aurait poursuite de la croissance des rendements à l'horizon 2050, à un rythme néanmoins près de deux fois moins élevé que celui observé sur la période passée 1961-2007.

Si les hypothèses et méthodes d'estimation des effets du changement climatique (quand il est pris en compte) adoptées dans les principales études prospectives sur la sécurité alimentaire mondiale sont plutôt explicites (à l'exception, souvent, de la manière dont est traité l'effet fertilisant du CO_2), les hypothèses relatives à la dynamique des évolutions techniques, à leur nature et à leurs effets sur les rendements le sont moins, et souvent de façon essentiellement qualitative. Il est encore plus difficile d'accéder à ces hypothèses lorsque le rendement est une variable endogène du modèle. Le travail réalisé ici a donc consisté à clarifier, dans nos projections des rendements à 2050, l'amplitude des variations dues, d'une part, au changement climatique (plus spécifiquement aux trois paramètres climatiques clefs que sont T°, P et [CO_2]) et, d'autre part, aux évolutions techniques (sans toutefois parvenir à expliciter, pour ces dernières, les parts respectives du progrès technique et des recours aux intrants). Ce positionnement conduit aussi à considérer les facteurs d'incertitudes autour de ces deux évolutions.

Rappelons qu'outre 33 catégories de cultures, GlobAgri-AE2050 considère cinq catégories de fourrages, soit (i) l'herbe des prairies permanentes, (ii) l'herbe des prairies temporaires, (iii) les fourrages cultivés non herbacés (agrégat rassemblant plusieurs types de fourrages cultivés tels que des légumineuses, des céréales fourragères, la betterave fourragère, etc.), (iv) les fourrages et déchets occasionnels (ensemble hétéroclite incluant aussi bien les déchets alimentaires que les ressources des parcours) et (v) les résidus des cultures telles que les tiges, les chaumes ou encore les gousses. Seuls les rendements des prairies permanentes, des prairies temporaires et des fourrages cultivés ont fait l'objet d'hypothèses d'évolution à 2050, dans la mesure où la production des fourrages occasionnels et des résidus des cultures ne mobilise pas directement de surfaces.

3.2.1. Effets du changement climatique en 2050 sur les rendements végétaux

Si la littérature scientifique disponible fournit des estimations quantitatives des effets du changement climatique sur les rendements végétaux, plus rares sont les travaux qui prennent en compte simultanément les trois principales variables climatiques en jeu ([CO_2], T° et P), et leurs interactions, pour une large gamme de cultures et de régions. En pratique, l'effet du CO_2 est souvent exclu des estimations utilisées dans les travaux relatifs à la sécurité alimentaire mondiale, même dans certains travaux récents (voir par exemple FAO, 2018), au motif des incertitudes relatives à son expression réelle « au champ ».

Rares également sont les travaux qui fournissent des estimations pour un scénario climatique, un horizon temporel et une gamme de cultures et de régions comparables à ceux considérés dans la présente étude. Enfin, l'analyse bibliographique met en évidence la nécessité de recourir à un ensemble de modèles pour obtenir des variations de rendement robustes. La mise en œuvre d'un large ensemble de modèles de culture couplés à des modèles climatiques pour couvrir la gamme de situations d'intérêt représenterait un travail de recherche à part entière, qui n'a pas été conduit ici.

En conséquence, une analyse quantitative de type méta-analyse des données disponibles les plus solides a été réalisée afin d'établir des modèles statistiques reliant la variation du rendement de la culture aux variations des trois principaux paramètres climatiques, de leurs interactions, ainsi que, le cas échéant, de la mise en œuvre de stratégies simples d'adaptation au changement climatique (adaptations incrémentales jouant sur les dates de semis, l'irrigation ou encore le choix des variétés)[50]. Naturellement, la disponibilité des études en termes de cultures, de régions ou encore de variables explicatives limite cette stratégie statistique. Il n'a ainsi pas été possible d'estimer les équations économétriques pour chaque culture et chaque région du modèle. Des extrapolations ont donc été nécessaires.

Les données analysées proviennent de 16 articles qui incluent chacun un à plusieurs jeux de données. La base de données complète correspond au total à 310 simulations de variations des rendements établies à partir de données expérimentales, de modèles de culture ou de méta-analyses de données simulées (Makowski *et al., in press*)[51]. L'analyse statistique de ces données a permis d'établir deux modèles, un pour les cultures de type C3 et un pour les cultures de type C4. Les paramètres estimés de ces équations sont présentés dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2. Paramètres estimés des équations statistiques reliant les variations des rendements aux variables climatiques (T°, P, $[CO_2]$)

Clef de lecture : selon le modèle établi pour les cultures en C3, une augmentation (une diminution) de la T° de 1° C entrainerait une réduction (un accroissement) du rendement de -2,395 %, toutes choses égales par ailleurs, etc.

	Variation du rendement (%)	
	Modèle "cultures C3"	Modèle "cultures C4"
Effet marginal d'une augmentation de T° de +1° Celsius	-2,395	-4,330
Effet marginal d'une augmentation de P de +1 % *	0,265	/
Effet marginal d'une augmentation de $[CO_2]$ de +1 ppm	0,090	0,020
Effet marginal de l'interaction T° x $[CO_2]$ *x* **	-0,014	/
Effet marginal des adaptations simples au changement climatique	7,253	/

* : Cumul des P durant la saison de croissance des cultures. ** : L'analyse n'a pas permis d'identifier un effet significatif des autres interactions entre paramètres climatiques. Source : Makowski *et al., in press.*

Conformément aux effets mis en évidence dans la Sous-Section 2.2.2, l'élévation de $[CO_2]$ sur les rendements est positif et 4,5 fois plus élevé pour les plantes en C3 que pour les plantes en C4. Rappelons que la valorisation de l'effet positif du CO_2 par les plantes est conditionnée à la satisfaction de leurs besoins azotés, et dépend pour partie de la génétique.

[50] Les modèles estimés ont la forme générale suivante :

$$Y_{ij} = a_{Ti}.T_{ij} + a_P.P_{ij} + a_C.C_{ij} + a_{CT}.C_{ij}.T_{ij} + a_A.I_{Aij} + \varepsilon_{ij} \qquad (1)$$

où Y_{ij} est le changement relatif (en %) du rendement par rapport à la référence du site *i* pour le scénario *j*, a_{Ti} est le paramètre décrivant l'effet relatif de l'augmentation de T° d'un degré Celsius sur le rendement pour l'étude *i*, a_P est le paramètre décrivant l'effet relatif de l'augmentation de P de 1% sur le rendement, a_C est le paramètre décrivant l'effet de l'augmentation de $[CO_2]$ d'1 ppm sur le rendement, a_{CT} est le paramètre décrivant l'effet d'interaction de T° et de $[CO_2]$, a_A est un paramètre correspondant à l'effet sur le rendement des adaptations au changement climatique, et I_{Aij} est une variable indicatrice égale à 1 pour les situations tenant compte d'une adaptation, à zéro sinon. Le modèle inclut deux termes aléatoires. Le premier terme a_{Ti} est supposé varier d'une étude à l'autre selon une loi Gaussienne : il permet de tenir compte du fait que l'effet de T° sur le rendement est susceptible de varier en fonction des caractéristiques du milieu et de la culture, mais également de la méthode utilisée (*e.g.* du fait des modèles de culture utilisés dans les études de la méta-analyse) pour l'estimer. Le deuxième terme ε_{ij} est une erreur aléatoire distribuée selon une loi Gaussienne décrivant la variabilité intra-études.

[51] Pour être sélectionnés parmi les 113 références identifiées dans le Web of Science, les articles devaient satisfaire au moins les deux conditions suivantes : (i) présenter les résultats d'au moins trois méthodes différentes d'estimation du rendement et/ou d'au moins trois modèles de culture différents et (ii) expliciter des valeurs de rendement ainsi que les caractéristiques des évolutions climatiques testées (variations de de T°, de P et de $[CO_2]$,). Les articles ainsi sélectionnés portent, dans le cas des cultures en C3 essentiellement sur le blé, le soja et le riz, dans le cas des cultures en C4 exclusivement sur le maïs.

Toujours en cohérence avec les connaissances relatives aux mécanismes physiologiques présentés dans le Chapitre 2, l'augmentation de T° a un effet négatif sur les rendements. Cet effet est nettement plus important en valeur absolue pour les plantes en C4 que pour les plantes en C3, sans qu'il soit possible d'expliquer de façon simple ce résultat sur la base des mécanismes physiologiques.

Dans le cas du modèle C4 estimé à partir de données relatives au maïs, les coefficients associés aux deux variables T° et [CO_2] sont les seuls qui sont statistiquement significatifs. L'absence d'effet significatif de la variation de P sur le rendement du maïs est inattendue ; elle peut être expliquée par le nombre limité d'estimations réalisées en conditions de stress hydrique dans le corpus analysé[52].

Dans le cas du modèle C3, l'augmentation de P a bien un effet positif et significatif sur le rendement. Deux autres variables sont également significatives : l'interaction entre T° et [CO_2] (impact négatif sur les rendements), et les adaptations simples au changement climatique (effet positif). Ce deuxième effet est néanmoins essentiellement lié au fort effet de cette variable mis en évidence dans une méta-analyse portant sur le blé (Challinor *et al.*, 2014)[53]. Bien que la capacité de certaines stratégies d'adaptation, telles que le choix des variétés ou des dates de semis, à compenser l'effet négatif du changement climatique sur les rendements ait été confirmée dans plusieurs études (Donatelli *et al.*, 2015 ; Asseng *et al.*, 2018), ce bénéfice est ici incertain. En effet, dans les travaux de modélisation qui le prennent en compte, les stratégies d'adaptation sont mises en œuvre de façon optimale. En pratique, l'efficacité de ces stratégies dépend de contraintes techniques et socio-économiques, et peut être variable selon les contextes locaux dans lesquels elles sont mises en œuvre.

Les deux équations dont les paramètres sont présentés dans le Tableau 3-2 ont été utilisées dans notre étude pour projeter les effets du changement climatique sur, respectivement, les plantes en C3 et les plantes en C4 à l'horizon 2050. Dans ce processus, il n'a pas été tenu compte du paramètre estimé de la variable « adaptations » de façon à ne tenir compte que des effets directs du changement climatique[54]. Ceci est fait pour deux scénarios climatiques distincts, un tendanciel et un aggravé (*cf.* Section 3.1). Pour un scénario climatique donné, deux projections sont effectuées, sans et avec prise en compte de l'effet de fertilisation du CO_2, ceci de façon à tenir compte de l'incertitude de la réalité cet effet au champ ; *cf.* Sous-Section 2.2.2). Les deux équations, identiques pour toutes les régions du monde, diffèrent par les niveaux des variables climatiques en entrée. La Figure 3-1 présente les résultats pour les plantes en C3 (panel a) et pour les plantes en C4 (panel b).

La robustesse des équations statistiques estimées est incertaine sur plusieurs points, notamment l'extrapolation à l'ensemble des plantes en C3 des résultats obtenus à partir du blé, du riz et du soja et, encore plus, l'extrapolation à l'ensemble des plantes en C4 des résultats obtenus uniquement à partir du maïs. De plus, les estimations de certains termes de ces équations sont intrinsèquement fragiles du fait du faible nombre de données sur lesquelles elles reposent (c'est le cas, notamment, des effets d'interactions entre plusieurs variables climatiques).

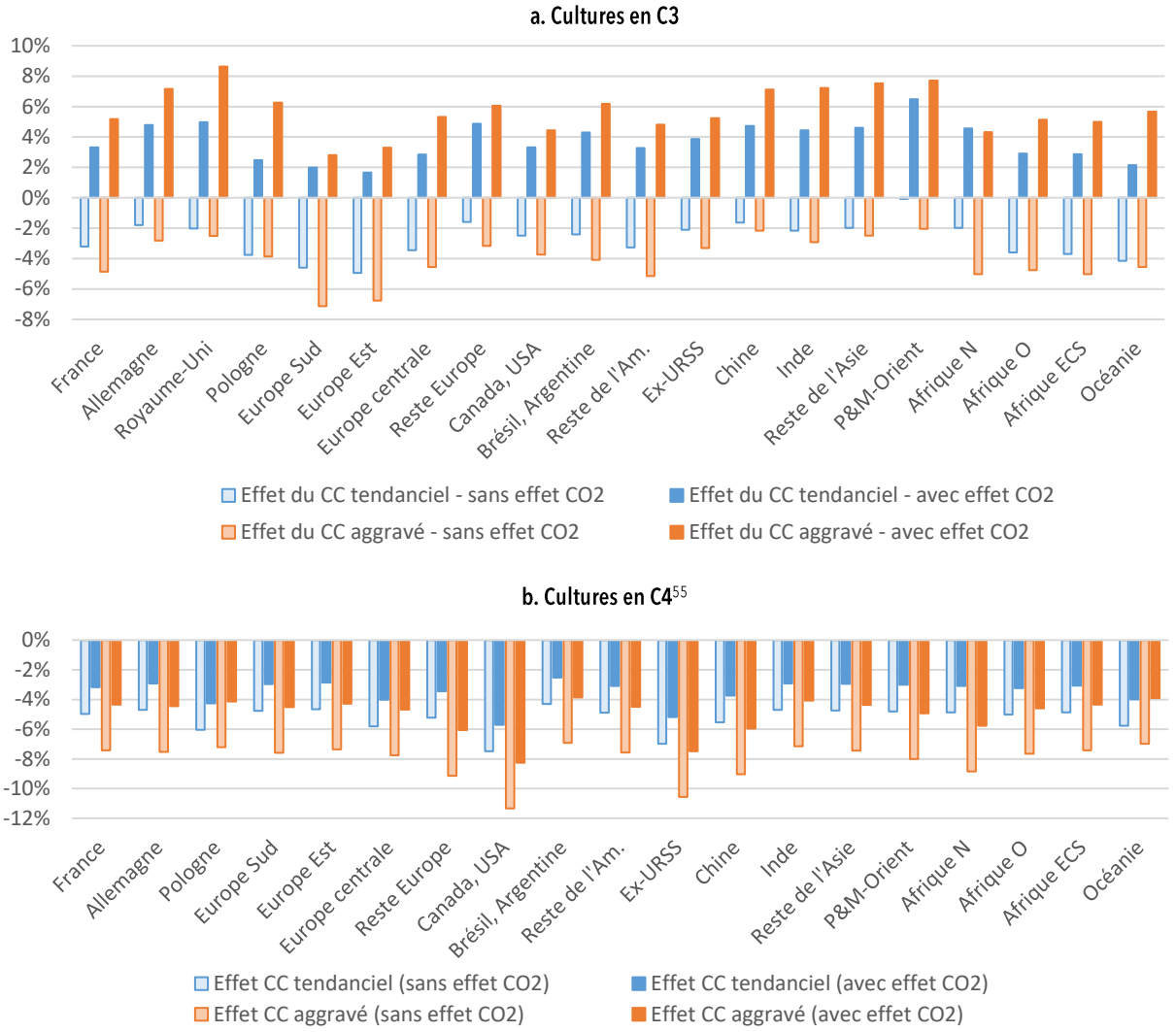
La prise en compte de l'effet CO_2 atténue l'impact négatif des autres paramètres climatiques sur le rendement pour les deux types de cultures et dans les deux hypothèses climatiques. Dans le cas des cultures en C3, on passe ainsi, sous changement climatique tendanciel, d'une perte moyenne de rendement comprise entre -0,1 et -4,9 %, selon les régions, sans valorisation de l'effet CO_2 à un gain moyen compris entre +1,7 et +6,5 % quand l'effet CO_2 est pleinement valorisé ; si le changement climatique est aggravé, on passe d'une perte moyenne comprise entre -2,0 et -7,1 % à un gain moyen compris entre +2,8 et +8,6 %. Dans le cas du maïs, l'effet CO_2 ne serait pas d'ampleur suffisante pour passer d'un impact négatif du climat à un impact positif : sans effet de fertilisation du CO_2, la perte moyenne de rendement serait comprise entre -4,3 et -7,5 % si le changement climatique est tendanciel, et entre -6,9 et -11,3 % s'il est aggravé ; avec effet de fertilisation du CO_2, la perte de rendement maximum serait encore négative, comprise entre -2,5 et -5,7 % si le changement climatique est tendanciel et entre -3,9 et -8,3 % s'il est aggravé. Ces résultats montrent ainsi une plus forte sensibilité des rendements des cultures à la capacité des plantes à valoriser le CO_2, en particulier pour les plantes en C3, qu'à celui du passage d'un changement climatique tendanciel à aggravé à l'horizon 2050.

[52] Le maïs est irrigué (sans limitation) dans une partie des articles analysés et la variation des précipitations est rarement prise en compte dans les articles portant sur le maïs non irrigué.

[53] Quand des adaptations simples sont prises en compte dans les articles analysés, leur effet n'est pas significatif pour les autres cultures considérées individuellement.

[54] Les effets des adaptations simples (en d'autres termes, incrémentales) au changement climatique sont en effet inclus dans ceux des évolutions techniques qui regroupent à la fois le progrès technique et les évolutions des pratiques. La méthodologie de projection à l'horizon 2050 de ces évolutions techniques est décrite dans la Sous-Section 3.2.2. Concrètement, les effets du changement climatique sur les rendements sont donc obtenus en utilisant le modèle statistique estimé dans lequel la variable indicatrice représentant les adaptations est supposée nulle.

Figure 3-1. Gamme des variations des rendements des cultures en C3 et en C4 en 2050 par rapport à « 2010 » (en %) sous l'effet d'un changement climatique tendanciel ou aggravé, avec et sans prise en compte de l'effet CO_2



Les estimations réalisées dans le cadre de la présente étude sont cohérentes avec les valeurs (généralement agrégées) et les informations plus qualitatives rapportées dans les principaux rapports internationaux qui considèrent cette question, notamment les récents rapports du GIEC. Ainsi, le 5e rapport du GIEC (IPCC, 2014) inclut une revue de 56 études estimant l'impact du changement climatique sur les rendements. Seules deux d'entre elles prennent en compte l'effet du CO_2. La synthèse des 54 études ne tenant pas compte de l'effet du CO_2 fait apparaître un effet médian négatif du changement climatique sur le rendement de l'ordre de -0.7 % par décennie toutes cultures confondues, avec de fortes disparités selon les espèces : environ -1.9 % par décennie pour le blé, -1,1 % pour le maïs et proche de zéro pour le soja et le riz. Le rapport met également en évidence la variabilité régionale de ces effets.

Plus récemment, le rapport spécial du GIEC « *Climate Change and Land* » d'août 2019 [56] présente une synthèse bibliographique qualitative des résultats d'études récentes évaluant l'impact du changement climatique sur les rendements (Mbow *et al.*, 2019). Quelques valeurs (variation du rendement en %) sont rapportées, essentiellement issues d'une étude estimant les effets probables du changement climatique sur la période 1981-2010 pour le maïs, le riz, le blé et le soja à l'échelle mondiale (Izumi *et al.*, 2018). En comparant les rendements observés sur cette période avec ceux qui auraient pu être théoriquement atteints si le climat n'avait pas changé, les auteurs obtiennent des gammes de valeurs très larges, allant d'impacts négatifs à positifs. Sans fournir d'estimations chiffrées, ce rapport spécial du GIEC rappelle l'effet négatif de

[55] FAOStat ne fournit aucune information statistique sur la culture du maïs au Royaume-Uni.

[56] https://www.ipcc.ch/report/srccl/

l'élévation de la température sur les rendements ; il ajoute que les impacts futurs du changement climatique varieront en fonction de l'effet CO_2 et des niveaux de fertilisation. Ils seront également différents selon les régions, les impacts négatifs risquant d'être plus marqués dans les zones tropicales.

Terminons cette Sous-Section par le cas particulier des rendements des fourrages. Pour les fourrages cultivés, les variations des rendements sous l'effet du changement climatique sont calculées comme la moyenne pondérée des variations des rendements estimées pour les produits GlobAgri-AE2050 entrant dans la composition de cet agrégat[57]. Les variations des rendements des prairies temporaires sont supposées être égales à celles des fourrages cultivés. Enfin, nous avons supposé que les effets du changement climatique sur les rendements des prairies permanentes sont de même amplitude que ceux estimés pour les cultures en C3. Les effets des variations de T°, de P et de [CO_2] sur les rendements des prairies permanentes en 2050 sont donc estimés en appliquant aux rendements de l'année « 2010 » de cette première catégorie de fourrages l'équation statistique établie pour les cultures en C3.

3.2.2. Effets des évolutions techniques en 2050 sur les rendements végétaux

L'augmentation continue des rendements observée par le passé traduit le fait que l'augmentation de la quantité des facteurs de production utilisés combinée au progrès technique, dont l'ensemble est désigné dans la présente étude sous le libellé d'évolutions techniques, ont eu des effets positifs suffisamment importants pour compenser, le cas échéant, les modulations à la baisse exercées par le changement climatique sur les dernières décennies et ainsi, permettre d'augmenter la production agricole végétale mondiale, fourrages inclus.

Les facteurs de production incluent la terre, le capital (bâtiments, matériels et cheptels), le travail et les intrants[58] (semences, engrais, pesticides, eau, aliments du bétail, produits vétérinaires, etc.). Le progrès technique est ici considéré dans une acception large, recouvrant une diversité de composantes : le progrès génétique, les innovations technologiques (relatives au machinisme agricole, aux équipements d'irrigation, aux outils numériques, etc.) et les changements des pratiques agricoles. Certaines de ces évolutions, qu'il s'agisse de celles liées aux facteurs de production ou de celles liées au progrès technique, peuvent (ou ont pu) être induites par le changement climatique, soit dans le but de s'adapter à ce dernier, soit dans un objectif de contribution à son atténuation.

De nombreux travaux s'intéressent aux évolutions techniques en agriculture à l'horizon 2050 ou à des horizons plus lointains. Plus rares sont ceux qui cherchent à quantifier ces évolutions en dépassant une vision relevant du risque ou, au contraire, de la promesse. Ces travaux sont en outre souvent centrés sur une ou quelques cultures et/ou un nombre limité de régions.

Dans cette étude, nous nous sommes surtout appuyés sur les travaux de la FAO (Alexandratos et Bruinsma, 2012 ; FAO, 2018) pour calibrer les évolutions techniques des agricultures des différentes régions du monde à l'horizon 2050. Rappelons ici que le rapport de 2012 ne considère qu'un seul scénario, tendanciel ou, de façon équivalente, *Business as Usual*. Il cherche à décrire ce que seraient les demandes et les offres de produits agricoles à l'horizon 2050 à l'échelle mondiale, plus exactement dans les différentes régions du monde en tenant compte des échanges entre régions. Les évolutions de l'offre sont celles qu'il faudrait réaliser pour satisfaire la demande, alimentaire et non alimentaire. Elles résultent d'évolutions de ses trois composantes, *i.e.* les rendements, les intensités culturales et les surfaces cultivées. Le rapport de la FAO de 2018 peut être considéré comme une actualisation du rapport du 2012. Il s'en différencie néanmoins sur deux points : la prise en compte explicite du changement climatique, et le développement de deux scénarios alternatifs en complément d'un scénario *Business as Usual* (*cf. infra*). Compte tenu de la difficulté à anticiper la dynamique future des évolutions techniques, les hypothèses adoptées à ce sujet dans ces deux rapports de la FAO ont été comparées pour caractériser l'incertitude qui entoure cette dynamique.

Le rapport Alexandratos et Bruinsma de 2012

Le rapport FAO de 2012 réalise des projections de rendements pour 105 pays et 34 cultures. Les auteurs raisonnent à partir des tendances observées par le passé, ajustées à dires d'experts pour tenir compte d'éléments qui pourraient les faire dévier de la trajectoire obtenue pas simple extrapolation des tendances passées. Notons en outre qu'ils adoptent l'hypothèse normative selon laquelle les conditions climatiques de 2005-2007 (années de référence de leur étude) prévaudront toujours

[57] La pondération est basée sur les proportions de chaque produit dans l'agrégat.

[58] Ce que les agronomes et zootechniciens désignent sous le terme d'intrants est ce que les économistes appellent consommations intermédiaires.

en 2050[59]. Les évolutions de rendements résultent donc uniquement des évolutions techniques telles que définies dans la présente étude (*cf. supra*).

À l'échelle de l'ensemble de la planète, les auteurs estiment que les rendements devraient croître annuellement de +0,77 % pour l'ensemble des cultures et de +0,68 % pour les céréales, traduisant ainsi le ralentissement de la croissance des rendements déjà observé pour la plupart des cultures depuis la fin des années 1980. Comme elles se fondent (en partie) sur l'analyse statistique des évolutions passées, ces projections reposent, par construction, sur une poursuite de la dynamique des évolutions techniques déjà engagées. Les auteurs supposent en particulier une poursuite de la réduction du *yield gap*[60] par l'amélioration des technologies et des pratiques, notamment une plus grande efficacité de la fertilisation[61]. Ils ajoutent que de telles évolutions ne seront possibles qu'aux conditions d'un fort soutien de la recherche agronomique et d'un contexte politique et économique favorisant l'acquisition, par les agriculteurs, des innovations et des pratiques permettant d'augmenter la productivité de leurs exploitations. L'analyse de la durabilité de ces innovations et pratiques n'est pas présentée.

Pour les besoins de la présente étude, les taux d'évolution des rendements estimés par Alexandratos et Bruinsma ont été ajustés pour certaines cultures dans certaines régions sur recommandations du groupe de scénarisation de notre étude, ceci afin de retranscrire des évolutions récentes (postérieures à « 2010 ») non prises en compte dans le travail synthétisé dans le rapport de la FAO de 2012. Ces ajustements ponctuels consistent, pour l'essentiel, à remplacer les taux de croissance des rendements évalués par Alexandratos et Bruinsma (2012) par ceux déduits d'une extrapolation des tendances des deux décennies 1995-2015. Le Tableau 3-3 détaille les principales situations concernées, parmi lesquelles les différentes régions européennes et l'ex-URSS, régions dans lesquelles ces ajustements ont été appliqués à toutes les cultures.

Tableau 3-3. Situations (régions x cultures) concernées par des ajustements des projections des rendements de Alexandratos et Bruinsma (2012)

Situations concernées		**Règles de décision**
Régions	**x Cultures**	
8 régions européennes	**Toutes les cultures***	Projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012) définies à l'échelle de l'ensemble de l'Europe, et donc ne permettant pas de différencier les évolutions selon les régions européennes : choix de prolonger les tendances régionales observées sur la période 1995-2015. → Toutes cultures confondues, évolutions des rendements moyens ainsi ajustés supérieures (de +13 % à l'échelle de l'ensemble de l'Europe) aux projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012).
Ex-URSS	**Toutes les cultures**	Projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012) nettement plus faibles que les évolutions observées sur les 20 dernières années : choix de prolonger les tendances observées sur la période 1995-2015. → Toutes cultures confondues, évolution des rendements moyens ainsi ajustés très supérieures (de +40 %) aux projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012).
Afrique du Nord et P&M-Orient	**Toutes les cultures**	Utilisation des évolutions établies par Le Mouël et Schmitt (2018) correspondant à une révision des projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012) pour les besoins d'une étude adoptant un regard plus fin sur l'Afrique du Nord et le Proche & Moyen-Orient.
Canada-USA	**Maïs et colza**	Projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012) en deçà des évolutions observées sur les 20 dernières années : choix de prolonger les tendances observées sur la période 1995-2015. → Étant donné l'importance de ces deux cultures au Canada-USA, la révision à la hausse de leurs rendements a un impact significatif positif sur les taux de croissance du rendement moyen toutes cultures confondues, de +13 % par rapport à la projection d'Alexandratos et Bruinsma (2012).
Chine	**Colza**	Projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012) très optimistes relativement aux évolutions passées et contrastant avec les projections que les auteurs proposent pour les autres cultures : choix de prolonger la tendance observée sur la période 1995-2015.

* Sauf exceptions, détaillées dans le Chapitre 5 du Rapport technique de l'étude.

[59] Cette hypothèse forte, et même irréaliste, a été abandonnée dans le rapport ultérieur de 2018 qui considère, de façon plus réaliste, que le climat sera modifié à l'horizon 2050. L'utilisation conjointe des deux rapports, de 2012 et de 2018, est néanmoins pratique dans la mesure où elle nous permet d'instruire de façon distincte les quantifications respectives des effets des évolutions techniques et du changement climatique.

[60] Le *yield gap* mesure, pour une culture donnée dans une situation de production donnée, l'écart entre le rendement actuel et le rendement potentiel maximal.

[61] Évolution conduisant à un ralentissement de la croissance de la consommation des engrais, mais pas à leur baisse.

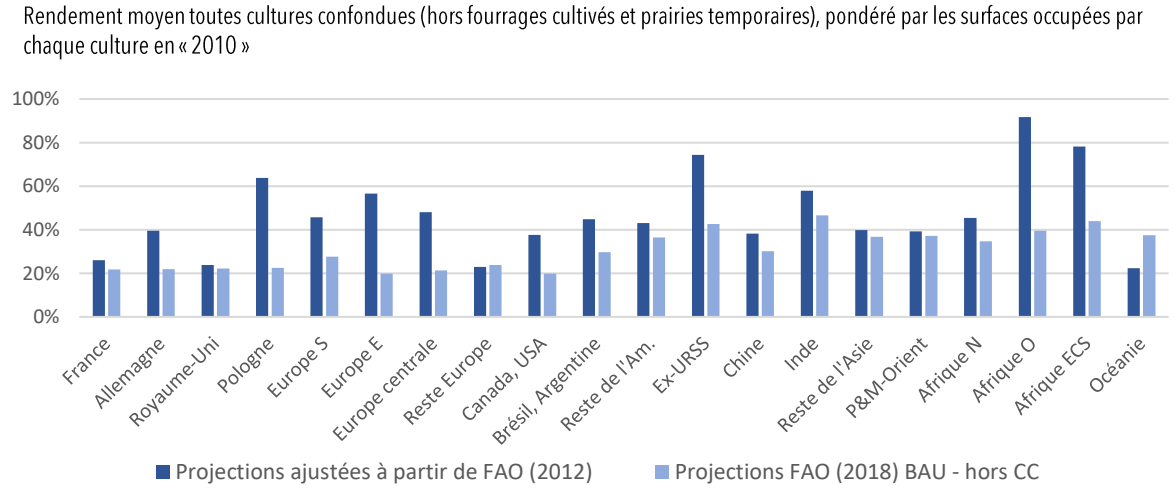
Le rapport FAO de 2018

Ce second rapport de la FAO inclut un scénario *Business as Usual* qui actualise les résultats publiés en 2012, et deux scénarios alternatifs (*Towards sustainability* et *Stratified society*) non explicitement considérés dans notre étude car ne répondant pas à une logique tendancielle. Autre nouveauté majeure, l'adossement explicite de ces trois scénarios à des scénarios du GIEC et donc, la prise en compte également explicite du changement climatique. Le scénario *Business as Usual* s'inscrit ainsi dans la trajectoire socio-économique du SSP2 (SSP pour *Shared Socioeconomic Pathway*) et dans la trajectoire d'émissions de GES du RCP6.0 (RCP pour *Representative Concentration Pathway*)[62]. Les projections des rendements de la FAO (2018) reposent donc sur une quantification distincte des effets du changement climatique et des effets des évolutions techniques. Seuls ces derniers sont considérés dans la présente Sous-Section[63]. Les projections ainsi obtenues suivent, de façon générale, une trajectoire moins optimiste que celle implicitement adoptée par Alexandratos et Bruinsma (2012), ceci du fait d'une hypothèse de moindres efforts de recherche et de développement en agriculture et de moindres investissements publics en agriculture. Il en résulte une dynamique plus modeste des innovations, en outre peu orientée vers l'atténuation des émissions de GES dans l'agriculture. La taille des exploitations agricoles a tendance à croître même si se développent aussi de plus petites structures à forte valeur ajoutée par unité de surface. Les usages des intrants chimiques ne sont pas plus régulés qu'aujourd'hui. L'efficacité de l'usage de l'eau s'améliore, néanmoins sans évolution majeure des pratiques et des techniques dans ce domaine. La diversification des cultures décroît et les stratégies d'adaptation au changement climatique restent limitées, ce qui ne permet pas d'augmenter la robustesse de la production aux aléas de diverses natures.

Ces évolutions techniques conduisent les auteurs à projeter une augmentation du rendement moyen, toutes cultures confondues, de l'ordre de +30 % à l'échelle mondiale, hors prise en compte des effets du changement climatique. De façon générale, ces nouvelles projections (hors effets du changement climatique) sont des révisions à la baisse de celles du rapport de 2012. C'est en particulier le cas en Afrique subsaharienne, zone pour laquelle Alexandratos et Bruinsma (2012) avaient adopté une hypothèse optimiste de plus forte croissance des rendements relativement à la période passée *via* la mobilisation de ressources et de techniques *a priori* disponibles mais aujourd'hui sous-exploitées (notamment l'usage des fertilisants). L'ex-URSS constitue une exception notable à cette règle, avec révision à la hausse des taux de croissance du rendement moyen. Notons enfin que la FAO (2018) ne révise pas ou très peu les projections des rendements établies par Alexandratos et Bruinsma (2012) pour les pays à hauts revenus, groupe de pays qui inclut le Canada-USA et les différentes régions européennes.

In fine, à l'horizon 2050, le rendement moyen projeté selon la FAO (2018) est quasi systématiquement inférieur au niveau des projections ajustées à partir d'Alexandratos et Bruinsma (2012) ; ceci est illustré par la Figure 3-2 ci-après.

Figure 3-2. Augmentations du rendement moyen en 2050 par rapport à « 2010 » (en %) dans les différentes régions du monde sous l'effet des évolutions techniques : comparaison des projections ajustées à partir d'Alexandratos et Bruinsma (2012) et des projections FAO (2018)



[62] Les auteurs du rapport ajoutent que ce scénario *Business as Usual* pourrait aussi être associé au RCP8.5.

[63] Dans le rapport de la FAO (2018), les effets du changement climatique sur les rendements sont caractérisés à l'aide de données FAO-IIASA-GAEZ, estimées sur la base d'un seul modèle de culture et sans tenir compte de l'effet de fertilisation du CO_2.

Les projections ajustées à partir d'Alexandratos et Bruinsma (2012), qui, on le rappelle, font l'hypothèse de la poursuite d'un rythme soutenu des évolutions techniques agricoles, conduisent à une augmentation du rendement moyen par rapport à « 2010 » de l'ordre de +40 % pour l'ensemble de l'Europe (de +23 à +64 % selon les différentes régions européennes) et pour la plupart des autres régions du monde, et à des augmentations plus fortes en Inde (+58 %), dans l'ex-URSS (+74 %), en Afrique de l'Est, centrale et du Sud (+78 %) et en Afrique de l'Ouest (+ 92 %). Les projections de la FAO (2018), basées sur une hypothèse de ralentissement des évolutions techniques agricoles, aboutissent à des augmentations du rendement moyen plus faibles, de +28 % en Europe et au Canada-USA, et variant entre +30 et +47 % dans les autres régions du monde.

La différence ainsi mise en avant entre les projections (ajustées) d'Alexandratos et Bruinsma (2012) et les projections de la FAO (2018) peut être interprétée comme traduisant l'incertitude relative à la dynamique des évolutions techniques à l'horizon 2050. Dans le cadre de la présente étude, nous choisissons de retenir ces deux ensembles de projections comme les bornes d'une fourchette matérialisant cette incertitude.

On soulignera que ces deux hypothèses relatives à la dynamique des évolutions techniques consistent à envisager un futur dans lequel l'agriculture intensive fondée sur l'usage d'intrants de synthèse prédominerait dans les régions développées, et prendrait de l'ampleur dans le reste du monde. La question des effets environnementaux négatifs de cette évolution se pose naturellement. Celle-ci n'est cependant pas au cœur de notre étude. En effet, la démarche et le cadre d'analyse ne permettent pas de caractériser finement les impacts environnementaux, encore moins de les quantifier, ceci parce que ne détaillant pas les caractéristiques des systèmes de production agricole qui sous-tendent les projections des rendements. De mêmes niveaux de rendements peuvent résulter de différents types de systèmes de production, plus ou moins diversifiés, gourmands en intrants, mécanisés, etc. La caractérisation des systèmes de culture qui sous-tendent les projections de rendements (et plus globalement les résultats des simulations) et leurs impacts environnementaux constitue un travail de recherche à part entière qui doit mobiliser, au minium, les communautés scientifiques des agronomes, des zootechniciens et des écologues.

Le cas des rendements des fourrages, notamment des prairies permanentes, mérite une attention particulière. Les deux rapports de la FAO, de 2012 et de 2018, ne fournissent pas d'informations statistiques sur les rendements des prairies permanentes. Ces dernières correspondent à des couverts de natures très diversifiées et avec des productivités à l'hectare très variables selon les régions et les modes variables de valorisation (pâture, foin, ensilage). Les rendements initiaux des prairies permanentes de « 2010 » sont donc entachés de grandes incertitudes. Projeter ces rendements à l'horizon 2050 est une tâche très difficile qui ne peut pas s'appuyer sur des références scientifiques et techniques robustes. Dans ce contexte, nous avons adopté une hypothèse très conservatrice d'absence d'évolutions techniques à l'horizon 2050 pour les prairies permanentes : leurs rendements à cette échéance n'évoluent que sous le seul effet du changement climatique (*cf.* Sous-Section 3.2.1). Les évolutions techniques des prairies temporaires et des fourrages cultivés sont supposées de même nature que celles des cultures. Leurs rendements à l'horizon 2050 sous l'impact des évolutions techniques sont donc calibrés en utilisant les deux rapports de la FAO.

3.2.3. Comparaison des projections de rendements en 2050 et méthodologie de sélection des projections pour la réalisation des simulations GlobAgri-AE2050

Les projections des rendements végétaux intégrant à la fois les effets du changement climatique et les effets des évolutions techniques[64] sont obtenues en combinant les deux modalités de projections présentés dans les deux Sous-Sections précédentes :

1. Dans un premier temps, on projette les rendements à l'horizon 2050 sous le seul effet des évolutions techniques, ceci sous deux hypothèses :

- Hypothèse TK+ : la poursuite du rythme actuel des évolutions techniques – projections ajustées à partir d'Alexandratos et Bruinsma (2012) ;
- Hypothèse TK- : un ralentissement de ces évolutions techniques – projections FAO (2018) sans prendre en compte les effets du changement climatique.

[64] Sauf pour les prairies permanentes qui n'évoluent à l'horizon 2050 que sous le seul effet du changement climatique, sous l'hypothèse d'évolutions techniques nulles.

2. Dans un second temps, on ajuste les évolutions ainsi obtenues pour tenir compte des effets du changement climatique en utilisant les modèles statistiques des cultures en C3 et C4 présentés dans la Sous-Section 3.2.1, selon deux hypothèses relatives à la capacité des plantes à valoriser l'effet de fertilisation du CO_2 :

- Hypothèse CO2+ : pleine valorisation « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2 ;
- Hypothèse CO2- : absence de valorisation « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2 ;

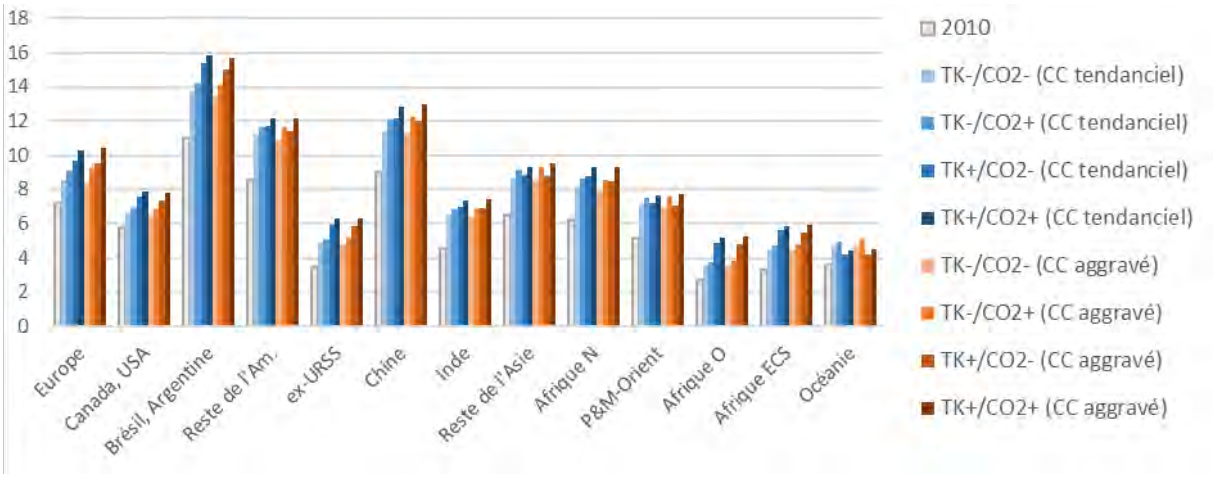
et deux hypothèses d'intensité du changement climatique :

- Hypothèse CC tendanciel : changement climatique tendanciel ;
- Hypothèse CC aggravé : changement climatique aggravé.

La procédure conduit à estimer huit jeux de rendements à l'horizon 2050, cette gamme des possibles traduisant les incertitudes associées à trois facteurs majeurs d'évolution des rendements, soit (i) les évolutions techniques, (ii) l'expression « au champ » de l'effet du CO_2 et (iii) l'intensité du changement climatique. Ces huit jeux de projections sont illustrés par la Figure 3-3.

Figure 3-3. Projections à l'horizon 2050 des niveaux du rendement moyen de l'ensemble des cultures dans les différentes régions sous les effets combinés des évolutions techniques et du changement climatique (t/ha)

Rendement moyen toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires), pondéré par les surfaces occupées par chaque culture en « 2010 ».
« TK » : hypothèse relative à la dynamique des évolutions techniques : ralentissement (TK-) ou poursuite du rythme actuel (TK+).
« CO2 » : hypothèse relative à la capacité des plantes à valoriser l'effet CO_2 : pas de valorisation (CO2-) ou valorisation pleine (CO2+).



La comparaison des rendements moyens, toutes cultures confondues, issus des huit modalités de projections montre en premier lieu que, sous les hypothèses adoptées dans cette étude, **le changement climatique à l'horizon 2050 aurait relativement peu d'effets sur les rendements en comparaison des évolutions techniques, et ce quelle que soit son intensité (tendanciel ou aggravé)**. En effet, à cet horizon temporel relativement à « 2010 », le changement climatique ferait varier le rendement moyen de l'ensemble des cultures de 2 % (hypothèse de changement climatique tendanciel) ou 10 % (hypothèse de changement climatique aggravé), en négatif quand l'effet de fertilisation du CO_2 est supposé ne pas s'exprimer « au champ », en positif quand il est supposé pleinement s'exprimer. Par comparaison, les évolutions techniques feraient varier ce même rendement moyen d'au moins +20 à +40 %, selon les régions dans l'hypothèse d'évolutions techniques modérées (hypothèse TK-), et jusqu'à 80-90 % dans les deux régions d'Afrique subsaharienne dans l'hypothèse d'évolutions techniques plus soutenues (hypothèse TK+). Le deuxième enseignement majeur est l'importance de l'effet positif de fertilisation du CO_2 sur les rendements, plus spécifiquement de son expression (hypothèse CO_2+) ou non (hypothèse CO_2-).

Afin de sélectionner les jeux de rendements qui seront *in fine* retenus dans les scénarios de référence de cette étude, des simulations « test » ont été réalisées avec ces huit jeux de rendements de façon à examiner la sensibilité des simulations (en termes de variations du besoin en surfaces cultivées à l'horizon 2050) aux trois facteurs que sont les évolutions techniques, la capacité des plantes à valoriser le CO_2 et l'intensité du changement climatique[65]. Ces simulations montrent que l'intensité

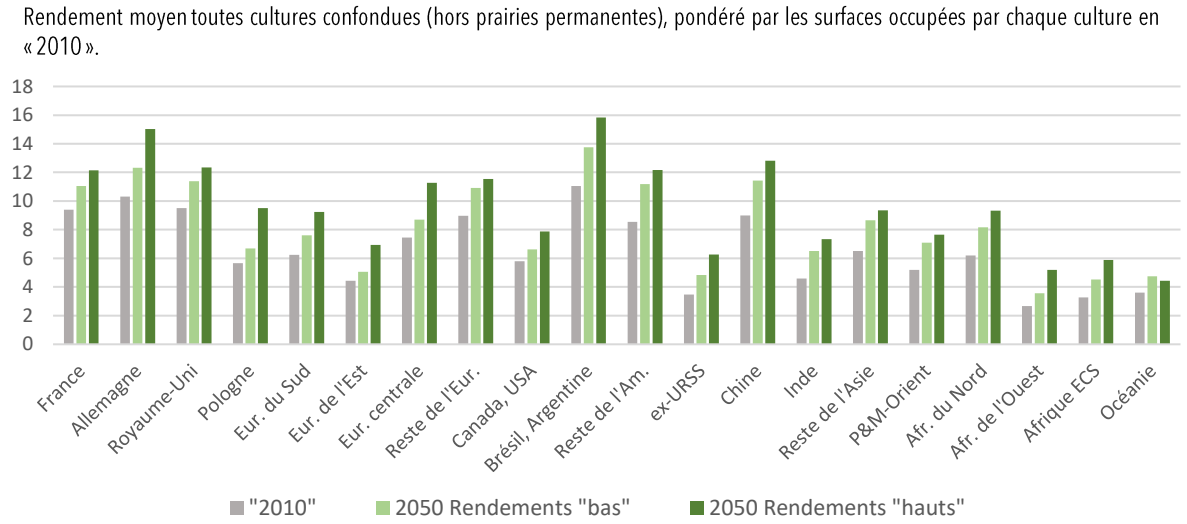
[65] Les caractéristiques (variables et paramètres d'entrée) et les résultats de ces simulations « test » en termes de variations du besoin estimé en surfaces cultivées entre « 2010 » et 2050 à l'échelle de l'Europe (prise comme un ensemble) et du monde entier sont présentés dans l'Annexe B.

du changement climatique (aggravé ou tendanciel), n'a pratiquement aucun effet sur le besoin total en terres cultivées total de l'Europe (pour une même hypothèse de valorisation de l'effet de fertilisation du CO_2). À l'échelle de l'ensemble du monde, l'effet additionnel d'une aggravation du changement climatique serait d'environ +15 millions d'hectares (Mha), soit un effet très faible en comparaison de l'effet lié aux évolutions techniques (+/- 150 Mha selon l'hypothèse retenue) et de l'effet de fertilisation du CO_2 (+/- 80 Mha selon l'hypothèse retenue). L'horizon 2050 ne semble donc pas adapté à l'analyse des effets de l'intensité du changement climatique, probablement en raison de la relative proximité des différents scénarios climatiques dans la première moitié du XXIe siècle. Cela ne serait probablement pas le cas si nous avions retenu un horizon plus lointain que 2050 du fait d'écarts alors plus grands, en termes de paramètres climatiques, entre les deux hypothèses d'évolution du changement climatique. *In fine*, pour les raisons expliquées ci-dessus, seule la trajectoire d'évolution tendancielle du changement climatique a été retenue dans les simulations présentées dans les chapitres suivants.

Dans un double objectif de cohérence et de parcimonie, nous supposons en outre qu'un ralentissement des évolutions techniques porterait préjudice à la mise en place, par les agriculteurs, de conditions de culture favorables à la valorisation du CO_2 par les plantes. A l'inverse, un maintien du rythme actuel des évolutions techniques rendrait possible la mise en œuvre de conditions favorables à l'exploitation de cet effet de fertilisation du CO_2, par exemple *via* une amélioration de l'efficience des engrais, une sélection variétale davantage orientée sur la sélection d'idéotypes variétaux capables de (mieux) valoriser le CO_2, etc.

L'analyse nous conduit donc, *in fine*, à retenir pour chaque culture deux jeux contrastés de projections des rendements végétaux à l'horizon 2050, un jeu dit de « rendements bas » et un jeu dit de « rendements hauts ». Le jeu des « rendements bas » suppose un ralentissement des évolutions techniques et l'absence de valorisation « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2 (hypothèses TK- et CO_2-). Le jeu des « rendements hauts » suppose, en quelque sorte à l'autre extrémité, le maintien du rythme actuel des évolutions techniques et une valorisation pleine « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2 (hypothèses TK+ et CO_2+)[66]. Considérés simultanément, ces deux jeux de rendements délimitent la gamme des niveaux que pourraient atteindre les rendements végétaux à l'horizon 2050 dans le cadre de scénarios d'évolutions tendancielles des systèmes agricoles, compte tenu des incertitudes qui pèsent sur les évolutions techniques agricoles et la capacité des plantes à valoriser l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2. Les scénarios de référence présentés dans le chapitre suivant sont donc simulés en utilisant ces deux jeux de projections des rendements, présentés dans la Figure 3-4, ce qui permet d'apprécier les effets des incertitudes qui les sous-tendent sur les évolutions du besoin en surfaces cultivées, les niveaux des productions et les niveaux des échanges de produits agricoles.

Figure 3-4. Rendement moyen de l'ensemble des cultures (t/ha) dans les différentes régions du monde en 2050 selon les deux jeux de projections retenus dans les scénarios de référence



[66] Les rendements des prairies permanentes à l'horizon 2050 n'évoluent que sous l'effet du changement climatique, les évolutions techniques étant supposées nulles. Par suite, les deux jeux de « rendements bas » et de « rendements hauts » des prairies permanentes ne se distinguent que par l'hypothèse relative à la capacité de ces couverts à valoriser ou non l'effet fertilisant du CO_2 : le jeu des « rendements bas » suppose l'absence de sa valorisation, le jeu des « rendements hauts » sa pleine valorisation.

Toutes cultures confondues, la gamme de projections de rendements retenue dans le cadre de la présente étude équivaut à un taux d'évolution annuel du rendement moyen de +0,64 % (« rendements bas ») à +1,00 % (« rendements hauts ») à l'échelle mondiale. Cette fourchette de valeurs est cohérente avec les taux relevés dans la littérature par Le Mouël et Forslund (2017), qui varient entre +0,77 et +1,00 % par an. Notons que la grande majorité des travaux prospectifs examinés par Le Mouël et Forslund (2017) n'intègrent pas les effets du changement climatique sur les rendements.

3.3. Projections en 2050 des efficiences animales

Dans le domaine animal, le modèle GlobAgri-AE2050 distingue sept secteurs de production, soit (i) le lait[67], (ii) la viande bovine, (iii) la viande porcine, (iv) la viande de volailles, (v) les œufs, (vi) la viande de petits ruminants et (vii) les produits animaux issus de l'aquaculture (poissons, coquillages et crustacés d'élevage). Chacun de ces secteurs est représenté sous la forme d'une fonction de production implicite à coefficients fixes qui relie la production du secteur aux aliments consommés par les animaux de ce secteur. Cette fonction peut s'écrire sous la forme générale suivante, pour un année *t* donnée dans une région *j* donnée[68] :

$$A_{iat} = b_{iat}.Q_{at} \quad (2)$$

où A_{iat} est la quantité de l'aliment *i* nécessaire pour produire la quantité Q_{at} du produit animal *a* à la date t. Les efficiences animales sont les coefficients b_{iat} définis comme la quantité de l'aliment *i* consommée par les animaux du secteur animal *a* pour atteindre un volume de production Q_{at}. Plus ce coefficient est faible, plus l'efficience de conversion de la matière première considérée dans le produit animal considéré est élevé.

Les coefficients des efficiences animales permettent ainsi de déterminer les utilisations de chaque matière première, y compris les fourrages cultivés et les fourrages non cultivés (prairies permanentes), pour l'alimentation des animaux d'élevage et donc, de compléter les usages alimentaires et non alimentaires par l'homme des différentes productions végétales. Rappelons ici que ces usages alimentaires et non alimentaires par l'homme sont des variables d'entrée du modèle (*cf.* Chapitre 1) nécessitant de poser des hypothèses quant à leurs évolutions à l'horizon 2050 (*cf.* Chapitre 4). Ces évolutions intègrent les utilisations des produits animaux qui, moyennant les équations (1) et notamment la connaissance des coefficients des efficiences animales b_{iat}, permettent ensuite de déterminer les utilisations des végétaux pour l'alimentation du bétail.

Le calibrage des coefficients des efficiences animales de l'année de référence « 2010 » et leurs projections à l'horizon 2050 ont fait l'objet d'un travail spécifique par les experts zootechniciens et économistes impliqués dans l'étude. Ce travail a principalement visé un objectif de cohérence, à fois entre espèces au sein d'une même région et entre régions pour une même espèce. Les coefficients utilisés ici, en « 2010 » et en 2050, diffèrent donc des coefficients utilisés dans des travaux prospectifs mobilisant des versions antérieures du modèle GlobAgri (Le Mouël et Schmitt (2018) dans le cadre de la prospective dite ANMO sur la sécurité alimentaire en 2050 en Afrique du Nord et au Proche- et Moyen-Orient ; Le Mouël *et al.* (2018) dans le cadre de la prospective Agrimonde-Terra). Rappelons que ces travaux considèrent l'Europe comme une seule région alors que la présente étude exige le calibrage des efficiences animales pour les huit régions européennes distinguées. Les incohérences constatées portaient tout autant sur les huit régions européennes que sur d'autres régions du monde, notamment la Chine.

Dans une première Sous-Section, nous présentons la méthode retenue pour calibrer les coefficients de l'année de base « 2010 » pour les monogastriques (porcs, volailles de chair, oeufs) et les gros ruminants (bovins lait, bovins viande)[69]. Dans une deuxième Sous-Section, nous expliquons comment ces coefficients ont été projetés à l'horizon 2050.

[67] Le produit « lait » inclut le lait des vaches, des bufflonnes, des chamelles, des ovins et des caprins. D'après les données de FAOStat, à l'échelle mondiale, le lait de vache et de bufflonne représente 96% de la production totale de lait.

[68] Dans un souci de simplification et sans perte de généralité, l'indice *j* relatif à la région est omis.

[69] Aucun travail spécifique n'a été réalisé pour les deux secteurs des petits ruminants et de l'aquaculture. Pour ces deux secteurs, la méthodologie utilisée pour calibrer les coefficients d'efficiences animales est donc celle qui a été utilisée dans les travaux prospectifs ayant recours à des versions antérieures du modèle GlobAgri. Cette méthodologie, résumée dans Le Mouël, de Lattre-Gasquet et le Mouël (2018), utilise les recherches de Bouwman et al. (2005), Monfreda *et al.* (2008) et Herrero *et al.* (2013).

3.3.1. Calibration des coefficients des efficiences animales en « 2010 »

De façon schématique, le calibrage des coefficients des efficiences animales de l'année de base « 2010 » a été réalisé en deux phases. Dans un premier temps, nous avons estimé des coefficients d'efficience globaux par secteur d'élevage et par région, ce qui nous a permis de déterminer la quantité totale d'aliments consommée par chaque secteur animal, quantité exprimée en tonnes d'aliments ingérés en équivalent matière sèche rapportés à la production en tonnes de produits animaux. Dans un deuxième temps, nous avons réparti cette quantité totale d'aliments entre les différentes catégories de matières premières utilisées par chaque secteur animal, selon une grille de décomposition spécifique à chacun d'entre eux.

Coefficients globaux d'efficience animale

Dans les secteurs des monogastriques (porcs, volailles de chair, œufs), compte tenu de la disponibilité des données et des sources d'information, les coefficients globaux des efficiences animales ont d'abord été calculés pour la France, ceci à partir des statistiques nationales disponibles relatives aux productions totales de ces secteurs et des consommations totales d'aliments par ceux-ci[70]. Les coefficients globaux des autres régions européennes ont ensuite été déterminés par rapport aux coefficients français, sur la base de différentes sources écrites d'information et à dire d'experts, en veillant à assurer la cohérence des coefficients, entre régions européennes pour une même espèce, entre espèces pour une même région européenne. Dans les autres régions du monde non européennes, les coefficients globaux ont également été déterminés à dire d'experts en tenant compte à la fois des disponibilités régionales des différentes matières premières pour l'alimentation du bétail décrits dans les bilans ressources - emplois de la FAO et des besoins nutritionnels des animaux (voir *infra*).

Dans les secteurs des gros ruminants (bovins lait, bovins viande), les coefficients des efficiences animales sont plus difficiles à calibrer du fait de la jointure, dans les systèmes d'élevage de bovins laitiers, entre les productions de lait (par les femelles laitières) et de viande (par leur descendance et lors de leur réforme quand les vaches laitières sont jugées ne plus être aptes à la production de lait). Il existe de par le monde de nombreux systèmes d'élevage de bovins qui se différencient par les importances respectives des productions de lait et de viande et les compositions des rations alimentaires des animaux, notamment en termes de parts respectives des aliments concentrés et des fourrages. Les statistiques disponibles à l'échelle des différentes régions du monde telles que définies dans cette étude ne permettent pas, de façon exhaustive, de caractériser chaque région par un nombre limité de types de systèmes d'élevage. De façon à pallier cette défaillance, nous avons travaillé en faisant comme s'il n'existait, dans chaque région, qu'un seul système d'élevage bovin (et un seul système buffle dans les régions où cette population est significative) dans lequel le lait est produit par les femelles laitières pendant leur vie productive et la viande produite par les autres animaux, y compris les génisses laitières en croissance[71]. Nous avons ensuite calculé les coefficients globaux des efficiences animales du « système » supposé unique d'élevage de bovins lait-viande en adaptant la méthode dite TIER2 développée par le GIEC pour calculer les émissions de méthane des ruminants à partir de leurs besoins énergétiques (IPCC, 2006) (*cf.* Encadré 3-1 p. 60-61). Moyennant quelques informations additionnelles, il est en effet possible d'utiliser cette méthode pour déterminer les consommations alimentaires, d'une part, des femelles laitières, et, d'autre part, des différentes catégories d'animaux produisant de la viande.

Composition des rations alimentaires des animaux

Les coefficients d'efficience globaux et les volumes des productions animales en « 2010 » permettent de calculer les quantités totales d'aliments (en tonnes de matière sèche) consommées par chaque secteur d'élevage dans chaque région du monde[72]. La répartition de ces quantités totales d'aliments entre les différentes catégories d'aliments du bétail distinguées dans le modèle – matières premières concentrées (blé, maïs, tourteaux, etc.) et fourrages (décomposés dans cette étude en cinq catégories ; *cf.* Sous-Section 3.2.2) – permet ensuite de calculer les coefficients des efficiences animales de chaque matière première pour chaque production animale[73].

---

[70] Données de l'IFIP pour les porcs (IFIP, 2018), de l'ITAVI pour les volailles de chair et les œufs (ITAVI, 2017a et 2017b).

[71] La viande des vaches laitière de réforme est donc considérée comme étant « fabriquée » par celles-ci quand elles sont au stade de génisses. Les besoins en aliments nécessaires pour « fabriquer » la viande des vaches laitières de réforme sont donc pris en compte par les génisses, soit les femelles avant le premier vêlage ou avant abattage.

[72] Dit autrement, une forme simplifiée de l'équation (1), soit $A_{a2010} = b_{a2010} \cdot Q_{a2010}$, est utilisée pour déterminer la quantité totale d'aliments A_{a2010} du secteur d'élevage *a* une fois que les deux termes de droite de cette équation sont connus.

[73] Dit autrement, les équations (1) sont alors résolues en déterminant les paramètres b_{ia2010}, les deux autres termes de cette équation étant connus.

Les monogastriques ne consomment que des matières premières concentrées, sous formes d'aliments directs et d'aliments composés[74]. Les ruminants consomment essentiellement des fourrages et, en complément (et de façon variable en fonction de l'animal, de son âge, de l'objectif de production, etc.), des matières premières concentrées. La répartition de la quantité totale de matière sèche entre les différents ingrédients composant les rations alimentaires pour chaque production animale dans chaque région est déterminée en utilisant un modèle mondial de formulation des rations alimentaires des animaux (détaillé dans le Chapitre 6 du Rapport technique de l'étude). De façon générale, ce modèle repose sur l'hypothèse que le choix des matières premières concentrées, qu'elles soient consommées sous une forme directe ou sous la forme d'aliments composés, répond aux prix relatifs de ces matières, en quelque sorte en étendant aux aliments consommés sous forme directe la logique qui prévaut dans l'industrie des aliments du bétail. Dans chaque région du monde, la composition de la ration de chaque production animale en matières premières concentrées est donc déterminée de façon à minimiser le coût de production de la ration sous un jeu de contraintes tenant compte (i) des disponibilités des différentes matières premières, (ii) d'impératifs nutritionnels propres à chaque espèce animale décomposée en plusieurs catégories d'animaux, (iii) de taux maximaux ou minimaux d'incorporation de certaines matières premières pour des raisons réglementaires, techniques ou encore d'appétence et (iv) d'équilibres des rations.

Dans le cas des monogastriques, les coefficients des efficiences animales des différentes matières premières sont directement issus du modèle de formulation. Ce dernier n'inclut pas les fourrages. Dans le cas des gros ruminants, bovins lait et bovins viande, les consommations des différents ingrédients des rations (matières premières concentrées et fourrages) ont alors été déterminées de la façon suivante. Dans un premier temps, les utilisations totales de chaque matière première concentrée ont été calculées en déduisant des quantités totales disponibles en « 2010 » celles qui sont consommées par les monogastriques, les petits ruminants, le secteur aquacole et les autres types d'animaux[75]. Dans un deuxième temps, ces utilisations sont réparties, dans chaque région, entre le lait et la viande bovine sur la base des statistiques disponibles relatives aux productions et utilisations d'aliments composés en utilisant le modèle mondial de formulation. Dans un troisième temps, les quantités totales des cinq catégories de fourrages sont obtenues en soustrayant des quantités totales ingérées (en équivalent matière sèche) les quantités apportées par les matières premières concentrées, elles aussi exprimées en tonnes de matières sèches. La répartition entre les cinq catégories de fourrages retenue dans le modèle GlobAgri-AE2050 utilise les coefficients de répartition entre types de fourrages de Monfreda *et al.* (2008) et de Herrero *et al.* (2013).

3.3.2. Projections des coefficients des efficiences animales en 2050 et comparaison avec les coefficients de « 2010 »

Tous comme les rendements végétaux, les variations des coefficients b_{iat} des efficiences animales entre « 2010 » et 2050 peuvent résulter des effets du changement climatique et des évolutions techniques. Le changement climatique peut, par exemple, réduire la digestibilité d'une ressource alimentaire (*cf.* Sous-Section 2.3.2) et, par suite, requérir de plus grandes quantités de celle-ci pour un même niveau de production du produit animal, toutes choses égales par ailleurs. Les évolutions techniques recouvrent ici aussi les deux aspects du progrès technique au sens strict et du recours aux intrants, plus spécifiquement de recours différenciés aux différents ingrédients des rations alimentaires qui peuvent conduire, par exemple parce que l'objectif de production est plus élevé, à accroître le coefficient global d'efficience, à augmenter le coefficient spécifique associé à tel ingrédient et à diminuer le coefficient associé à tel autre par le jeu des substitutions entre ingrédients plus ou moins digestibles. Quant au progrès technique *per se*, il peut résulter, par exemple, des progrès de la sélection au sens où celle-ci permettrait d'obtenir le même niveau de produit animal avec des quantités moindres d'aliments ou de certains aliments : le progrès technique appliqué à telle matière première se traduit donc par une baisse du coefficient d'efficience animale associé à celle-ci entre « 2010 » et 2050.

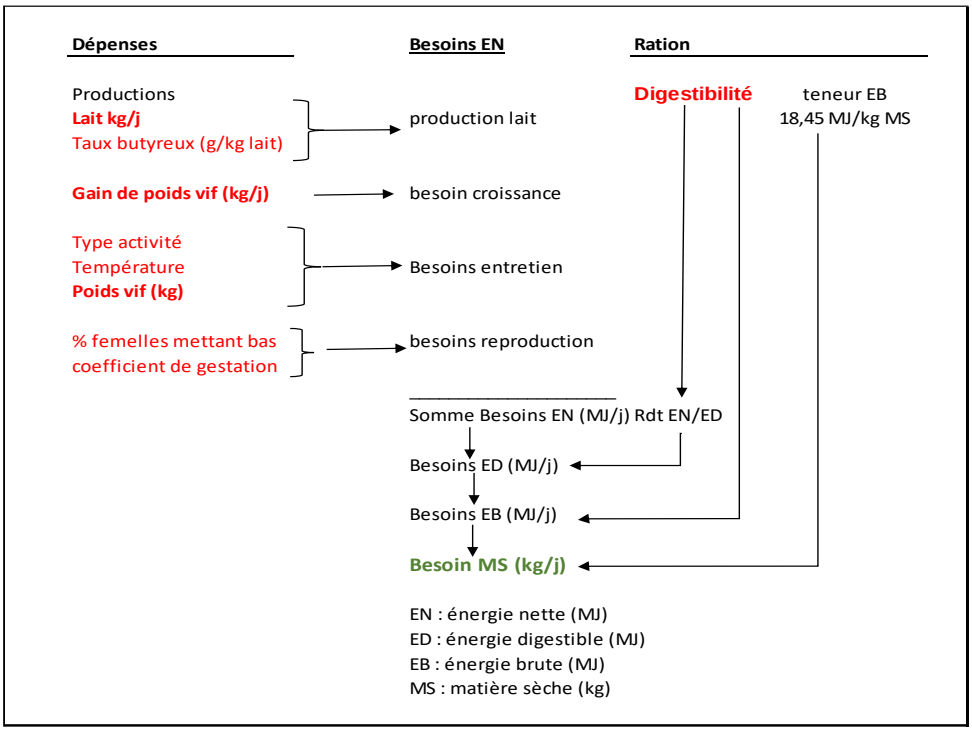
[74] Les matières premières concentrées sont consommées, soit sous une forme directe quand elles sont produites sur place, soit sous la forme d'aliments composés achetés par les éleveurs (mélanges alimentaires sous forme de granulés, de poudres, de miettes, etc., produits à partir de matières premières et de différents additifs, élaborés en fonction des besoins spécifiques de l'animal en tenant compte de l'espèce, de l'âge, des objectifs de production, etc.). Les aliments composés font l'objet d'un suivi statistique détaillé dans de nombreux pays avec des décompositions au minimum par grandes catégories d'animaux (porcs, volailles de chair, volailles de ponte, vaches laitières, autres bovins, etc.).

[75] Les autres types d'animaux incluent notamment les équins et les animaux de compagnie. Les utilisations de ces « autres secteurs » sont estimées à dire d'experts à environ 1% des disponibilités totales d'aliments pour animaux.

Encadré 3-1. Application de la méthode TIER2 (IPCC, 2006) pour calculer les consommations alimentaires des bovins

Il est très difficile d'estimer les consommations alimentaires des ruminants car ils prélèvent eux-mêmes l'essentiel de leurs aliments. Dans le cadre de cette étude, le choix a été fait d'estimer les consommations de matière sèche à l'aide de la méthodologie TIER 2 développée par le GIEC (IPCC, 2006) pour calculer les émissions de méthane des ruminants à partir de leurs besoins énergétiques. Cette méthodologie estime les consommations à partir des différents types de dépenses énergétiques et donc des besoins en énergie des différentes catégories d'animaux en fonction de leurs principales caractéristiques. À partir de ces besoins énergétiques totaux (pour l'entretien, la lactation, la croissance, la gestation) et de la digestibilité de la ration, il est possible d'estimer les consommations de matière sèche de chaque catégorie animale suivant une méthodologie résumée dans la Figure ci-dessous.

Figure E3-1-1. Schéma de la méthode de calcul TIER2 des consommations alimentaires d'une catégorie animale à partir de ses dépenses (IPCC, 2006)



Huit catégories d'animaux sont considérées pour estimer au mieux les consommations, soit (i) les vaches laitières, (ii) les vaches allaitantes, les femelles n'ayant pas vêlé (iii) de 0-1 an, (iv) de 1-2 ans et (v) de plus de 2 ans, et les mâles (vi) de 0-1 an, (vii) de 1-2 ans et (viii) de plus de 2 ans. Les populations de buffles ont été considérées séparément, mais avec la même logique de calcul que pour les bovins (qui donc incluent tous les gros ruminants à l'exception des buffles).

Estimation des effectifs de chaque catégorie d'animaux

La méthodologie TIER2 peut être directement appliquée dans les régions européennes dans la mesure où les informations relatives aux effectifs des différentes catégories d'animaux sont disponibles à partir des données d'Eurostat. Dans les autres régions du monde, ces effectifs ne sont pas disponibles. Nous avons donc mobilisé les données statistiques de la FAO pour les productions et les effectifs globaux (nombres de vaches laitières, nombres totaux de bovins, nombres d'animaux abattus) et les données du *Global Livestock Environmental Assessment Model* (GLEAM), élaboré également par la FAO[76], pour les paramètres zootechniques, ceci afin de reconstituer une démographie du cheptel bovin. Un modèle démographique est utilisé pour répartir les effectifs dans chaque classe en faisant l'hypothèse que le nombre de veaux produits doit compenser le nombre d'animaux abattus et la mortalité. Le nombre total de vaches nécessaire est estimé à partir des données de fertilité, ce qui permet de connaître le nombre de vaches allaitantes en retranchant le nombre de vaches laitières qui lui est connu. Les autres animaux sont répartis dans les différentes classes d'âge en tenant compte tenu des âges d'abattage et des âges au premier vêlage. Ce modèle a été évalué pour les régions européennes, régions pour lesquelles il est possible de mesurer les écarts entre les prédictions des effectifs par le modèle et les données d'Eurostat : la précision du modèle a été jugée satisfaisante pour les besoins de l'étude.

[76] http://www.fao.org/gleam/fr/

Quantification des variables les plus sensibles pour le calcul des consommations

L'analyse de sensibilité de ce modèle montre que les quatre variables les plus sensibles (*i.e.* qui ont les effets les plus importants sur les résultats) sont la production de lait, le poids vif des animaux, le gain de poids vif et la digestibilité de la ration annuelle qu'il faut renseigner pour chaque catégorie animale. Si les productions de lait sont assez bien renseignées à partir des données statistiques, celles relatives au poids vif et au gain de poids sont mal connues. Ces variables ont été estimées en mobilisant les données techniques du modèle *GLEAM* (poids des animaux adultes) et un modèle de Gompertz pour simuler les gains de poids vifs dans les autres catégories. Une optimisation permet d'ajuster ces valeurs pour que les productions de viande, corrigées des pertes, correspondent aux données d'abattage issues des statistiques.

Calcul de la digestibilité de la ration

Les besoins totaux d'énergie nette sont ensuite successivement traduits en énergie digestible, puis en énergie brute, enfin en équivalent matière sèche *via* la digestibilité de la ration. Le calcul de la digestibilité de la ration se fait à partir de la moyenne pondérée des différents aliments de la ration pour les secteurs lait et viande. Pour les prairies permanentes ou temporaires, il n'est pas facile d'attribuer une valeur de digestibilité *a priori* à ces aliments, alors qu'ils sont majoritaires dans les rations. Compte tenu du fait que la littérature scientifique montre une bonne relation entre la température pendant la croissance et la digestibilité (Deinum *et al.*, 1968 ; Barrett *et al.*, 2005), une équation a été utilisée pour affecter à chaque région une valeur de digestibilité en fonction de la température moyenne de la région pendant les mois supposés de croissance (température moyenne journalière comprise entre 7 et 28 °C)[77]. Les valeurs de références ont été établies pour 13° C de température moyenne, et la digestibilité de référence des fourrages est diminuée (respectivement augmentée) de 0,006 point par degré Celsius en plus (en moins).

Il n'est malheureusement pas possible d'utiliser une méthodologie similaire à celle qui a pu être mise en œuvre pour les rendements végétaux afin de projeter à 2050 les coefficients des efficiences animales, pour deux raisons principales. En premier lieu, parce que nous ne disposons pas de séries chronologiques retraçant les évolutions historiques de ces coefficients ; nous ne disposons que d'une estimation ponctuelle de ces coefficients pour la seule année « 2010 ». En second lieu, et en lien avec ce qui précède, parce que nous ne disposons pas de résumés statistiques permettant de quantifier les effets propres du changement climatique sur les efficiences animales, plus généralement sur les performances zootechniques. Notons d'emblée que nous n'avons pas pris en compte d'effet spécifique (propre) du changement climatique à 2050 sur ces coefficients, à l'exception de l'impact de la variation des températures sur la digestibilité des prairies (permanentes et temporaires) dans le cas des ruminants (*cf. infra*). Nous présentons ci-après la méthodologie adoptée pour projeter à 2050 les coefficients des efficiences animales, en commençant par les monogastriques, en poursuivant par les bovins[78].

Pour projeter à 2050 les coefficients des efficiences animales dans les secteurs des monogastriques (porcs, volailles de chair, œufs), nous partons de l'information historique disponible relative aux productions (*Q*) et aux effectifs (*E*) en construisant le ratio des premières rapportées aux seconds. Pour un type de monogastriques donné, l'évolution du ratio *Q/E*[79] entre « 2010 » et 2050 peut alors s'écrire, pour une production animale donnée (soit les porcs, les volailles de chair et les poules pondeuses) :

$$\frac{Q_{2050}}{E_{2050}} = \frac{Q_{2010}}{E_{2010}} . (1 + y) \quad (3)$$

Si le taux d'évolution *y* est positif, la production croît plus vite que les effectifs (il faut plus d'animaux pour produire la même quantité de produit animal final) et le progrès technique est positif. Symétriquement, si le taux *y* est négatif, la production croît moins vite que les effectifs et le progrès technique est négatif.

Nous supposons ensuite que tous les coefficients des efficiences animales, pour une catégorie d'animaux donnée, évoluent au même rythme ; les taux d'évolution des différents b_{iat} sont donc identiques pour tous les ingrédients *i* pour un même produit animal *a*. Il est alors possible de montrer que le taux d'évolution du coefficient d'efficience globale entre « 2010 » et

[77] A partir des données climatiques disponibles sur le site de la Banque mondiale :
http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=downscaled_data_download&menu=historical

[78] Les coefficients d'efficience des secteurs des petits ruminants et de l'aquaculture sont supposés constants à leurs niveaux respectifs de « 2010 ».

[79] Plus précisément, dans le cas des porcs et des volailles de chair (poulets, dindes, canards, oies et pintades), le ratio utilisé est celui de la production indigène brute aux effectifs d'animaux présents, toutes classes d'âge confondues. Dans le cas des œufs, le ratio utilisé est celui de la production d'œufs de poules sur les effectifs de poules pondeuses.

2050 (et par suite, les taux d'évolution des différents coefficients spécifiques à chaque matière première) est égal au taux d'évolution du ratio Q/E entre ces deux dates si et seulement si le ratio de la quantité totale des aliments *A* sur les effectifs est constant[80]. En effet, on a alors :

$$\frac{A_{2050}}{Q_{2050}} = b_{2050} = b_{2010}.(1-y) = \frac{A_{2010}}{Q_{2010}}.(1-y) \quad (4)$$

ou, de façon équivalente, en utilisant l'équation (1),

$$\frac{A_{2050}}{Q_{2050}}.\frac{Q_{2050}}{E_{2050}} = \left[\frac{A_{2010}}{Q_{2010}}.(1-y)\right].\left[\frac{Q_{2010}}{E_{2010}}.(1+y)\right] \quad (5)$$

ou encore, toujours de façon équivalente[81],

$$\frac{A_{2050}}{E_{2050}} = \frac{A_{2010}}{E_{2010}} \quad (6)$$

De façon générale, les évolutions (améliorations) des coefficients globaux des efficiences animales dans les trois secteurs des monogastriques distingués dans le modèle GlobAgri-AE2050 seraient donc (essentiellement) liées à un accroissement de la production (poids de carcasse, nombre d'œufs) par animal sous le jeu d'un accroissement du poids d'abattage (porcs, volailles), de la productivité numérique des femelles, etc., ceci dans un contexte de constance des apports alimentaires par tête.

Concrètement, les taux annuels d'évolution *y* des équations (3) ont été estimés sur la base de régressions logarithmiques reliant, pour chacune des trois productions de monogastriques dans chaque région, le ratio Q/E au logarithme du temps sur les deux décennies passées 1995-2015, et en retenant le coefficient ainsi estimé dès lors qu'il est statistiquement significatif à un seuil de 95 %. Considérant que les marges futures de progrès technique étaient modestes dans de nombreuses régions, les experts ont préféré utiliser un modèle logarithmique plutôt qu'un modèle linéaire.

Les coefficients globaux des efficiences animales ainsi projetés en 2050 sont présentés sur la Figure 3-5 dans les différentes régions du monde pour, respectivement, les porcs (a), les volailles de chair (b) et les œufs (c)[82]. Les coefficients en 2050 sont représentés sur l'axe des ordonnées ; ils sont comparés à leurs équivalents établis pour l'année « 2010 » reportés sur l'axe des abscisses. Dans le cas de la viande porcine, les points se situent tous sous la première bissectrice ou, au « pire », sur cette dernière, ce qui traduit une amélioration, au « pire » une constance, des efficiences animales entre « 2010 » et 2050. Les coefficients de l'année « 2010 » dans les différentes régions européennes sont inférieurs à ceux des autres régions du monde, traduisant une meilleure efficacité de la production porcine européenne à cette date. Cet avantage demeure en 2050 même s'il a tendance à s'amoindrir du fait d'évolutions fortes à la baisse des coefficients dans des régions comme la Chine et l'ex-URSS. Dans le cas de la viande de volailles, les coefficients globaux ont également tendance à diminuer, au « pire » à se maintenir, entre « 2010 » et 2050, à l'exception notable de la France, pays dans lequel l'efficience globale diminuerait légèrement (faible croissance du coefficient). Les performances zootechniques des élevages européens n'apparaissent plus systématiquement supérieures à celles de leurs homologues des régions non européennes, en « 2010 » comme en 2050, avec en outre une variabilité entre régions européennes plus forte dans le cas des volailles de chair que dans celui du porc. Dans le secteur des œufs, les coefficients globaux sont, à une date donnée, « 2010 » ou 2050, plus faibles que leurs homologues établis pour les viandes porcine et avicole. Les coefficients des œufs ont aussi tendance à diminuer, au « pire » à se maintenir, entre « 2010 » et 2050, traduisant ainsi une amélioration des efficiences, au « pire » leur constance. Les coefficients de « 2010 » relatifs aux régions européennes montrent que celles-ci formaient à cette date deux groupes distincts, le premier groupe (France, Royaume-Uni, Europe du Sud, Europe de l'Est, Europe centrale) étant plus efficace que le second (Allemagne, Pologne, Reste de l'Europe). Cette hiérarchie intra-européenne n'est pas conservée en 2050 : certes, l'Europe de l'Est reste la région la plus efficace et le Reste de l'Europe la région la moins efficace ; mais la Pologne est en 2050 aussi efficace que le Royaume-Uni et plus efficace que la France.

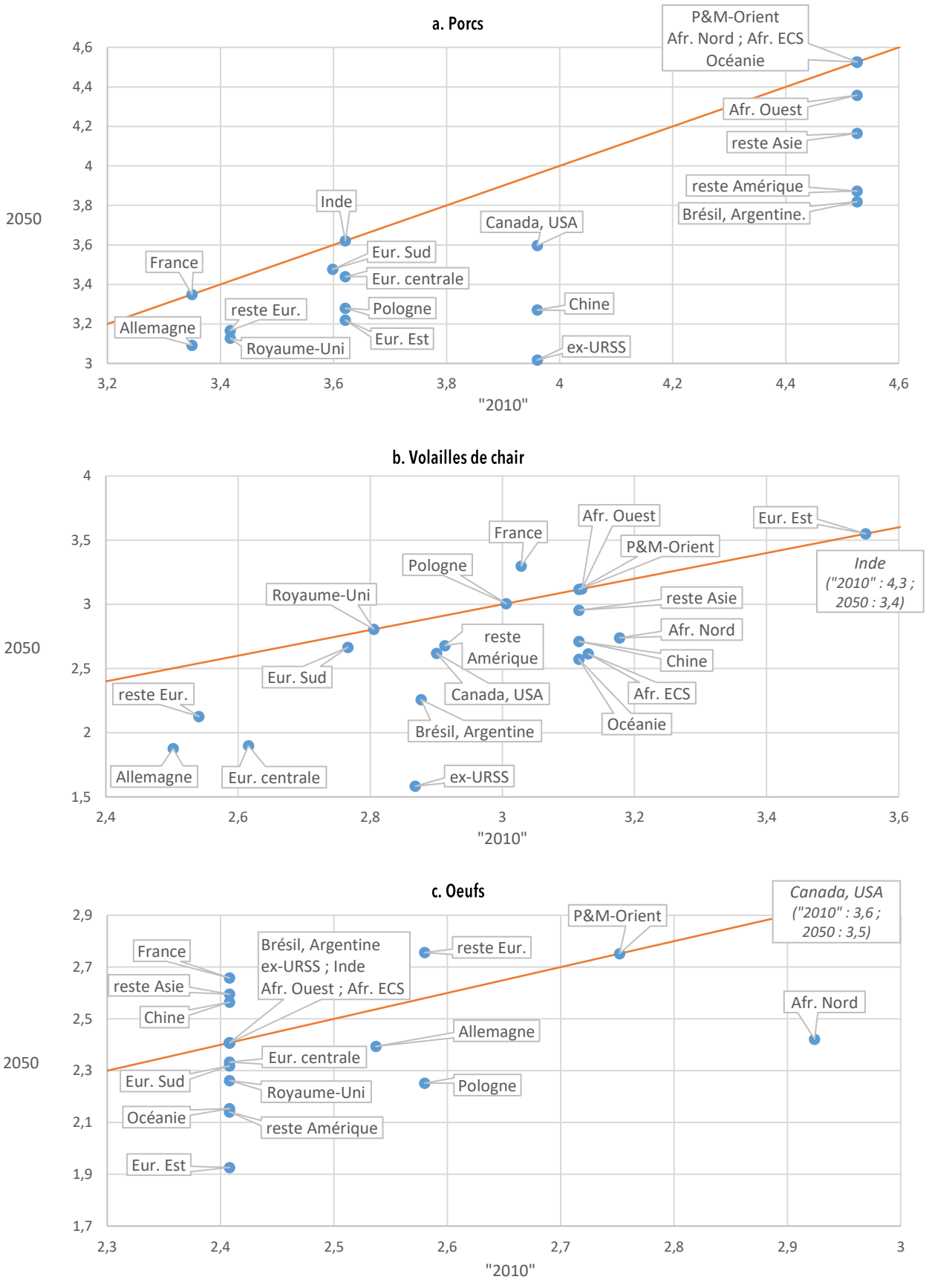
[80] La constance du ratio de la quantité totale des aliments *A* sur les effectifs est vérifiée « strictement » dans le cas de la production porcine en France sur les 25 dernières années, que les effectifs soient mesurés en termes de nombre de porcs présents ou de nombre de porcs produits.

[81] En supposant que la variation *y* est suffisamment petite pour assimiler $(1-y).(1+y)$ à 1.

[82] Les hypothèses retenues pour projeter les coefficients des efficiences animales en 2050 font que la répartition de la quantité totale d'aliments entre les différents ingrédients des rations est maintenue inchangée entre « 2010 » et 2050. Il y a néanmoins une exception à cette règle générale, pour la part des aliments dits occasionnels dans le contexte où le modèle mondial de formulation conduit alors à des impossibilités en 2050 dans quatre régions (la Chine, l'ensemble Brésil-Argentine, le reste de l'Amérique et l'Océanie) du fait de disponibilités alors insuffisantes. Le Chapitre 6 du Rapport technique explique comment ce problème d'infaisabilité a été résolu en pratique. Rappelons que les fourrages occasionnels ne requièrent pas de surfaces spécifiquement dédiées.

Figure 3-5. Coefficients globaux des efficiences animales en « 2010 » et en 2050 dans les différentes régions du monde pour les porcs (a), les volailles de chair (b) et les œufs (c)

La droite en orange est la première bissectrice.



Pour projeter à 2050 les coefficients des efficiences animales dans les secteurs des bovins lait et des bovins viande, nous avons utilisé la même méthodologie que celle mise en œuvre pour calibrer ces coefficients en « 2010 ». Il a donc fallu estimer à l'horizon 2050 les niveaux des productions animales, les productivités des animaux (ratios des productions aux effectifs), les effectifs et la digestibilité des rations des animaux.

Dans un premier temps, les niveaux des productions de viande et de lait en 2050 ont été déterminés à partir d'une simulation du modèle GlobAgri-AE2050[83]. Dans un deuxième temps, les productivités des animaux des deux secteurs, définies comme les ratios des productions aux effectifs, ont été projetées à cet horizon temporel en prolongeant les tendances passées des deux décennies 1995-2015. Dans le secteur des bovins viande, les évolutions historiques ne témoignent pas d'une progression à la hausse régulière et significative : les productivités sont restées faibles ; elles sont en outre très variables d'une région à l'autre. Par contraste, dans le secteur des bovins lait, le ratio de la production aux effectifs a cru de façon importante et régulière dans une majorité de régions ; de forts écarts entre régions demeurent néanmoins. Les modèles statistiques *in fine* retenus pour projeter les ratios des productions aux effectifs sont un modèle logarithmique dans le cas des bovins viande (la variable explicative est le logarithme népérien de l'année) et un modèle linéaire dans le cas des bovins lait (la variable explicative est l'année). Connaissant les productions et les productivités, il est alors possible, dans un troisième temps, de déterminer les effectifs de bovins viande et de femelles laitières en 2050 sous l'hypothèse additionnelle que la structure des cheptels (parts respectives des différentes catégories de bovins en fonction du nombre de femelles reproductrices) est inchangée entre « 2010 » et 2050.

Dans le secteur laitier, la forte augmentation de la productivité des vaches laitière a été considérée comme difficile à réaliser sans une modification de la composition de la qualité des rations alimentaires, la sélection génétique seule ne pouvant pas tout expliquer. La forte corrélation qui existe en « 2010 » entre la productivité et la part des fourrages de « qualité » (fourrages cultivés et prairies temporaires) dans l'ensemble des fourrages des rations a été utilisée pour moduler la composition en fourrages des rations alimentaires des vaches laitières en 2050 en tenant compte des évolutions des productivités de ces animaux entre « 2010 » et 2050. De façon générale, la modulation a conduit à augmenter la part des fourrages de qualité dans l'ensemble des fourrages et donc, à diminuer la part des fourrages de moindre qualité (herbe des prairies permanentes, fourrages occasionnels et résidus des cultures). Ainsi, la part des fourrages de qualité dans l'ensemble des fourrages passerait de 35-57 % en « 2010 » à 73-94 % en 2050 dans les différentes régions européennes (la croissance de cette part serait plus faible dans la région de l'Europe de l'Est). Au Canada-USA, la part des fourrages de qualité atteindrait 100 % à l'horizon 2050. Dans la plupart des autres régions du monde, cette part resterait inférieure à 40 % en 2050, pourcentage qui représente néanmoins une très forte progression relativement à « 2010 » : triplement au Brésil-Argentine, en Chine et au Proche et Moyen-Orient, doublement au moins en Inde et en Afrique du Nord. Dans le secteur des bovins viande, les faibles variations des productivités des animaux entre « 2010 » et 2050 nous ont conduit à accepter l'hypothèse d'une constance de la composition des rations dans les différents types de fourrages.

Reste enfin à déterminer la digestibilité des fourrages en 2050 qui évoluera à cet horizon sous l'impact du changement climatique, notamment des températures. Il est en effet possible, tout en tenant compte de la nouvelle composition de la ration des bovins lait en 2050, de recalculer la digestibilité moyenne des rations des ruminants en fonction de l'impact de la variation des températures entre « 2010 » et 2050 sur celle-ci. Pour cela, a été utilisée la même relation que celle mobiliser pour estimer les différences de digestibilité des fourrages dans les différentes régions en « 2010 ». Chaque région se voit donc affecter une nouvelle valeur de digestibilité des fourrages en fonction de la température moyenne de la zone en 2050.

Forts de ces calculs préalables sur les productions, les productivités des animaux, les effectifs et la digestibilité des rations, nous sommes alors en capacité d'estimer les coefficients des efficiences animales des bovins lait et des bovins viande en 2050 en recourant à la même méthodologie TIER2 que celle utilisée pour calibrer ces mêmes coefficients en « 2010 » (*cf.* Sous-Section 3.2.1). Les coefficients sont présentés sur la Figure 3-6. Les coefficients de la viande bovine de l'année « 2010 » (axe des abscisses) témoignent d'une forte variabilité entre régions, ceux de 8 régions européens étant parmi les plus faibles au monde (cartouche de gauche de la Figure 3-6a) ; il existe toutefois une variabilité significative au sein de la zone Europe, du simple au double selon les régions (cartouche de droite de la Figure 3-6b). Les coefficients des efficiences des bovins-lait diminuent dans toutes les régions du monde entre « 2010 » et 2050 du fait de la forte augmentation de la productivité exprimée en kg lait/vache/an (les points se situent au-dessous de la première bissectrice). La plus grande efficience des

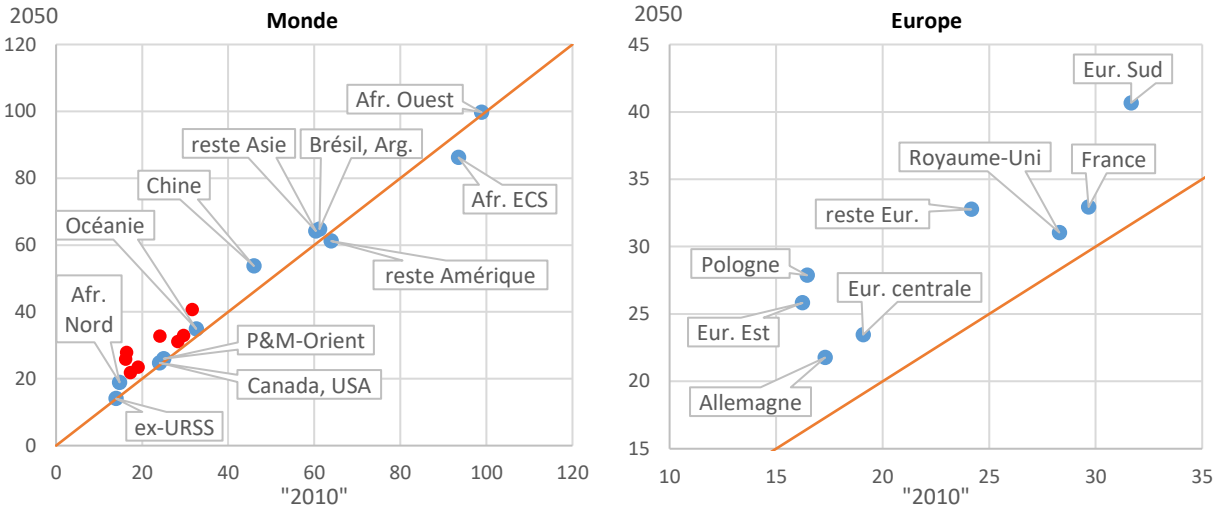
[83] Cette simulation préliminaire a été réalisée en utilisant les coefficients des efficiences de la viande et du lait de l'année de référence « 2010 » dans l'hypothèse d'évolutions tendancielles des régimes alimentaires. Réaliser cette même simulation dans l'hypothèse de régimes sains ne change pas les résultats relatifs aux estimations des coefficients des efficiences animales en 2050 dans la mesure où ces régimes sains reposent sur des évolutions identiques, en pourcents, des consommations de viande bovine et de lait relativement à « 2010 ».

régions européennes en « 2010 » est maintenue en 2050, même si les écarts avec les autres régions du monde diminuent entre les deux dates. Les coefficients des efficiences animales de la viande bovine ont tendance à croître légèrement entre « 2010 » et 2050 (les points se situent au-dessus de la première bissectrice), ceci du fait d'un nombre plus faible de vaches laitières nécessaire pour satisfaire les productions de lait compensé par une augmentation du nombre de vaches allaitantes pour produire la viande. De plus, les digestibilités des rations pour la viande ont tendance à diminuer sous l'effet du changement climatique.

Figure 3-6. Coefficients globaux des efficiences animales en « 2010 » et en 2050 dans les deux secteurs des bovins viande (a) et des bovins lait (b)

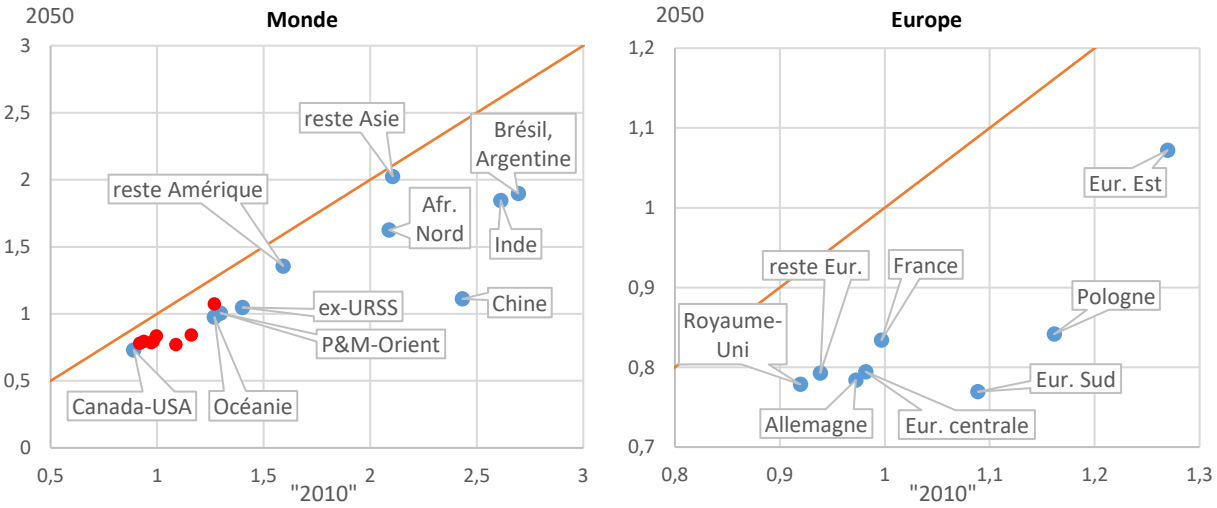
La droite en orange représente la première bissectrice. Les régions européennes détaillées sur les cartouches de droite sont représentées par des points rouges sur les cartouches de gauche.

a. Viande bovine



NB : Inde (non représentée) : coefficient « 2010 » = 281 ; coefficient 2050 = 346.

b. Lait



NB : Afrique ECS (non représentée) : coefficient « 2010 » = 4,4 ; coefficient 2050 = 4,4 ;
Afrique de l'Ouest (non représentée) : coefficient « 2010 » = 8,5 ; coefficient 2050 = 7,6.

3.4. Projections des intensités culturales en 2050

L'intensité culturale annuelle (ICA) d'une région peut être définie comme le rapport de la surface récoltée sur la surface cultivée (Beets, 1982). Un ratio inférieur à l'unité signifie que la surface récoltée est inférieure à la surface cultivée du fait, par exemple, de la non récolte de certaines cultures pour des raisons économiques (trop faible rentabilité) ou agro-climatiques (impossibilité de rentrer dans les champs et de récolter, production faible à nulle du fait des adventices, de la verse, du gel, de la grêle, de la prédation, d'une mauvaise levée ou d'un dessèchement brutal avant maturation en l'absence d'irrigation) ; un ratio égal à l'unité signifie que la surface récoltée est égale à la surface cultivée ; et un ratio supérieur à l'unité signifie que la surface récoltée d'une année est supérieure à la surface cultivée du fait, par exemple, de la mise en œuvre de cultures multiples, doubles, voire triples (FAO, 2018). Dans une région donnée, il est donc possible d'augmenter la production annuelle des cultures non seulement en augmentant les rendements et les surfaces cultivées, mais également en augmentant l'ICA. Selon Wu et al. (2015), cette troisième stratégie est une voie possible d'augmentation de la production agricole végétale sans accroître les rendements et les effets négatifs potentiels sur l'environnement quand les gains de rendements sont notamment le fruit d'un usage augmenté des intrants chimiques et sans accroître les surfaces cultivées et les effets négatifs potentiels sur l'environnement liés à la conversion de surfaces naturelles, de forêts et de prairies permanentes en cultures. La double culture peut à l'opposé être source d'effets contraires sur l'environnement, par exemple quand elle requiert des recours augmentés aux engrais ou à l'eau.

Sur la période historique 1961-2007, Ray et Foley (2013) ont montré que l'augmentation moyenne des ICA de par le monde avait contribué à hauteur de 9 % à l'accroissement de la production des cultures. Alexandratos et Bruinsma (2012) considèrent qu'à l'horizon 2030/2050, ce facteur continuera à contribuer à la même hauteur à l'augmentation de la production des cultures, une hauteur équivalente à celle de l'expansion des surfaces cultivées. Les projections plus récentes de la FAO (FAO, 2018 ; page 135) considèrent que les augmentations des ICA contribueront davantage (14 %) à l'accroissement de la production des cultures à l'horizon 2050 dans leur scénario B*usiness as Usual* (*versus* 62 % pour les gains de rendements et 24 % pour l'expansion des terres cultivées). La contribution relative des augmentations des ICA serait bien plus importante (49 %) dans leur scénario *Towards Sustainability*, où les augmentations des productions agricoles seraient moindres ; dans ce deuxième scénario, les gains de rendements et l'expansion des surfaces cultivées compteraient respectivement pour 36 et 15 %. Dans ces deux scénarios, les poids respectifs des trois déterminants à l'horizon 2050 varient en outre sensiblement selon les différentes régions du monde (FAO, 2018, Figure 4.16 page 136).

Les conditions géographiques, climatiques et économiques jouent directement sur les niveaux des ICA des différentes régions du monde, de même que les investissements visant à s'affranchir des contraintes imposées par ces conditions (en particulier les investissements visant à faire face à des faibles disponibilités en eau[84]). De ce fait, et aussi parce que les informations statistiques relatives aux coefficients actuels soufrent de défaillances (données manquantes, écarts entre régions difficiles à expliquer), il est très délicat d'établir des projections réellement argumentées de ces intensités à l'horizon 2050. De façon cohérente avec les choix adoptés pour projeter les rendements des productions végétales à l'horizon 2050 et les évolutions des parts relatives des cultures irriguées *versus* pluviales à ce même horizon, nous avons retenu dans ce travail les évolutions annuelles des ICA des différentes régions du monde du scénario *Business as Usual* de la FAO (2018), évolutions annuelles que nous avons appliquées sur la période « 2010 » - 2050 à chacune des régions du monde du modèle GlobAgri-AE2050. Les intensités en « 2010 » et 2050 sont présentées dans le Tableau 3-5.

[84] Au niveau mondial, la FAO (2018) estime que l'ICA des cultures irriguées était égal à 1,35 en 2012, *versus* seulement 0,74 pour les cultures pluviales.

Tableau 3-5. Intensités culturales annuelles (ICA) de l'année de base « 2010 » et à l'horizon 2050

	ICA "2010"	Évolution entre "2010" et 2050	ICA 2050
France	0,83	+14%	0,94
Allemagne	0,97	+14%	1,11
Royaume-Uni	0,88	+14%	1,00
Pologne	0,98	+14%	1,12
Europe du Sud	0,77	+14%	0,88
Europe de l'Est	0,90	+14%	1,02
Europe centrale	0,83	+14%	0,94
Reste de l'Europe	0,81	+14%	0,92
Canada, USA	0,77	+14%	0,88
Brésil, Argentine	0,87	+2%	0,88
Reste de l'Amérique	0,85	+2%	0,87
Ex-URSS	0,65	+8%	0,71
Chine	1,43	+18%	1,69
Inde	1,31	+4%	1,36
Reste de l'Asie	1,02	+3%	1,05
Proche & Moyen-Orient	0,75	-1%	0,74
Afrique du Nord	0,78	-1%	0,77
Afrique de l'Ouest	0,98	+3%	1,02
Afrique ECS	0,81	+3%	0,83
Océanie	0,62	+1%	0,63

Source : FAO (2018), scenario *Business as Usual*.

3.5. Projections en 2050 des surfaces cultivables : effets du changement climatique et évolution de l'artificialisation des sols

Le modèle GlobAgri-AE2050 tient compte de la disponibilité en terres cultivables dans chaque région du monde. Cette variable agit comme une contrainte empêchant les surfaces cultivées de s'étendre au-delà des surfaces définies comme disponibles à cette fin. La manière dont sont définies les surfaces dites cultivables (en tenant compte ou non des terres qui présentent une moindre qualité agronomique, des terres qui possèdent des caractéristiques pédoclimatiques les rendant aptes à la culture mais sont actuellement boisées, etc.) a naturellement un impact direct sur le nombre d'hectares cultivables et sur les résultats des simulations dès lors qu'une ou plusieurs régions butent sur cette contrainte. Cette dernière s'appliquant aux terres pouvant être mises en cultures, y compris sous la forme de fourrages cultivés, elle ne concerne pas les prairies permanentes. Le modèle ne contraint donc pas l'expansion des surfaces en prairies permanentes à l'horizon 2050, qui peuvent donc s'étendre autant que de besoin « à l'infini » ; en pratique, les scénarios de référence aboutissent plutôt à une expansion du besoin en prairies permanentes à l'horizon 2050 (*cf.* Chapitre 4). Par ailleurs, le caractère cultivable des terres est apprécié ici indépendamment de leur usage actuel. Des surfaces actuellement occupées par des prairies permanentes peuvent donc potentiellement être retournées et mises en cultures si leurs caractéristiques agro-climatiques les rendent aptes à cet usage.

3.4.1. Méthodologie d'estimation des surfaces cultivables disponibles à l'horizon 2050

L'estimation des surfaces cultivables disponibles en « 2010 » et leur projection en 2050 repose sur les données issues de la procédure GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*) mise en œuvre par l'IIASA et la FAO (FAO/IIASA, 2011-2012)[85]. Cette procédure repose sur l'estimation du potentiel agronomique des terres et de son évolution sous l'effet de divers scénarios climatiques à l'horizon 2050, dont des scénarios assimilables aux trajectoires tendancielle et aggravée définies dans cette étude. Pour chaque unité de surface (la méthodologie comprend 2,2 millions de cellules à 5 minutes de latitude et de longitude) sans tenir compte de son usage, actuel ou futur, la démarche GAEZ consiste à calculer un indice théorique *SI* d'aptitude à la culture (SI pour *Suitability Index*) à partir du rendement agro-climatique potentiel évalué par un modèle de culture, rendement potentiel ajusté à la baisse, le cas échéant, sur la base de contraintes liées au climat et aux caractéristiques des sols.

Les terres ayant un *SI* inférieur à 40 (soit 40 % du rendement agro-climatique maximum) sont considérées comme étant impropres à la culture[86]. Par suite, dans cette étude comme dans celles ayant mobilisées des versions antérieures du modèle GlobAgri, les terres cultivables en 2050 sont les terres ayant, à cet horizon, un *SI* supérieur à 40. Ces terres sont potentiellement cultivables au sens où la note attribuée à telle ou telle unité de surface est définie indépendamment de son usage.

Une première approche, utilisée dans les scénarios de référence, consiste à supposer que l'ensemble des terres potentiellement cultivables en 2050 pourront être mises en cultures à cette date[87]. Naturellement, la mise en culture en 2050 de surfaces actuellement (*i.e.* en « 2010 »), non cultivées peut se heurter à des difficultés économiques, techniques, sociétales, etc. De plus, la conversion à la culture de telles surfaces peut être à l'origine d'impacts environnementaux non désirables, par exemple si elle nécessite une déforestation ou le retournement de prairies permanentes. Dans ce contexte, une définition plus restrictive des surfaces cultivables en 2050 a été retenue dans le cadre d'une analyse de sensibilité des scénarios de référence. Cette définition plus restrictive consiste à exclure des terres potentiellement cultivables en 2050 les terres occupées en « 2010 » par la forêt et à tenir compte de l'augmentation de l'artificialisation des sols entre « 2010 » et 2050. Les travaux de Fisher *et al.* (2010) fournissent une estimation de la part occupée par les forêts dans l'ensemble des surfaces cultivables en « 2010 ». Les travaux de Bren d'Amour *et al.* (2017) permettent, quant à eux, d'évaluer la part des surfaces potentiellement cultivables qui serait artificialisée en 2050 sous l'effet d'une urbanisation à la hausse. Cette analyse de sensibilité permet de confronter le besoin en terres cultivées en 2050 aux enjeux environnementaux que représente la préservation des écosystèmes forestiers actuels et des services écosystémiques associés, ainsi qu'à la dynamique de l'urbanisation.

La procédure GAEZ d'estimation des surfaces cultivables présente des limites que partagent de nombreux travaux quantitatifs cherchant à évaluer ces mêmes surfaces et leurs évolutions futures.

En premier lieu, seuls les effets du changement climatique sur le développement des cultures (*via* les évolutions de la température et de l'humidité du sol et de la concentration atmosphérique en CO_2) sont pris en compte. Les effets sur les propriétés des sols (concentration en carbone, texture, richesse en minéraux, etc.) ne sont pas intégrés sous l'hypothèse, forte, que ces propriétés peuvent être considérées comme inchangées. Plus généralement, les mécanismes, naturels et anthropiques, à l'origine de la dégradation des terres, difficiles à appréhender (quantifier) du fait de leur diversité, ne sont pas pris en compte. Certains auteurs soulignent d'ailleurs la nécessité d'améliorer les méthodologies d'estimation des surfaces cultivables afin d'intégrer les changements d'aptitude des sols à la culture liés à la dégradation de la qualité des sols (pertes de carbone et de nutriments, salinisation, pollutions, modification de la biodiversité du sol, etc.), mais aussi son amélioration possible sous l'effet de modes de gestion vertueux visant notamment à s'adapter au changement climatique. Des pistes méthodologiques sont identifiées dans la Section 5 du Rapport du volet d'analyse bibliographique de notre étude pour (mieux) prendre en compte la dégradation des terres dans de futurs travaux.

---

[85] http://www.fao.org/nr/gaez/programme/en/ Nous avons utilisé la version v3.0 de la classification GAEZ, la version v4.0 n'étant pas accessible à la date de réalisation de notre étude.

[86] Les « *Suitability Indexes* » (SI) font référence à un rendement atteignable allant de 0 à 100% du rendement agro-climatique maximum, en fonction précisément de la « *suitability* » du sol. Ils sont répartis dans six classes de qualité de sols : *not suitable* si l'index est compris entre 0 et 5%, *very marginally suitable* s'il est compris entre 5 et 20%, *marginally suitable* s'il est compris entre 20 et 40%, *moderately suitable* s'il est compris entre 40 et 60% ; *suitable* s'il est compris entre 60 et 80% et *very suitable* s'il est supérieur à 80% (FAO, 1996). Les surfaces ayant un index supérieur à 40 % sont souvent agrégées et présentées comme les terres potentiellement cultivables (Fischer, 2002, 2012).

[87] Dans certaines régions du monde (Europe du Sud, Afrique du Nord, Proche et Moyen-Orient, Chine), la surface cultivée en « 2010 » est plus étendue que la surface potentiellement cultivable en 2050. Dans ces 4 régions, la surface potentiellement cultivable en 2050 est alors définie comme la surface cultivée en « 2010 » diminuée de la variation en hectares de la superficie potentiellement cultivable entre « 2010 » et 2050. Sur cette base, les trois premières régions verraient leur surface cultivable diminuer entre « 2010 » et 2050 alors que celle-ci augmenterait en Chine.

En second lieu, il apparaît nécessaire d'améliorer la prise en compte de l'évolution de la disponibilité en eau bleue pour l'irrigation afin de quantifier les potentiels de terres irrigables, et la qualité de cette irrigation qui joue directement sur les rendements des cultures irriguées. La procédure GAEZ estime les potentiels des surfaces cultivables à la fois en système pluvial et en système irrigué. Concernant ces dernières, l'estimation repose sur l'hypothèse implicite que la disponibilité en eau d'irrigation n'est pas limitante, hypothèse forte susceptible de surestimer le potentiel de terres cultivables en système irrigué. Pour tenir compte de cette surestimation, le seul potentiel de surfaces cultivables en système pluvial a été considéré dans la présente étude pour définir les surfaces cultivables totales en 2050.

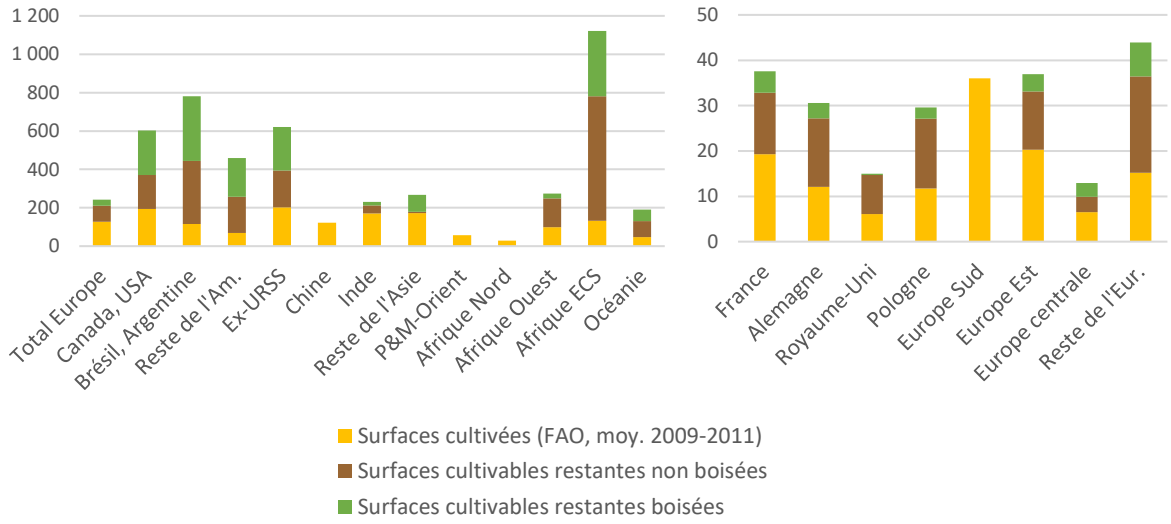
Enfin, la procédure GAEZ ne tient pas compte des pertes de surfaces agricoles côtières du fait de l'élévation du niveau des mers et des océans. Ces pertes pourraient être très importantes dans certains deltas où l'agriculture est fortement développée avec des rendements élevés, par exemple dans les deltas du Sud de l'Asie (Chao Phraya, Bengale), du Yang-Tsé et du Nil (Lacroix *et al.*, 2019).

Du fait de ces limites qui tendent toutes trois à surestimer les surfaces en terres potentiellement cultivables, les projections retenues dans la présente étude doivent être considérées comme les surfaces maximales disponibles pour les cultures.

3.4.2. Utilisation des surfaces cultivables en « 2010 »

En combinant les données de la FAO relatives aux surfaces cultivées en « 2010 »[88] et les données GAEZ décrites ci-dessus relatives aux surfaces cultivables à cette même date « 2010 », 31 % des surfaces potentiellement cultivables apparaissent cultivées en « 2010 » à l'échelle de l'ensemble de la planète, soit environ 1,5 milliard d'hectares (ha), laissant ainsi non mobilisés par les cultures 3,4 milliards ha de terres potentiellement cultivables ; sur ces 3,4 milliards ha, près de la moitié sont actuellement boisées. De leur côté, les prairies permanentes occupent 3,2 milliards ha[89]. Ce chiffre mondial d'environ 5 milliards de surfaces potentiellement cultivables masque des hétérogénéités régionales importantes illustrées par la Figure 3-7.

Figure 3-7. Surfaces cultivées et surfaces potentiellement cultivables non cultivées en « 2010 » dans les différentes régions du monde (millions ha)



Source : FAOStat, base de données GAEZ.

En « 2010 », moins d'un tiers des surfaces cultivables sont cultivées en **ex-URSS** (32 %), et encore moins en **Océanie** (25 %), en **Amérique** (20 % en moyenne) et en **Afrique subsaharienne** (14 % en moyenne). C'est également dans ces régions que sont localisés plus des trois quarts des superficies cultivables mondiales pour un total de 3,8 milliards ha. Par contraste, en **Afrique du Nord** et au **Proche & Moyen-Orient**, les surfaces cultivées en « 2010 » s'étendent au-delà des terres considérées

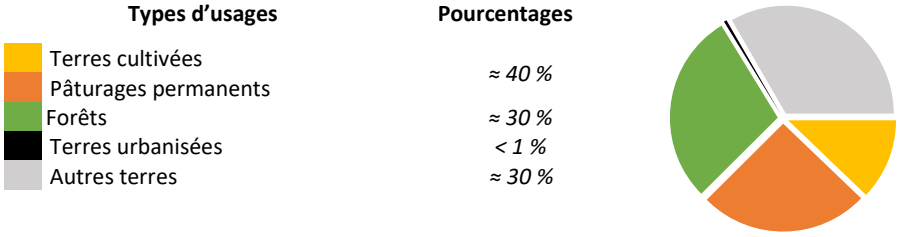
[88] Données « Arable land and Permanent crops » de la base de données FAOStat.

[89] Données « Land under permanent meadows and pastures » de la base FAOStat.

comme cultivables à cette date. La **Chine** exploite également la totalité de ses terres cultivables. L'**Inde** et le **reste de l'Asie** se situent dans une position intermédiaire, cette dernière région exploitant la quasi-totalité de ses surfaces cultivables non boisées. Enfin, environ la moitié des surfaces cultivables sont cultivées dans l'ensemble de la région **Europe** ; le pourcentage varie entre 35 et 55 % selon les régions européennes, l'Europe du Sud faisant exception puisqu'elle cultive l'ensemble de ses terres potentiellement cultivables.

La Figure 3-8 décline les usages des terres émergées en 2015 (FAO, 2018). À cette date, les terres agricoles (cultivées et toujours en herbe) représentent environ 40 % des usages, les forêts environ 30 % et les terres urbanisées moins de 1 %. Les « autres terres »[90] comptent pour 30 %. Les terres potentiellement cultivables incluent ainsi les terres déjà cultivées et des proportions variables des terres utilisées à d'autres fins.

Figure 3-8. Répartition des terres émergées selon les différents usages à l'échelle du monde en 2015



Source : FAO (2018).

3.5.3. Évolution des surfaces potentiellement cultivables à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique

Sous hypothèse d'un changement climatique tendanciel, les surfaces cultivables mondiales évolueraient peu à l'horizon 2050 relativement à « 2010 ». Leur stagnation autour de 5 milliards ha résulterait d'une compensation globale des pertes dans certaines régions par des gains dans d'autres régions (Figure 3-9).

Les pertes de surfaces cultivables relativement à « 2010 », principalement liées à l'augmentation des températures et à la modification des précipitations, concerneraient essentiellement les régions d'**Amérique latine** (-71 Mha), l'ensemble des **régions africaines** (-45 Mha) et l'**Océanie** (-33 Mha). Si l'Amérique latine, l'Afrique subsaharienne et l'Océanie disposent actuellement d'une marge de manœuvre importante qui pourraient limiter les effets négatifs de ces pertes sur les possibilités d'extension future des surfaces cultivées, ce n'est pas le cas de l'Afrique du Nord, dans un contexte où cette région utilise déjà aujourd'hui davantage de terres cultivées que les surfaces considérées comme cultivables selon la procédure GAEZ.

Les gains de surfaces cultivables seraient localisés en très grande majorité dans les zones boréales, soit dans l'**ex-URSS** (+115 Mha), au **Canada-USA** (+101 Mha) et, mais dans une nette moindre mesure, en **Chine** (+23 Mha) et dans le **reste de l'Europe** (+18 Mha). On notera cependant que des travaux récents suggèrent que les gains de surfaces potentiellement cultivables dans ces zones boréales pourraient être plus faibles, ceci parce que ces surfaces connaîtront possiblement d'importantes variations saisonnières des bilans hydriques (sécheresses au printemps ou en été, risques d'érosion hydrique en hiver) et parce que les espèces et variétés actuellement cultivées ne sont probablement pas adaptées aux profils de photopériode particuliers à ces régions (King *et al.*, 2018).

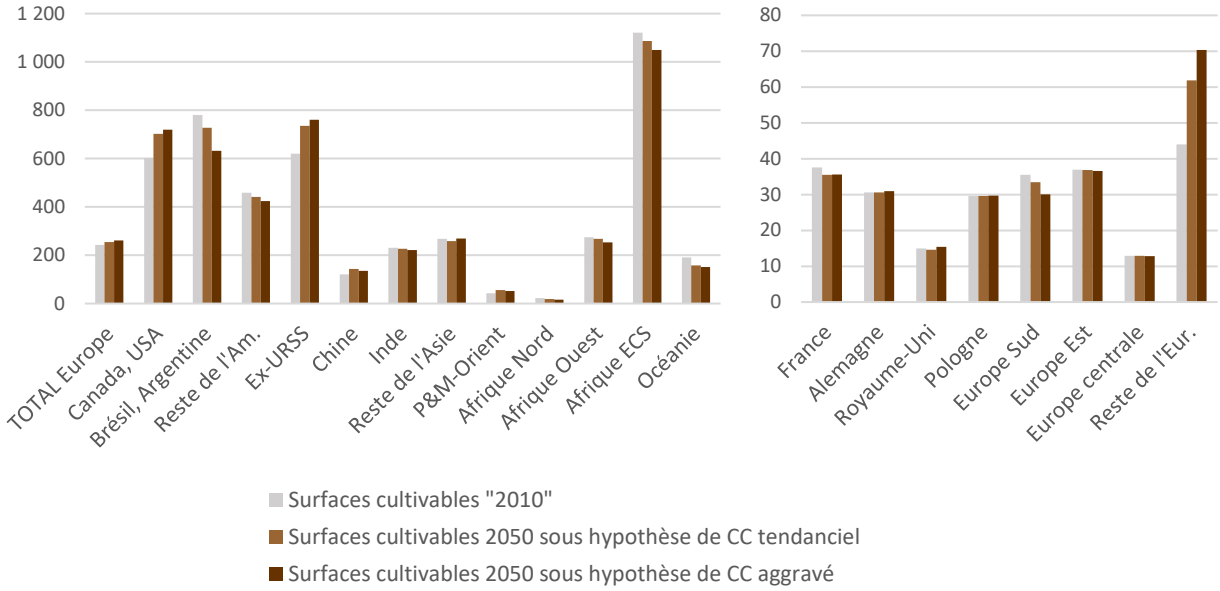
Dans la plupart des régions, une aggravation du changement climatique accentuerait ces tendances d'évolution des surfaces cultivables. Les pertes de surfaces cultivables pourraient doubler, voire tripler (notamment en Amérique latine et en Afrique subsaharienne). Si les gains de surfaces observés sous changement climatique tendanciel auraient également lieu en cas d'aggravation du changement climatique, ils seraient à la hausse dans certaines régions (Europe, Canada-USA, ex-URSS), mais atténués dans d'autres (notamment en Chine).

[90] Les « autres terres » incluent toutes les autres terres non classées dans les catégories « Agriculture » (« terres en culture » et « terres consacrées à des prairies et pâturages permanents ») et « Sylviculture » (« terres forestières » et « autres terres boisées »). Elles englobent ainsi les rubriques « Terres utilisées pour l'aquaculture », « Utilisation de zones bâties et connexes », « Terres utilisées pour la préservation et la restauration des fonctions environnementales », « Autres utilisations des terres non reprises ailleurs » et « Terres non utilisées ».

L'application des hypothèses de Bren d'Amour *et al.* (2017) aux surfaces cultivables ainsi projetées en 2050 conduit à estimer qu'environ 30 Mha de terres cultivables mondiales seraient urbanisés à cet horizon temporel, soit moins de 1 %, pour moitié localisés en Asie. Ce « grignotage » des surfaces cultivables par l'urbanisation serait proportionnellement le plus important en Chine et en Afrique du Nord (où 5 à 7 % des surfaces cultivables seraient ainsi perdues), et, dans une moindre mesure, au Proche et Moyen-Orient, au Royaume-Uni, en Inde et dans le reste de l'Asie (pertes de l'ordre de 2 à 3 %).

Une fois déduites les surfaces boisées en « 2010 » et celles urbanisées à l'horizon 2050 (*cf.* Sous-Section 3.5.1), la superficie totale des terres potentiellement cultivables en 2050 serait réduite de près de moitié en Amérique latine, de plus d'un tiers au Canada-USA, dans le reste de l'Asie et en Océanie, et de plus d'un quart dans l'ex-URSS, en Chine et en Afrique de l'Est, centrale et du Sud. Les autres régions du monde, moins boisées, seraient moins affectées par cette définition plus restrictive de la disponibilité en surfaces cultivables.

Figure 3-9. Évolution des surfaces potentiellement cultivables entre « 2010 » et 2050 d'après GAEZ sous l'effet du changement climatique (tendanciel ou aggravé) dans les différentes régions du monde (Mha)



3.6. Synthèse partielle

Le Tableau 3-6 résume les hypothèses retenues pour projeter en 2050, dans les scénarios de référence, les variables et paramètres d'entrée du modèle Globgri-AE2050 qui caractérisent l'offre agricole, soit (i) les rendements végétaux, (ii) les efficiences animales, (iii) les intensités culturales annuelles et (iv) les surfaces potentiellement cultivables.

On a cherché, dans cette étude, à intégrer autant que possible les effets du changement climatique dans ces projections. Compte tenu des données disponibles, cela a été possible explicitement pour les rendements végétaux et les surfaces cultivables. Pour ces deux variables, les effets de deux hypothèses d'intensité du changement climatique ont été quantifiés. L'analyse comparative de ces résultats mettent en évidence qu'à l'horizon 2050 auquel on se place ici, une aggravation du changement climatique ne changerait pas fondamentalement les projections des rendements telles qu'estimées sous hypothèse de changement climatique tendanciel. Dans les régions où un changement climatique aggravé entrainerait des pertes de surfaces cultivables plus importantes relativement à un changement climatique tendancielle, la superficie actuelle des terres cultivables disponibles est telle que ces pertes ne limiteraient pas les possibilités d'extension future des surfaces cultivées. Des premiers résultats de simulation utilisant ces deux modalités de définition du changement climatique confirment ces résultats, ce qui nous conduit à **ne retenir que la seule hypothèse d'évolution tendancielle du changement climatique** pour l'ensemble des simulations des scénarios de référence présentées dans le Chapitre 5 et les analyses complémentaires présentées dans les Chapitres 6 et 7. Il est probable que la faible différence dans l'amplitude

estimée des effets du changement climatique aggravé *versus* tendanciel s'explique par le fait que nous nous plaçons à l'horizon 2050, date charnière du XXIe siècle avant laquelle les scénarios climatiques estimés d'après les différentes trajectoires d'émissions de GES (RCP du GIEC) tendent à se confondre, et au-delà de laquelle des différenciations majeures devraient apparaître. Il serait notamment intéressant d'examiner le poids de l'effet de fertilisation du CO_2 face aux effets dépressifs d'une augmentation de la température et d'une diminution de la pluviométrie à l'horizon 2100.

Tableau 3-6. Hypothèses d'évolutions à 2050 des variables et paramètres de l'offre agricole du modèle GlobAgri-AE2050

Variables	Hypothèses d'évolutions à l'horizon 2050	
Rendements végétaux	- Impact du changement climatique (T°, P, CO_2) estimé sur la base d'une meta-analyse de la littérature scientifique. - Impact des évolutions techniques sur la base de la FAO caractérisé à partir des projections ajustées Alexandratos et Bruinsma (2012) et des projections FAO (2018) du scénario *Business as Usual.*	
- Cultures (annuelles et pérennes) et prairies temporaires	**Rendements "bas"** : - Changement climatique tendanciel sans valorisation du CO_2 ; - Évolutions techniques modérées.	**Rendements "hauts"** : - Changement climatique tendanciel avec valorisation du CO_2 ; - Évolutions techniques soutenues.
- Prairies permanentes	**Rendements "bas"** : - Changement climatique tendanciel sans valorisation du CO_2.	**Rendements "hauts"** : - Changement climatique tendanciel avec valorisation du CO_2.
Efficiences animales	Pas de prise en compte explicite des impacts du changement climatique Impacts des évolutions techniques à dire d'experts sur la base des évolutions historiques de certains ratios zootechniques	
- Monogastriques	Sur la base des évolutions passées de la productivité des animaux (ratio de la production aux effectifs).	
- Bovins lait et viande	Sur la base des évolutions passées de la productivité des animaux et de projections à 2050 des productions et des effectifs en utilisant le modèle GlobAgri-AE2050, un modèle mondial de formulation des aliments composés et la méthodologie TIER2 du GIEC ; prise en compte de l'impact du changement climatique sur la digestibilité des rations alimentaires des animaux.	
Intensités culturales annuelles	Projections des coefficients du scénario *Business as Usual* de la FAO (2018).	
Surfaces potentiellement cultivables	Procédure GAEZ v3.0 : surfaces en 2050 ayant un potentiel agro-climatique suffisant pour permettre l'implantation et le développement d'une culture, soit les surfaces ayant un *Suitability Index* supérieur à 40 ; prise en compte de l'impact du changement climatique sur cet index.	

Dans le cas des rendements végétaux, on a mis l'accent sur la caractérisation des incertitudes relatives à l'évolution des rendements à l'horizon 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques. L'effet du changement climatique a été estimé à l'aide d'une relation statistique établie à partir d'une analyse quantitative de la littérature scientifique de type méta-analyse. Il intègre les effets des variations de la température moyenne, des précipitations moyennes annuelles et de la concentration atmosphérique en CO_2. L'effet des évolutions techniques sur les rendements a été estimé d'après les projections à 2050 proposées par la FAO dans ses travaux de 2012 et de 2018 sur la sécurité alimentaire mondiale. Deux grandes sources d'incertitudes pèsent sur les rendements futurs. D'un côté, il est difficile de se prononcer sur la dynamique des évolutions techniques à l'horizon 2050. De l'autre, la capacité des cultures à valoriser l'effet de fertilisation du CO_2 « au champ » est intimement liée à la satisfaction simultanée de leurs besoins azotés et hydriques, ainsi qu'à la génétique, composantes dont l'évolution est difficile à caractériser. **Pour tenir compte de ces incertitudes, les simulations ont été réalisées en utilisant deux jeux de projections.** Les rendements « bas » résultent d'évolutions techniques modérées et d'une absence de valorisation de l'effet CO_2. Les rendements « hauts » sont permis par un rythme plus soutenu des évolutions techniques et la pleine valorisation de l'effet CO_2. En cohérence avec le ralentissement de la croissance annuelle du rendement moyen observé à l'échelle mondiale ces deux dernières décennies, le taux annuel d'évolution des rendements « hauts » entre « 2010 » et 2050 est environ deux fois plus faible que celui enregistré sur la période 1961-1990.

Tel qu'estimé ici, le changement climatique aurait par ailleurs un effet relativement modeste sur l'extension des surfaces cultivables mondiales à l'horizon 2050. Ces dernières stagneraient autour de 5 milliards d'ha, ce résultat étant le fruit d'une compensation globale de pertes dans les deux régions d'Amérique latine, les trois régions africaines et l'Océanie par des gains essentiellement localisés dans l'ex-URSS et au Canada-USA, et, dans une nette moindre mesure, en Chine et dans la région du reste de l'Europe. Notons toutefois que les surfaces dites cultivables sont définies ici comme les surfaces dont le potentiel agro-climatique est favorable à l'implantation d'une culture, annuelle ou pérenne, quel que soit son usage actuel. Seuls les effets du changement climatique sur la capacité des plantes à se développer sur les surfaces est pris en compte, les effets directs du changement climatiques sur les propriétés des sols (activité du sol, matière organique…) étant difficilement quantifiables.

Chapitre 4. L'évolution de la demande en produits agricoles à l'horizon 2050

Les différentes composantes de l'offre en produits agricoles (surfaces, rendements, intensités culturales) présentées dans le chapitre précédent concourent à répondre aux demandes en produits agricoles telles qu'elles se répartissent à travers le monde. La demande en produits agricoles recouvre trois types de besoins en matières premières agricoles : la demande pour l'alimentation humaine, la demande pour l'alimentation animale et un ensemble d'utilisations non alimentaires (production d'énergie, de matériaux de construction, de produits chimiques, de textiles, etc.).

En guise de repères, notons qu'en « 2010 », la demande alimentaire humaine (de l'ordre de 7 150 milliards de Kcal) est, en équivalent énergie, presque deux fois plus importante que la demande alimentaire animale (de l'ordre de 3 800 milliards de kcal) lorsqu'on considère l'ensemble des produits agricoles hors fourrages à l'échelle mondiale. Si ces deux postes de demande en produits agricoles sont du même ordre de grandeur dans les régions les plus développées, la demande pour l'alimentation animale est partout ailleurs très inférieure à la demande humaine, notamment en Afrique subsaharienne et en Inde. La demande mondiale en matières premières agricoles pour la production de biocarburants (environ 730 milliards de kcal) est, quant à elle, près de 10 fois plus faible que la demande alimentaire humaine. Elle provient essentiellement du Canada-USA, du Brésil-Argentine, de l'Europe et, dans une moindre mesure, de la Chine.

Dans le modèle GlobAgri-AE2050, la demande alimentaire humaine, la demande non alimentaire en produits agricoles ainsi que la part perdue ou gaspillée pendant le stockage, la distribution et le transport des matières premières agricoles sont renseignées en entrée (*cf.* Section 1.3.2). La demande en produits agricoles pour l'alimentation animale est une variable endogène dans le modèle GlobAgri-AE2050 : elle est déterminée par l'évolution de la demande en produits animaux dans les régimes alimentaires humains et par les évolutions des systèmes de production animaux et des efficiences animales (*cf.* Chapitre 3). Aucune hypothèse d'évolution à l'horizon 2050 n'est donc formulée directement sur cette composante de la demande en produits agricoles.

Notons qu'il n'a pas été possible de formuler des hypothèses d'évolution de la qualité (composition et propriétés) des matières premières agricoles sous l'effet du changement climatique, or la quantité de matières nécessaire à tel usage alimentaire ou non alimentaire est liée à leur qualité. En l'absence d'informations permettant d'apprécier l'évolution de la qualité des produits agricoles, cette dernière est ici supposée inchangée entre « 2010 » et 2050. Cette source d'incertitudes est discutée dans le Chapitre 8 du présent rapport.

S'appuyant sur la hiérarchie des usages donnant priorité aux enjeux alimentaires, ce chapitre présente tout d'abord la stratégie (hypothèses et méthodes) que nous avons adoptée pour **projeter l'évolution de la demande alimentaire humaine à l'horizon 2050 aux échelles mondiale et régionale**. Celle-ci est déterminée par la combinaison des **évolutions démographiques** et des **évolutions des régimes alimentaires** (niveau des apports caloriques totaux par habitant et par jour, et composition de la ration alimentaire). Compte tenu des tendances d'évolution passée et en cours des régimes alimentaires, deux hypothèses d'évolution future des régimes ont été adoptées. La première correspond à la poursuite des tendances lourdes qui s'apparente à une occidentalisation des régimes alimentaires. La seconde, plus normative, traduit une transition vers des régimes plus favorables à la santé inspirée des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

En ce qui concerne les usages non alimentaires de produits agricoles, on s'est principalement concentré sur la production de biocarburants. Le développement de ceux-ci est à la croisée d'enjeux énergétiques et environnementaux, et pose la question des possibles conflits d'usages des terres agricoles. Afin de tenir compte des travaux prospectifs européens et mondiaux sur les évolutions possibles de la demande et de la production de biocarburants, un travail spécifique a été conduit ici pour **isoler les usages des matières premières agricoles à des fins de production de biocarburants parmi l'ensemble des usages non alimentaires**.

Enfin, l'évolution des coefficients de pertes et gaspillages n'a pas fait l'objet d'hypothèses particulières dans le cadre de cette étude. Ils sont donc supposés rester constants, entre « 2010 » et 2050 pour toutes les régions du monde.

4.1. La demande alimentaire

La demande alimentaire d'une région, à laquelle doivent répondre sa production agricole et ses échanges mondiaux, est le produit de la population de la région et de la demande alimentaire de chacun de ses habitants. Cette dernière peut être exprimée en apports énergétiques quotidiens (kcal/hab/jour) et correspond alors à la somme des apports caloriques de chacun des groupes de produits constitutifs de la ration alimentaire.

La dynamique démographique à l'horizon 2050 a été estimée d'après les projections médianes actualisées de l'ONU. Elle n'a pas fait l'objet d'hypothèses spécifiques quant à l'émergence future de migrations humaines de grande ampleur possiblement liées au changement climatique, à des catastrophes écologiques ou au développement de situations économiques ou géopolitiques tendues ou conflictuelles. En effet, si plusieurs travaux estiment que le nombre de réfugiés climatiques, écologiques ou économiques pourrait fortement augmenter dans le monde au cours du XXIe siècle. Spatialiser et intégrer dans l'analyse ces flux entre les 21 régions du monde considérées ici nécessiterait un travail de scénarisation à part entière.

Du fait des enjeux de santé publique et environnementaux liés au régime alimentaire, deux hypothèses contrastées d'évolution des régimes alimentaires ont été élaborées afin d'analyser l'effet de l'adoption de régimes plus favorables à la santé sur la production et les échanges des différents types de produits agricoles, et leurs conséquences en termes d'évolution des besoins en surfaces agricoles. On s'est là aussi appuyé sur des travaux menés antérieurement, notamment le travail de scénarisation mené dans Agrimonde-Terra (Le Mouël *et al.*, 2018).

4.1.1. Dynamiques démographiques régionales à l'horizon 2050 : les projections médianes de l'ONU

La plupart des travaux prospectifs proposant des scénarios d'évolution tendancielle des systèmes agricoles et alimentaires utilisent la variante moyenne des projections démographiques de l'ONU (*World Population Prospects*) pour caractériser l'évolution de la population mondiale. Ces projections régulièrement actualisées estiment des taux d'accroissement démographique par pays. Dans sa révision 2017, l'ONU estime ainsi que la population mondiale augmenterait de l'ordre de +30 % entre 2017 et 2050, pour atteindre entre 9,4 et 10,2 milliards d'habitants (Mds hab)[91].

Les projections démographiques 2050 des 21 régions considérées dans la présente étude ont été obtenues en appliquant les taux d'accroissements médians estimés par l'ONU (2017) à la population de l'année de base « 2010 » (moyenne 2009, 2010, 2011). Le Tableau 4-1 présente les valeurs retenues dans la présente étude, et illustre l'hétérogénéité spatiale des dynamiques démographiques. L'augmentation de la population mondiale entre 2010 et 2050 (+2.6 milliards d'habitants) serait principalement due à celle des régions d'Afrique subsaharienne, de l'Inde et du reste de l'Asie.

En **Afrique de l'Ouest** et en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud**, l'explosion démographique (+156 % en moyenne) entrainerait une augmentation de +1,2 milliard d'habitants, pour atteindre près de 2 milliards d'habitants au total en 2050. La croissance démographique reste également forte en Afrique du Nord et au Proche et Moyen-Orient (+63 %), régions qui accueilleraient ainsi près de 270 millions d'habitants supplémentaires et avoisineraient les 700 millions d'habitants. À cet horizon, l'Afrique prise dans son ensemble serait encore dans la phase croissante de sa courbe démographique, l'infléchissement de son taux de croissance n'étant pas attendu avant 2100.

Puisque ces deux régions auraient, à l'horizon 2050, déjà entamé leur transition démographique, le taux d'accroissement démographique serait plus faible en **Inde** et dans le **reste de l'Asie**. Même ralenti, un taux de croissance de +34 % sur la période dans ces deux régions déjà très peuplées en 2010 se traduirait par une augmentation de +840 millions d'habitants par rapport à 2010 ; elles regrouperaient alors près de 3,3 milliards d'habitants. Les régions d'Amérique latine, bien moins peuplées, suivent néanmoins des trajectoires comparables et gagneraient un peu moins de 200 millions d'habitants supplémentaires.

Parmi les régions qui auront, à l'horizon 2050, achevé leur transition démographique, **la Chine, l'ex-URSS et l'Europe** se distinguent très fortement : elles verraient leur population stagner ou augmenter très faiblement. La population chinoise se serait stabilisée à hauteur de 1,4 milliard d'habitants et les pays de l'ex-URSS rassembleraient moins de 300 millions d'habitants.

[91] Intervalle de fluctuation au seuil de 95 %

Tableau 4-1. Évolution démographique des 21 régions du monde entre « 2010 » et 2050 (en millions d'habitants)

	Population "2010" (Mhab)	Population 2050 (Mhab)	Variation de population "2010"-2050 (Mhab)	(%)
France	63,0	70,6	+7,6	12,0%
Allemagne	80,9	79,2	-1,7	-2,1%
Royaume-Uni	63,3	75,4	+12,1	19,1%
Pologne	38,3	32,4	-5,9	-15,5%
Europe Sud	145,8	133,9	-11,8	-8,1%
Europe Est	46,8	37,5	-9,3	-19,8%
Europe centrale	32,2	33,8	+1,6	5,0%
Reste de l'Europe	64,5	72,3	+7,8	12,0%
TOTAL Europe	**534,8**	**535,2**	**+0,3**	**0,1%**
Canada, USA	342,8	434,5	+91,8	26,8%
Brésil, Argentine	238,0	287,9	+49,9	21,0%
Reste Amér.	354,3	484,7	+130,4	36,8%
Ex-URSS	277,8	289,3	+11,5	4,1%
Chine	1 390,4	1 396,4	+5,9	0,4%
Inde	1 230,8	1 659,0	+428,1	34,8%
Reste de l'Asie	1 196,9	1 609,2	+412,3	34,4%
P&M-Orient	262,0	426,3	+164,2	62,7%
Afrique Nord	163,4	268,4	+105,1	64,3%
Afrique Ouest	304,2	800,7	+496,5	163,2%
Afrique ECS	483,0	1 214,6	+731,6	151,5%
Océanie	28,9	45,1	+16,2	56,0%
Reste du monde	4,4	3,8	-0,6	-14,3%
TOTAL Monde	**6 811,7**	**9 455,1**	**+2 643,3**	**38,8%**

La stagnation de la population européenne aux alentours de 535 millions d'habitants masque néanmoins une forte hétérogénéité entre les huit régions. Il faut y distinguer clairement les régions qui continueront à gagner des habitants, des régions à démographie déclinante. D'un côté, le **Royaume-Uni**, la **France** et le **reste de l'Europe** (pays de l'Europe du Nord, Irlande et Benelux) verraient leur population s'accroître respectivement de 19 %, 12 % et 12 % entre « 2010 » et 2050. De l'autre côté, l'**Europe de l'Est**, la **Pologne** et l'**Europe du Sud** connaîtraient des diminutions conséquentes de leur population, puisque celle-ci déclinerait de -20 % en Europe de l'Est, -15 % en Pologne et -8 % en Europe du Sud. L'**Allemagne** serait également concerné par cette baisse de population, bien que de façon moins prononcée (-2 % à l'horizon 2050). De telles évolutions démographiques se répercuteront nécessairement sur leur demande alimentaire et donc sur les évolutions de leurs équilibres emplois-ressources.

En conséquence de ces projections démographiques, en 2050, l'Asie continuerait à tirer fortement la demande alimentaire mondiale, et l'Afrique dans son ensemble en deviendrait un acteur majeur. En effet, la moitié de la population mondiale serait toujours localisée en Inde, dans le reste de l'Asie et en Chine (respectivement 1,7, 1,6 et 1,4 milliard d'habitants). L'Afrique sub-saharienne (2 milliards d'habitants) représenterait, quant à elle, 21 % de la population mondiale en 2050 (contre 12 % en 2010). Le reste de la population se répartirait de façon plus ou moins homogène entre les autres régions, à l'exception de l'Océanie comptant pour seulement 0,5 % de la population mondiale.

4.1.2. Évolution des régimes alimentaires : deux hypothèses contrastées

Les régimes alimentaires, ou consommations alimentaires par habitant, se décrivent selon deux composantes : (i) le niveau des apports énergétiques totaux (en Kcal/hab./jour) et (ii) la répartition des produits agricoles contribuant à ces apports (structure de consommation). Projeter les régimes alimentaires à l'horizon 2050 nécessite donc de formuler des hypothèses

d'évolution sur ces deux composantes. À l'image des données diffusées par la FAO, on raisonne ici en calories *disponibles* par habitant et par jour et non en calories *effectivement consommées*. Les calories disponibles correspondent aux quantités qui « atteignent » le consommateur, une fois déduites les pertes de produits intervenant entre la récolte et l'entrée dans le ménage. Néanmoins, les pertes et gaspillages de produits alimentaires intervenant au niveau du ménage (au cours du stockage, de la préparation ou encore de la cuisson des produits) ne sont pas déduites des calories disponibles.

Évolutions passées et situation actuelle

Les trois dernières décennies se caractérisent par une augmentation globale des apports caloriques totaux. Cette augmentation n'est néanmoins pas uniforme selon les régions. Dans les régions à pays développés (Europe, Canada-USA, ex-URSS), elle a ralenti jusqu'à atteindre un plateau, voire afficher plus récemment un léger déclin. A l'inverse, les régions en développement se caractérisent par une plus forte croissance passée de la disponibilité calorique totale par habitant, tendance qui se poursuit actuellement et repose sur l'augmentation de la consommation de produits animaux, d'huiles végétales et de produits sucriers. Si ces évolutions passées ont contribué à réduire les disparités entre pays développés et pays en développement, la disponibilité calorique totale par habitant reste très hétérogène selon les régions du monde, allant en 2010 d'environ 2 200 kcal/hab/j en Afrique de l'Est, centrale et du Sud à 3 700 kcal/hab/j au Canada-USA (Figure 4-1). L'Europe se situe en moyenne à environ 3 400 kcal/hab/j, sans grande disparité entre les régions européennes. Néanmoins, la France et l'Allemagne avec des apports avoisinant les 3 600 kcal/hab/j se rapprochent du Canada-USA, et l'Europe de l'Est reste quelque peu en deçà avec 3 200 kcal/hab/j.

Aujourd'hui, les céréales continuent de jouer un rôle important dans les régimes alimentaires. Néanmoins, la part qu'elles représentent dans les consommations est variable selon les régions du monde. Ceci reflète l'état d'avancement des transitions alimentaires régionales, se caractérisant globalement par une diminution relative des protéines végétales au profit des protéines animales, et une diminution relative des glucides au profit des graisses et des sucres simples.

En **Europe**, en **Océanie**, au **Canada-USA** et au **Brésil-Argentine**, les céréales représentent environ 1/3 des calories consommées, les produits animaux environ 1/4, et les huiles végétales et les produits sucriers environ 1/5 à 1/4. Les régimes moyens du **reste de l'Amérique** et de l'**ex-URSS** présentent une structure proche, quoiqu'un peu plus riches en céréales et un peu plus pauvres en produits animaux et en huiles végétales. Parmi les régions européennes, la **France** se distingue avec une part des céréales moins élevée (29 %) et un poids des produits animaux plus conséquent (31 %). À l'opposé, les habitants de la **Pologne** et de l'**Europe de l'Est** ont des régimes alimentaires plus riches en céréales (40 % et 42 %) et moins fournis en produits animaux (22 %). Ils se rapprochent ainsi de l'ex-URSS.

La **Chine** se caractérise également par une consommation de produits animaux relativement élevée (20 % des calories disponibles), qui la rapproche des régions à transition alimentaire avancée, la viande issue de monogastriques représentant cependant les deux tiers de cette consommation de produits animaux. Elle conserve en outre une importante consommation de céréales (50 %) et, à l'inverse, une faible consommation de produits sucriers (3 %) et d'huiles (6 %).

En **Inde**, dans le **reste de l'Asie**, au **Proche et Moyen-Orient** et dans l'ensemble des trois régions d'**Afrique**, les céréales contribuent également à 50 % des apports caloriques, et les produits animaux à seulement 10 % (voire même seulement 5 % en **Afrique de l'Ouest**). Ces régions se caractérisent également par un régime plus pauvre en huiles végétales (sauf au Proche et Moyen-Orient). Notons également l'importante consommation d'autres produits végétaux (notamment les racines et tubercules) en **Afrique de l'Ouest**.

Compte tenu de ces évolutions antérieures et des débats actuels relatifs à l'alimentation, il nous a semblé crucial d'adopter deux hypothèses contrastées d'évolution future des régimes alimentaires. On a ainsi considéré dans la présente étude :

- une évolution tendancielle des régimes alimentaires dans l'ensemble des régions du monde, se caractérisant par la poursuite des transitions en cours. Les régimes de 2050 issus de cette trajectoire seront désignés « régimes tendanciels » ;
- une rupture plus radicale porteuse d'une transition vers des régimes plus favorables à la santé dans l'ensemble des régions du monde. Les régimes alimentaires de 2050 relevant de cette trajectoire de rupture seront nommés « régimes sains ».

Les Figures 4-1 et 4-2 présentent l'évolution de la disponibilité calorique totale et de la répartition des apports caloriques totaux selon les différents groupes de produits agricoles entre « 2010 » et 2050 dans les différentes régions du monde, selon les deux hypothèses d'évolution des régimes alimentaires[92].

[92] Les valeurs associées à ces Figures (en détaillant les huit régions européennes) sont disponibles dans le Chapitre 3 du Rapport technique de l'étude.

Régimes « tendanciels » : poursuite des transitions alimentaires en cours, augmentation des apports caloriques dans les pays émergents et les pays en développement

Les régimes « tendanciels » 2050 ont été élaborés à partir des projections des consommations alimentaires de la FAO (2012)[93]. Dans ce travail, la FAO projette la demande alimentaire de chaque groupe de produits agricoles comme une fonction du PIB par habitant, éventuellement ajustée (i) pour tenir compte des tendances d'évolution passées des apports alimentaires (évolution de la sous-nutrition, par exemple), et (ii) en cohérence avec les niveaux attendus de production et d'échanges des produits agricoles. Ces projections de la FAO prolongent donc les trajectoires passées et poursuivent les transitions nutritionnelles en cours.

Sous hypothèse de la poursuite des tendances en cours, la disponibilité calorique totale stagnerait entre 2010 et 2050 dans les **régions européennes**, le **Canada-USA** et l'**Océanie** (entre 3 300 et 3 800 kcal/hab/j selon les régions). La **France** et l'**Allemagne** restent donc proches des 3 600 kcal/hab./j, alors que l'**Europe de l'Est** reste proche des 3 200 kcal/hab/j, et que les autres régions européennes avoisinent les 3 400 kcal/hab./j. Les apports caloriques quotidiens diminueraient même légèrement en **ex-URSS** et s'établiraient à environ 3 100 kcal/hab/j en 2050. La structure des régimes de cet ensemble de régions n'évoluerait qu'à la marge, compte tenu du caractère très avancé de la transition nutritionnelle de ces régions (Figure 4-2).

Les consommations alimentaires évolueraient également peu en **Afrique du Nord** et au **Proche et Moyen-Orient**, tant en termes de disponibilité calorique totale (de l'ordre de 3 200 kcal/hab/j) qu'en termes de structure. Malgré une légère augmentation de la consommation de produits animaux au détriment de celles de céréales, ces régions conserveraient donc un régime moins riche en protéines animales que les précédentes.

À l'inverse, la disponibilité calorique totale continuerait d'augmenter dans le reste du monde, mais pour des raisons variables selon les régions.

En **Chine** comme dans les régions d'**Amérique latine**, où la transition nutritionnelle est relativement avancée, la croissance des apports caloriques serait modérée (+5 à +8 %) et essentiellement due à l'augmentation de la consommation de produits animaux, accompagnée néanmoins en Chine d'une légère réduction de la consommation de céréales. Le régime moyen chinois atteindrait ainsi en 2050 un niveau d'apport calorique total similaire à celui des régions européennes (environ 3 400 kcal/hab/j), tout en conservant certaines spécificités dans la structure des consommations, notamment l'importance de la viande de monogastriques dans les apports en calories animales, et la faible part des produits sucriers et des huiles végétales.

La disponibilité calorique totale augmenterait plus nettement en **Inde** et dans le **reste de l'Asie** (respectivement +17 et +10 %), en raison de la poursuite des évolutions aujourd'hui engagées : augmentation de la consommation de produits animaux, d'huiles végétales et de produits sucriers, combinée à une légère diminution de la consommation de céréales.

En **Afrique sub-saharienne**, les régimes alimentaires suivraient une trajectoire caractéristique des régions en pleine transition nutritionnelle. La disponibilité calorique totale augmenterait sensiblement (+14 à +16 %), pour dépasser quelque peu les 3 000 kcal/hab/j en **Afrique de l'Ouest** mais elle n'atteindrait que les 2 600 kcal/hab/j en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud**. En outre, ces évolutions résulteraient majoritairement d'une augmentation de la consommation de céréales (et, dans une moindre mesure, d'huiles végétales), les régimes restant pauvres en produits animaux.

Si le prolongement des tendances passées ne modifie pas fondamentalement les régimes alimentaires des régions développées, la transition nutritionnelle qui se poursuivrait dans la plupart des régions en développement peut s'interpréter, en suivant Mora (2018), comme une urbanisation des régimes, qui se caractérise par une consommation croissante de produits animaux et de produits transformés plus riches en huiles et sucres. Ces évolutions n'entraineraient néanmoins qu'une faible réduction des disparités entre régions, que l'écart, en 2050, entre la disponibilité calorique moyenne au Canada-USA (près de 3 800 kcal/hab/j) et celle en l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud (2 600 kcal/hab/j) illustre parfaitement. Seul le régime alimentaire de la population chinoise se rapprocherait à l'horizon 2050 de celui des régions développées, les autres régions restant très en deçà en termes d'apports caloriques totaux et/ou de consommation de produits animaux.

[93] Projections retravaillées pour les besoins de l'étude conduite par l'Inra sur la dépendance alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient (*cf.* Le Mouël et Schmitt, 2018).

Régimes « sains » : au-delà d'une trajectoire de convergence, des évolutions contrastées selon les régions du monde

Cette hypothèse de rupture des évolutions des régimes alimentaires s'inspire fortement de l'hypothèse d'évolution à 2050 dite « *healthy* » de la prospective Agrimonde-Terra[94]. Les régimes « sains » sont des régimes alimentaires normatifs mis en place sous l'impulsion des politiques de santé publique pour lutter contre les diverses formes de malnutrition et leurs conséquences. L'adoption de régimes « sains » résulte d'une réorientation des consommations vers une diète plus équilibrée et diversifiée reposant sur une consommation modérée de produits animaux, une consommation plus élevée de fruits et légumes et de légumineuses, et une plus grande variété de céréales. Les aliments ultra-transformés à haute densité énergétique et faible valeur nutritionnelle sont également limités.

Concrètement, le mode de construction des régimes « sains » à l'horizon 2050 répond à quatre grandes règles, qui s'appliquent toutes aux les régimes alimentaires « 2010 » de chacune des régions :

- l'apport (disponibilité) calorique total(e) est ajusté(e) à 2 750 ou à 3 000 kcal/hab/j selon la situation de « 2010 » ; toutes les régions dépassant les 3 000 kcal/hab/j en « 2010 » sont abaissées à ce niveau des 3 000 kcal/hab/j en 2050, toutes celles qui sont en-dessous des 2 750 kcal/hab/j sont remontées à ce niveau, alors que celles dont les apports caloriques sont compris dans cet intervalle en « 2010 », maintiennent leur niveau initial à l'horizon 2050 (Figure 4-1) ;
- selon la richesse du régime en produits animaux en « 2010 », la part des produits animaux est ajustée, selon un processus similaire à celui décrit ci-dessus, à un niveau variant entre 12 et 20 % des calories totales ; celle des légumineuses l'est à un niveau entre 5 et 8 % des calories totales ; la part des céréales est ensuite ajustée de sorte à combler les besoins totaux en protéines compte tenu des apports en protéines animales et en légumineuses ;
- la part des fruits et légumes est fixée pour toutes les régions à 12 % ;
- la part des produits sucriers est plafonnée à 5 %, et celle des huiles végétales à 10 %.

Pour la quasi-totalité des régions, l'adoption de tels régimes constituerait une rupture forte par rapport à leurs trajectoires passées tant du point de vue de la structure que des niveaux de consommation. Sauf exception liée à certaines typicités régionales, elle induirait, dans la majorité des cas, une augmentation de la consommation de légumineuses et de fruits et légumes, et une diminution de celle des produits sucriers. La disponibilité calorique totale et la consommation de produits animaux et d'huiles végétales évolueraient de façon plus contrastée selon les régions.

Les **régions développées** (et, dans une moindre mesure, le **Brésil-Argentine**), dont la transition alimentaire est aujourd'hui très avancée, seraient logiquement caractérisées par une diminution importante des disponibilités caloriques totales (-9 à -19 %) associée à une diminution des consommations de produits animaux et d'huiles végétales d'environ 1/3. Les huit régions européennes s'aligneraient toutes sur un régime alimentaire identique, avec un apport calorique de 3 000 kcal/hab./j. et une diète caractérisée par un poids important des céréales (40 %) ainsi que des fruits et légumes (12 %) et des légumineuses (limité cependant à 5 %) et un retrait relatif des produits animaux (à hauteur de 20 % des calories totales), des huiles et des sucres.

À l'opposé, les apports caloriques quotidiens s'accroitraient nettement en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud** (+23 %) et dépasseraient même d'environ 5 % le niveau atteint en 2050 sous hypothèse de régimes « tendanciels ». Ces apports augmenteraient également en **Inde** (+15 %) et, de façon plus modérée, en **Afrique de l'Ouest** et dans le **reste de l'Asie** ; ils se fixeraient dans ces régions à des niveaux inférieurs à ce qu'ils deviendraient en 2050 en cas de régimes « tendanciels ».

La consommation de produits animaux augmenterait fortement en **Afrique sub-saharienne**, en **Inde**, et, dans une moindre mesure, en **Afrique du Nord**, ce qui induira une hausse additionnelle du besoin en produits végétaux destinés à l'alimentation animale. Elle s'accompagnerait en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud** et en **Inde** d'une augmentation de la consommation d'huiles végétales. Dans les autres régions du monde (reste de l'Amérique, ex-URSS, Chine, reste de l'Asie, Proche et Moyen-Orient), les consommations de produits animaux et d'huiles végétales seraient en revanche peu affectées par l'adoption d'un régime « sain ». Le cas échéant, la diminution (modérée) de la disponibilité calorique totale serait surtout liée à la diminution de la consommation de céréales.

[94] Les hypothèses relatives à la structure des apports protéiques et à la limitation des produits sucriers ont été ajustées pour les besoins de la présente étude.

L'adoption généralisée de régimes « sains » permettrait donc une réduction substantielle des disparités régionales de consommation alimentaire par rapport à la situation « 2010 », sans pour autant se traduire par l'adoption d'un régime alimentaire unique à toute la planète. Elle impliquerait néanmoins d'importantes modifications des comportements alimentaires, qui ne pourraient avoir lieu sans la mise en place de politiques publiques fortement incitatives.

Figure 4-1. Évolution de la disponibilité calorique moyenne régionale (kcal/hab/j) entre « 2010 » et 2050 sous hypothèses de régimes « tendanciels » (a) et de régimes « sains » (b)

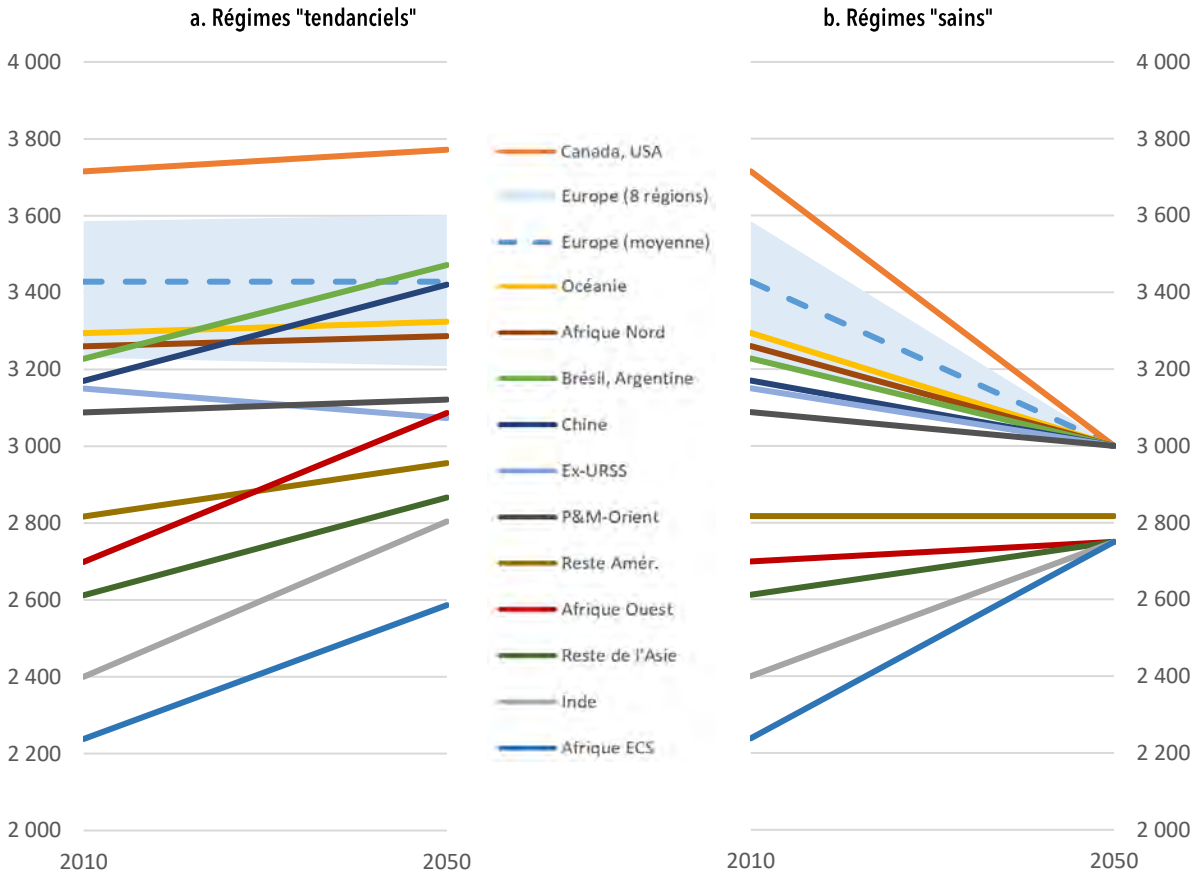
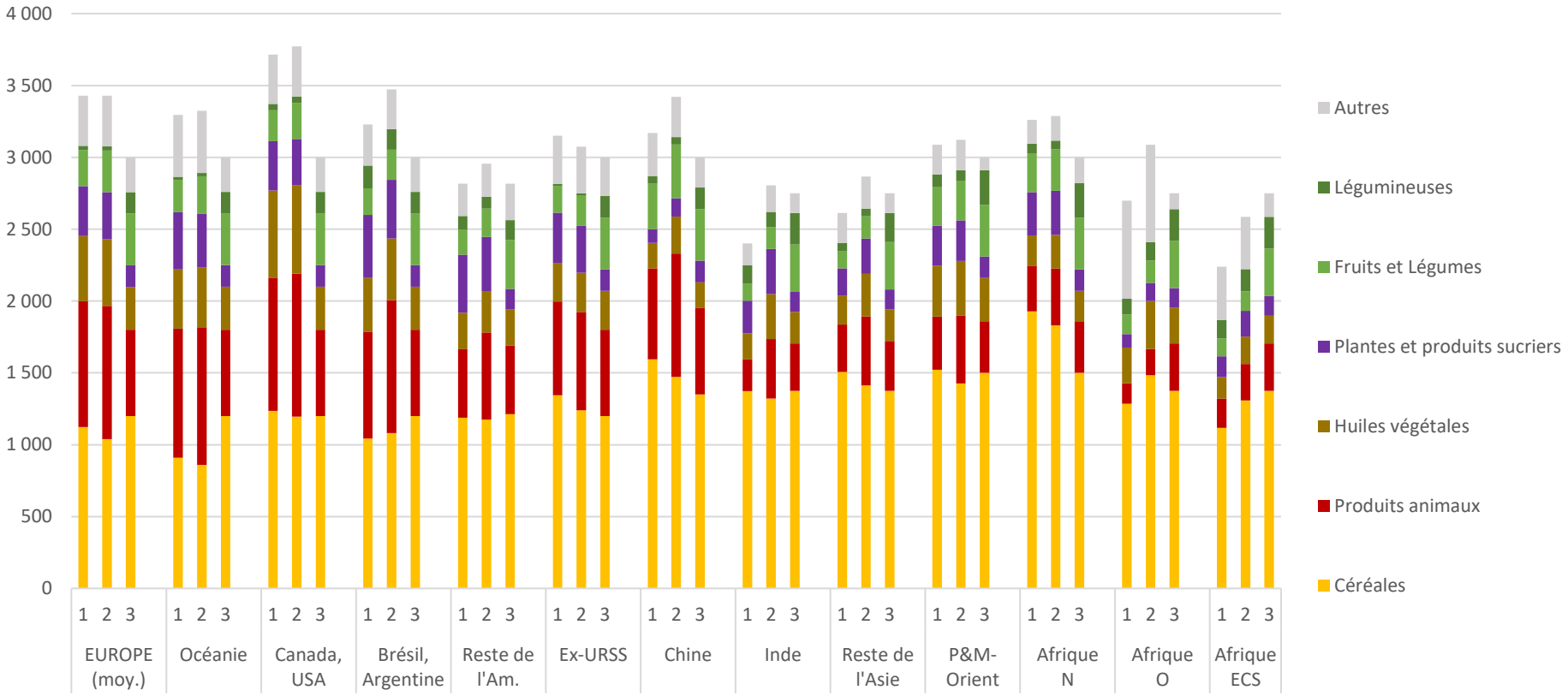


Figure 4-2. Disponibilité calorique totale et répartition des apports caloriques totaux selon les différents groupes de produits agricoles (en kcal/hab/j) en « 2010 » et en 2050 selon les deux hypothèses d'évolution des régimes alimentaires

Légende :
1 : 2010
2 : 2050 sous hypothèse de régimes "tendanciels"
3 : 2050 sous hypothèse de régimes "sains"



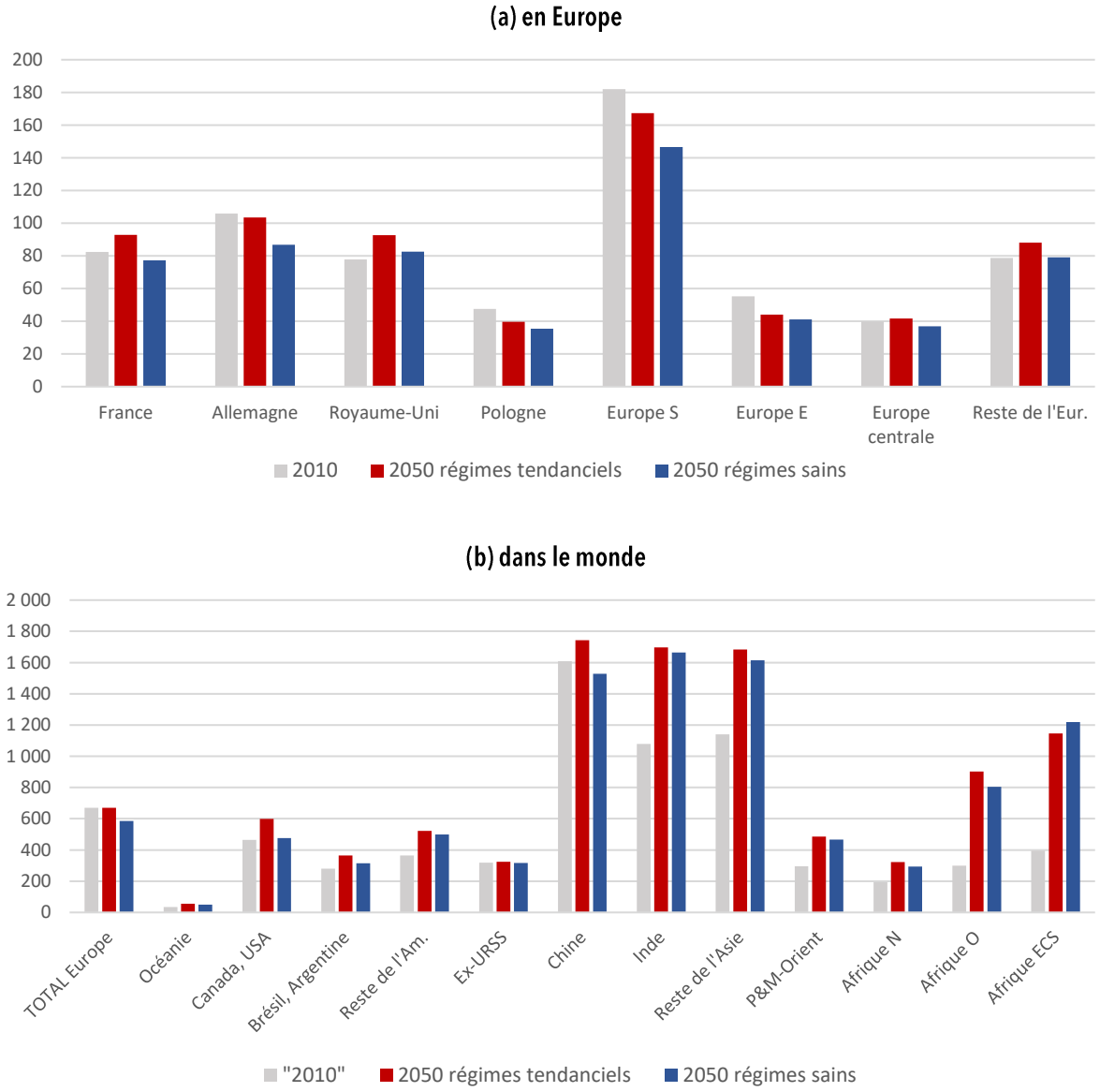
INRAE – Rapport de synthèse de l'étude « Agricultures européennes 2050 » Février 2020

4.1.3. Bilan : évolution de la demande alimentaire mondiale

Quelle que soit l'hypothèse de régimes alimentaires retenue, la demande alimentaire mondiale augmenterait de façon importante à l'horizon 2050 sous les effets conjugués des dynamiques démographiques et des disponibilités caloriques par habitant. Elle augmenterait ainsi de 47 % sous hypothèse de régimes « tendanciels », accroissement qui serait ramené à +38 % en cas de rupture vers des régimes « sains ». Le facteur démographique joue ainsi un rôle très majoritaire en comparaison de celui des régimes alimentaires (évolution des disponibilités caloriques par habitant). Ainsi, la demande alimentaire totale tendrait à s'accroître avec plus ou moins d'acuité dans presque toutes les régions du monde à l'horizon 2050, et ce quelle que soit l'hypothèse d'évolution des régimes retenue. La Figure 4-3 illustre néanmoins l'hétérogénéité régionale de l'évolution de la demande alimentaire selon les deux hypothèses de régimes.

Ainsi, l'explosion démographique en **Afrique subsaharienne** induirait le quasi **triplement de la demande alimentaire totale** de cette partie du monde, quelle que soit l'hypothèse d'évolution du régime retenue. En Afrique de l'Est, centrale et du Sud, l'augmentation de la demande totale serait même plus forte sous hypothèse de régime « sain », du fait de la forte augmentation des apports caloriques journaliers requise par l'adoption d'un régime « sain » (*cf.* Sous-Section 4.1.2).

Figure 4-3. Demande alimentaire totale (en Milliards de kcal) en « 2010 » et en 2050 sous les deux hypothèses d'évolution des régimes alimentaires, (a) En Europe et (b) dans le monde



Les demandes alimentaires du **reste de l'Asie** et de l'**Inde**, déjà les plus élevées au monde après la Chine, augmenteraient de moitié environ, jusqu'à atteindre le niveau de la Chine, voire le dépasser sous hypothèse de régimes « sains ». Notons qu'en cas de passage à des régimes alimentaires « sains », la demande alimentaire chinoise serait même en mesure de diminuer de façon certes modérée (-5 %). En conséquence, près de 50 % de la demande alimentaire mondiale proviendrait en 2050 de l'Asie (Chine, Inde et reste de l'Asie), quelle que soit la nature des régimes alimentaires adoptés.

Le **Proche et Moyen-Orient** et l'**Afrique du Nord**, les deux régions les plus dépendantes des importations de produits agricoles en 2010[95], verraient leur demande alimentaire augmenter fortement (de moitié, voire des 2/3) laissant supposer une accentuation de la dépendance alimentaire de ces deux régions[96].

Enfin, c'est en **Europe** et au **Canada-USA**, régions où la transition nutritionnelle est aujourd'hui la plus avancée, que l'adoption de régimes « sains » aurait le plus d'effet sur l'évolution de la demande alimentaire totale en 2050. En **Europe**, où la population resterait globalement stable, la demande alimentaire stagnerait sous hypothèse de poursuite des régimes actuels, mais diminuerait de 12 % si des régimes plus favorables à la santé étaient adoptés. Si toutes les régions européennes sont concernées dans des proportions à peu près identiques par les évolutions de leurs régimes alimentaires, la **Pologne**, l'**Europe de l'Est** et l'**Europe du Sud** y ajoutent une démographie déclinante qui entraine une chute importante de leur demande alimentaire. Au **Canada-USA**, l'adoption de régimes « sains » annulerait l'effet de la croissance démographique à l'horizon 2050, alors que la demande alimentaire continuerait d'augmenter (+29 %) sous hypothèse de régimes « tendanciels ».

4.2. La demande en matières premières agricoles pour la production de biocarburants

Dans la présente étude, traitant de l'impact des différentes composantes du système alimentaire global sur les utilisations de terres et la production agricole, nous nous sommes concentrés, au-delà des usages alimentaires, sur les usages de matières premières agricoles à des fins de production de biocarburants, en vue d'élaborer des hypothèses d'évolution de ces usages à l'horizon 2050. Ainsi, les usages non alimentaires de matières premières agricoles destinés aux industries chimiques, cosmétiques, pharmaceutiques, textiles, etc. n'ont pas fait l'objet d'une analyse détaillée dans cette étude. Dans la mesure où ces usages ne recourent qu'à une faible part de la demande en produits agricoles et que nous ne disposions pas d'éléments permettant de quantifier leurs évolutions, il a été décidé de les garder constantes et égales à leur niveau initial « 2010 »[97].

Cette étude s'est en revanche penchée sur l'évolution des usages de produits agricoles pour la production de biocarburants. Ces usages font l'objet d'un intérêt croissant de la part des politiques énergétiques et environnementales à la fois pour répondre au défi posé par l'épuisement des ressources naturelles fossiles et pour contribuer à atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, le recours aux produits d'origine agricole pour cet usage est aujourd'hui de plus en plus souvent questionné compte tenu des effets des changements d'utilisation de terres induits par la production de ces matières premières[98].

4.2.1. Évolution de la production des biocarburants en Europe et dans le monde jusqu'à 2050

Les productions de biocarburants en « 2010 » et les quantités de matières premières agricoles utilisées pour ces productions sont estimées à partir des informations provenant du rapport OCDE/FAO (2018) complétées par des données de l'USDA et FO-licht[99]. Afin de déterminer la demande en produits agricoles pour la production de biocarburants à l'horizon 2050, nous estimons tout d'abord l'évolution de la production de biocarburants en Europe et dans les autres régions du monde. Pour ce

[95] Dépendance nette ((imports-exports)/utilisations domestiques totales) de 43 et 47 % respectivement en 2010.

[96] Voir aussi Le Mouël et Schmitt, 2018.

[97] À l'exception des huiles végétales ; se référer au Chapitre 4 du Rapport technique sur ce point.

[98] Cet impact, largement débattu dans la littérature et ayant fait l'objet d'étude de la part de la Commission européenne, a finalement abouti à la Directive (UE) 2015/1513 qui vise explicitement la réduction des émissions de gaz à effet de serre produites par l'utilisation de terres agricoles pour la production de biocarburants et qui plafonne, dans l'objectif de réduire les changements d'affectation des sols indirects, la part des biocarburants de première génération (produits à partir de cultures alimentaires telles que la canne à sucre, le maïs, le blé, le colza, le soja ou encore la palmier à huile) à 7 % de l'énergie finale consommée dans les transports en 2020 (modification de l'article 3 de la Directive 2009/28/CE).

[99] Se référer au Chapitre 4 du Rapport technique pour plus de détails à la quantification de la situation initiale « 2010 ».

faire, on s'est appuyé sur les projections de production de biocarburants du rapport de la Commission Européenne « *EU Agricultural Outlook 2017-2030* » (EC, 2017) pour l'Europe et sur les projections de la FAO-OCDE « *Agricultural Outlook 2018-2027* » (OCDE/FAO, 2018) pour les autres régions du monde. Ces deux rapports supposent que le développement du marché des biocarburants dépend essentiellement des politiques énergétiques nationales et des mandats en cours au niveau de chaque pays, dont la Directive « Énergies renouvelables » (2009/28/CE) pour l'Europe[100]. Aussi, compte tenu de la faiblesse des investissements connus dans la recherche sur les biocarburants de deuxième génération (2G)[101], ces rapports supposent que la majeure partie des biocarburants sera encore produite à partir de matières premières agricoles et que la production de biocarburants 2G ne sera pas développée à grande échelle avant 2030, ni en Europe, ni dans le reste du monde.

Afin de projeter la production de biocarburants jusqu'en 2050, nous prolongeons ces projections en gardant constant le taux d'incorporation de biocarburants dans la demande d'énergie totale du secteur des transports entre 2030 et 2050[102]. Lorsque le prolongement de ces projections entre 2030 et 2050 conduit à une diminution de la production de biocarburants sous l'effet de la réduction de la demande d'énergie dans les transports (c'est le cas des régions européennes et de la région Océanie), nous maintenons le niveau de production de biocarburants de 2030 et considérons que la différence entre celui-ci et le niveau calculé pour 2050 correspond à la production de biocarburants 2G. Dans les autres régions, cela engendre une augmentation de la production de biocarburants par rapport à 2050 et on utilise alors directement cette production calculée pour 2050. La différence de productions entre 2030 et 2050 est là aussi supposée égale à la production de biocarburants 2G. On s'attend aussi à ce que le commerce de biocarburants reste marginal, les pays produisant davantage pour satisfaire leur demande domestique[103].

Au niveau mondial, les productions de biodiesel et d'éthanol augmenteraient respectivement de 126 % et 61 % par rapport à l'année initiale « 2010 » pour atteindre 42 millions de tonnes et 123 millions de tonnes en 2050 (contre 19 et 77 millions de tonnes en « 2010 »). L'augmentation de la production serait surtout due aux régions à pays émergents ou en développement. Dans les **régions à pays développés**, nos projections envisagent plutôt une stagnation relative de la production. En **Europe**, la production de biodiesel augmenterait de 19 % et celle d'éthanol de 15 %, mais la région resterait le premier producteur mondial de biodiesel en 2050 avec 11,3 millions de tonnes produites. Dans les autres régions du monde, la production de biodiesel et de bioéthanol augmenterait de façon importante dans toutes les régions, à l'exception de l'Océanie. Le **Brésil-Argentine** resterait le deuxième plus grand producteur de biodiesel avec 10,9 millions de tonnes. Cette région est suivie par le **Reste de l'Asie** avec environ 10 millions de tonnes et par le **Canada-USA** (6,5 millions de tonnes). Pour l'éthanol, **Canada-USA** et **Brésil-Argentine** resteraient les plus gros producteurs d'éthanol (respectivement 49 et 37 millions de tonnes). L'**Inde** et le **reste de l'Asie** verraient leur production augmenter très nettement et dépasser le **Reste de l'Amérique** (respectivement 6, 6,4 et 5 millions de tonnes).

Nos hypothèses relatives au développement de la 2G, conduisent à une part de biocarburants 2G équivalent à 20 % de la production de biocarburants pour le biodiesel, et 18 % pour l'éthanol dans le monde en 2050. En Europe, cette part des biocarburants 2G dans l'ensemble des biocarburants serait de 9 % tant pour le biodiesel que pour l'éthanol. La nature des produits agricoles qui pourront être utilisés pour produire ces biocarburants 2G, reste très difficile à imaginer. En l'absence d'informations plus précises, on a fait l'hypothèse (simplificatrice) que cette production de 2G n'utilisera que des coproduits, tels que des déchets, des résidus forestiers et des pailles de céréales. Puisque la production de ces coproduits n'utilise pas directement de surface agricole[104], le recours à ce type de matières premières serait particulièrement favorisé dans les pays en développement où la part de la 2G dans les biocarburants sera la plus forte[105]. Finalement, la majorité des biocarburants serait issue de la première génération et demanderait des matières premières agricoles pour leur production.

---

[100] La Directive « Énergies renouvelables » (2009/28/CE) impose 20 % d'énergies renouvelables dans le *mix* énergétique total en 2020 et 10 % d'énergies renouvelables dans le *mix* énergétique des transports. À noter que, depuis janvier 2018, une seconde version de RED existe et impose 12 % d'énergies renouvelables dans le *mix* énergétique des transports à l'horizon 2030. RED II impose aussi un pourcentage de biocarburants de seconde génération. Le rapport de la Commission européenne, sur lequel nous basons nos projections, ne considère pas la mise en place de la RED II qui suppose un renforcement de la directive jusqu'à 2030.

[101] Les biocarburants 2G sont produits à partir de ressources ligno-cellulosiques (résidus agricoles, bois, feuilles, papiers usagés, etc. mais aussi cultures annuelles ou pérennes dédiées telles que le triticale, le miscanthus, le peuplier, etc.).

[102] Nous avons projeté celle-ci sur la base du scénario « *Current policies* » du rapport World Energy Outlook 2016 de l'IEA (IEA, 2016), en la prolongeant entre 2040 et 2050 et en supposant une évolution identique à la période 2030-2040.

[103] Nous supposons donc ici que la consommation de chaque pays est égale à la production en 2050.

[104] À l'inverse des cultures énergétiques dédiées telles que Miscanthus, Switchgrass, des taillis à très courte rotation, etc.

[105] Due à l'augmentation plus forte de la demande de carburants fossiles dans les transports dans ces pays.

4.2.2. Évolution des quantités de matières premières agricoles utilisées pour la production des biocarburants

Pour projeter les quantités de matières premières agricoles utilisées pour la production de biocarburants de première génération entre « 2010 » et 2030, nous nous sommes appuyés à nouveau sur les rapports de la Commission européenne (2017) et de l'OCDE/FAO (2018). Lorsque les données ne sont pas disponibles dans ces rapports, on a conservé les mêmes hypothèses de répartition que dans la situation initiale jusqu'à 2030[106]. Le Tableau 4-2 présente les projections à 2050 de la demande en matières premières agricoles en Europe et dans le monde destinée à la production de biocarburants[107].

Tableau 4-2. Évolution de la demande de produits agricoles en Europe et dans le monde entre « 2010 » et 2050 (en millions de tonnes de produits agricoles)

	Monde				Europe			
	"2010"	2050	Variation (Mt)	Variation (%)	"2010"	2050	Variation (Mt)	Variation (%)
Maïs	141,5	174,1	32,5	23 %	3,9	4,1	0,21	5 %
Blé	12,4	14,1	1,6	13 %	6,0	6,2	0,20	3 %
Autres céréales	2,5	2,8	0,3	11 %	2,0	2,0	0,07	3 %
Riz	0,5	0,5	0,0	-1 %	0,0	0,0	0,00	
Total céréales	**157,0**	**191,4**	**34,4**	**22 %**	**11,8**	**12,3**	**0,47**	**4 %**
Racines et Tubercules	**3,8**	**11,0**	**7,2**	**190 %**	**0,0**	**0,0**	**0,00**	
Plantes et produits sucriers	**302,7**	**426,4**	**123,8**	**41 %**	**15,3**	**16,2**	**0,82**	**5 %**
Huile de soja	6,0	12,0	6,0	101 %	1,3	1,3	0,03	3 %
Huile de palme	3,4	9,1	5,7	165 %	1,0	1,0	0,02	2 %
Huile de colza	6,7	7,3	0,6	9 %	6,4	6,5	0,09	1 %
Huile de tournesol	0,2	0,2	0,0	3 %	0,2	0,2	0,01	3 %
Autres huiles	0,2	0,6	0,4	224 %	0,0	0,0	0,00	
Total Huiles	**16,5**	**29,3**	**12,8**	**77 %**	**9,0**	**9,1**	**0,16**	**2 %**

Ainsi, dans le monde, la demande additionnelle de produits agricoles (par rapport à « 2010 ») serait, pour la production d'éthanol, de 34,4 millions de tonnes de céréales (dont 32,5 millions de tonnes de maïs), 7,2 millions de tonnes de racines et tubercules et 123,8 millions de tonnes de canne à sucre et de betteraves, et 12,8 millions de tonnes d'huiles végétales pour la production de biodiesel. Ces demandes additionnelles représenteraient 2 % de la production mondiale « 2010 » de céréales hors riz (4 % pour le maïs), 6 % de la production mondiale de canne à sucre et de betteraves, moins de 1 % de la production mondiale de racines et tubercules et 9 % de la production mondiale d'huiles végétales. Peu de changements sont observés entre « 2010 » et 2050 dans la répartition entre les différents groupes de produits. La moitié de la production d'éthanol se ferait toujours à partir de céréales (un quart de cette production étant dû au seul maïs), même si la part des céréales diminue en faveur de quantités plus importantes issues de la canne à sucre. Les utilisations de racines et tubercules (manioc) augmentent fortement mais leur part dans le total reste faible. En revanche, au sein des huiles, ce sont l'huile de soja et surtout l'huile de palme qui prendraient le plus d'importance en part relative, au détriment de l'huile de colza dont la part diminue. Au sein du groupe des céréales, des faibles changements en faveur du maïs et des autres céréales, par rapport au blé et au riz, seraient constatés.

En Europe, les augmentations de la demande de produits agricoles destinés aux biocarburants seraient très faibles, à cause notamment du développement des biocarburants 2G et de la place que pourraient prendre d'autres matières premières, telles que les huiles/graisses recyclées (non présentées ici). La production de biodiesel à partir d'huiles végétales serait ainsi

[106] Par exemple, le rapport de la Commission européenne (2017) ne donne aucune information sur la répartition de la production entre les états-membres, ni sur la répartition entre différentes huiles végétales utilisées pour la production de biodiesel.

[107] Sont ici présentées les évolutions de la demande des matières premières agricoles qui entrent dans les bilans du modèle GlobAgri-AE2050. Les évolutions des autres matières premières (les mélasses et l'alcool pour la production d'éthanol, les huiles/graisses recyclées pour la production de biodiesel) sont bien évidemment prises en compte dans notre analyse, et sont présentées plus en détail dans le Rapport technique.

amenée à décroitre au profit de ces produits du fait de la possibilité de double-comptage des biocarburants issus de ces composants (admise par la Directive « Énergies renouvelables »). On s'attend en revanche à une augmentation de la production d'éthanol à partir de la betterave et des mélasses, mais le blé et le maïs resteraient les matières premières privilégiées en Europe (respectivement 39 % et 27 % de la production totale d'éthanol, contre 24 % pour les betteraves). Au total, 470 000 tonnes de céréales, 820 000 tonnes de betteraves et 160 000 tonnes d'huiles végétales seraient demandés en plus en 2050 par rapport à « 2010 » pour la production d'éthanol et de biodiesel, soit respectivement l'équivalent de 0,2, 0,7 et 0,9 % de leur production en Europe en « 2010 ». Au final, la répartition entre les différentes matières premières agricoles pour produire des biocarburants reste quasi-constante entre « 2010 » et 2050.

4.3. Synthèse partielle

Le Tableau 4-3 résume les hypothèses d'évolutions à 2050, dans les scénarios de référence, des variables et paramètres d'entrée du modèle Globgri-AE2050 décrivant la demande en produits agricoles.

Tableau 4-3. Hypothèses d'évolution à 2050 des variables et paramètres de demande dans GlobAgri-AE2050

Variable		Hypothèse d'évolution	
Consommation humaine du produit *i* dans la région *j*	Démographie	Projections médianes de l'ONU (2017) (pas d'hypothèse complémentaire en lien avec de possibles accentuations de processus démographiques ou migratoires)	
	Régimes alimentaires	**Régimes "tendanciels"** : projections Alexandratos et Bruinsma (2012), qui prolongent les trajectoires passées et poursuivent les transitions nutritionnelles en cours	**Régimes "sains"** : d'après l'hypothèse d'évolution à 2050 dite "Healthy" de Le Mouël *et al.* (2018)
Autres utilisations (industrielles et énergétiques) du produit *i* dans la région *j*	Production de biocarburants	Demande estimée d'après le prolongement des projections d'évolution de la production de biocarburant établies par la Commission Européenne (2017) et la FAO-OCDE (2018) respectivement aux horizons 2030 et 2027.	
	Autres usages énergétiques et non alimentaires	Demande supposée constante à l'horizon 2050, égale à son niveau de "2010".	
Part des pertes liées au stockage, à la distribution et au transport dans les utilisations domestiques totales du produit *i* dans la région *j*		Supposée constante à l'horizon 2050, égale à sa valeur de "2010".	

La demande alimentaire humaine, combinaison de la démographie et des régimes alimentaires, est le déterminant majeur des besoins domestiques en produits agricoles. Deux options d'évolution des régimes sont envisagées dans cette étude pour apporter un éclairage sur la manière dont les structures des consommations futures pourraient influencer l'évolution des surfaces, des productions et des échanges mondiaux à l'horizon 2050, au-delà de leurs impacts sur la santé humaine.

Les régimes dits « tendanciels » résultent du prolongement des tendances régionales passées. Ils se traduisent par la stabilisation des apports caloriques individuels dans les régions développées, et leur augmentation dans les régions émergentes et en développement. Cette augmentation serait néanmoins **insuffisante pour combler le nécessaire rattrapage nutritionnel de l'Afrique subsaharienne**. **Les régimes dits « sains » illustrent une transition radicale vers des régimes plus favorables à la santé**. Ces régimes se caractérisent à la fois par des consommations à la hauteur des besoins énergétiques quotidiens, et leur réorientation vers une diète plus équilibrée et diversifiée. Notons que leur adoption nécessiterait une **diminution des apports caloriques quotidiens dans toutes les régions du monde, à l'exception notable de l'Afrique subsaharienne, de l'Inde et du reste de l'Asie**. Elle entrainerait également une baisse de la consommation de produits animaux en Europe et dans les autres régions développées par rapport à « 2010 », mais son augmentation en Afrique subsaharienne, en Inde, et, plus modérément, en Afrique du Nord. L'adoption généralisée de régimes « sains » tendrait ainsi à réduire (sans toutefois les annuler) les disparités régionales qui persisteraient avec des régimes « tendanciels ».

Quelle que soit l'hypothèse adoptée quant à l'évolution des régimes, la demande alimentaire exploserait en Afrique subsaharienne, en Inde et dans le reste de l'Asie, compte tenu de leur démographie. **Dans la plupart des autres régions, la poursuite tendancielle des consommations induirait une augmentation de la demande alimentaire, que l'adoption de régimes « sains » atténuerait, voire annulerait** (Chine, Canada-USA, Brésil-Argentine). Du fait du déclin démographique de la Pologne, de l'Europe de l'Est et de l'Europe du Sud, **l'Europe verrait sa demande alimentaire totale stagner sous régimes « tendanciels » et diminuer sous régimes « sains »**.

Importante dans les débats relatifs aux leviers d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et donc du changement climatique, **la production de biocarburants à partir de matières premières agricoles pèse en revanche peu sur la demande mondiale en produits agricoles**. Du fait de la logique globalement tendancielle qui sous-tend la construction des scénarios, les projections retenues dans les scénarios de référence sont formulées dans la lignée des restrictions actuelles du développement des usages énergétiques des produits agricoles (qui n'exclut pas bien sûr le recours à d'autres types de biomasse). Cette hypothèse est donc moins favorable à l'expansion des biocarburants issus de matières agricoles que celles retenues dans d'autres exercices plus directement centrés sur les questions climatiques. Elle suppose qu'en 2050, la demande mondiale en matières premières agricoles destinées aux usages énergétiques resterait environ 10 fois inférieure à la demande alimentaire humaine, pesant donc peu sur la demande mondiale en produits agricoles. Une ampleur plus forte donnée à leur développement ne devrait cependant pas modifier les conclusions que l'on pourrait tirer des résultats des simulations qui sont présentés au chapitre suivant.

Chapitre 5. Résultats à l'horizon 2050 des simulations des quatre scénarios de référence

Les projections à l'horizon 2050 de chacune des composantes des systèmes alimentaires mondiaux, telles que présentées dans les chapitres 3 et 4, ont été mobilisées comme variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 (*cf.* Chapitre 1). Les simulations ainsi réalisées permettent d'examiner les conséquences de ces évolutions sur les surfaces utilisées par l'agriculture dans chacune des 21 régions du monde, sur leurs niveaux régionaux de production, d'importations et d'exportations ainsi que sur la structure de ces productions et échanges en termes de répartition des produits agricoles. Si la plupart des variables ont été projetées suivant une seule hypothèse d'évolution à l'horizon 2050[108], **deux variables-clés du modèle ont fait l'objet d'hypothèses contrastées : les régimes alimentaires, d'une part ; les rendements végétaux, de l'autre**.

En premier lieu, il s'agit de voir **dans quelle mesure les évolutions des comportements alimentaires des populations mondiales peuvent influencer les équilibres emplois-ressources agricoles permettant d'assurer un certain niveau de disponibilités caloriques pour l'ensemble de la population mondiale**. Pour examiner le rôle de ce point central dans les débats contemporains portant tant sur l'environnement que sur la sécurité alimentaire mondiale, on a retenu une évolution « tendancielle » des régimes alimentaires, prolongeant les transitions nutritionnelles à l'œuvre ces dernières décennies, et une rupture dans ces tendances avec l'adoption généralisée de régimes alimentaires plus « sains », c'est-à-dire se rapprochant au mieux des recommandations nutritionnelles de l'OMS.

En second lieu, **on s'interroge sur le poids des incertitudes relatives aux effets respectifs du changement climatique et des évolutions techniques sur les rendements des produits végétaux dans l'évolution des surfaces, des productions et des échanges mondiaux de produits agricoles à l'horizon**. C'est pourquoi nous avons considéré deux niveaux de rendements végétaux : (i) des rendements « hauts » permis par le rythme soutenu des évolutions techniques et la pleine valorisation de l'effet CO_2 par les plantes, qui reviennent à prolonger jusqu'à 2050 le ralentissement de la croissance moyenne du rendement observé ces deux dernières décennies ; (ii) des rendements « bas » qui résultent d'évolutions techniques plus modérées et d'une absence de valorisation de l'effet CO_2 par les plantes.

L'assemblage de ces deux jeux d'hypothèses aboutit à la construction des **quatre scénarios dits « de référence »** suivants :

- Régimes « tendanciels » et rendements végétaux « bas » (**Rég. TEND. X Rdts BAS**) ;
- Régimes « tendanciels » et rendements végétaux « hauts » (Rég. TEND. X Rdts HAUTS) ;
- Régimes « sains » et rendements végétaux « bas » (**Rég. SAINS X Rdts BAS**) ;
- Régimes « sains » et rendements végétaux « hauts » (Rég. SAINS X Rdt HAUTS).

C'est sur la base de ces quatre scénarios qu'ont été analysés les résultats des projections à l'horizon 2050 des équilibres emplois-ressources agricoles de chacune des huit régions européennes et des 13 autres régions du monde. Une analyse de sensibilité sur le rôle joué par les autres variables du modèle a également été menée. Ce chapitre en présente quelques-uns des résultats-clés. L'ensemble des résultats des simulations est reporté dans les Annexes de ce rapport de synthèse. Nous renverrons à celles-ci à mesure des besoins de l'analyse des résultats.

L'analyse des résultats de simulation nécessite de bien comprendre la façon dont fonctionne le modèle GlobAgri-AE2050. Pour chaque région du monde, celui-ci détermine les surfaces agricoles (surfaces cultivées et en prairies permanentes) nécessaires et suffisantes en 2050 pour répondre à la demande intérieure en produits agricoles, tout en (i) maintenant, si possible, ses parts de marchés à l'export et ses taux d'importations[109], (ii) en respectant les conditions techniques fixées de façon exogène en matière de productions végétales et animales (rendements végétaux, poids relatifs des cultures pluviales et irriguées, intensités culturales, efficiences animales), et (iii) dans les limites de la disponibilité en surfaces cultivables,

[108] Comme on l'a vu dans les chapitres 3 et 4, c'est le cas, côté demande, pour les évolutions démographiques (projections médianes de l'ONU) et les utilisations autres qu'alimentaires, et, côté offre, pour les efficiences animales, les intensités culturales et les surfaces cultivables

[109] Rappelons que les parts de marché à l'export et les taux d'importations sont, avant ajustements par le modèle, considérés comme inchangés entre « 2010 » et 2050.

également fixée de façon exogène pour chacune des régions du monde[110]. Dans le cas où une région viendrait « buter » sur sa contrainte de terres cultivables en première estimation (besoin en surfaces cultivées excédant la disponibilité en terres cultivables), elle ne serait pas en capacité de satisfaire à la fois sa demande domestique et ses niveaux d'échanges internationaux. Le modèle ajuste alors les estimations en réduisant tout d'abord les exportations régionales (diminution de ses parts de marchés à l'export), puis en augmentant ses importations (augmentation de ses taux d'importations). Les conséquences de la modification de la place de la région sur les marchés mondiaux induite par ces ajustements sont alors prises en charge par les régions du monde disposant de suffisamment de surfaces cultivables pour ce faire. Dans les résultats des simulations présentés ci-après, ce cas de figure ne se présente que pour les régions Afrique du Nord et Proche et Moyen-Orient, déjà contraintes en terres en « 2010 », et qui le restent lorsque l'on met en œuvre à l'horizon 2050 l'ensemble des hypothèses des quatre scénarios de référence.

Ainsi, les surfaces potentiellement cultivables n'étant que très faiblement limitantes dans les scénarios de référence, le modèle autorise chaque région du monde (hors Afrique du Nord et Proche et Moyen-Orient) à étendre autant que de besoin ses surfaces cultivées (et herbagères) afin de satisfaire sa demande domestique, tout en maintenant ses taux d'importation et en préservant ses parts de marché à l'export actuels, et ce aux conditions techniques que nous avons fixées pour 2050. En conséquence, le modèle reproduit de façon assez mécanique certaines des caractéristiques *ex ante* des systèmes alimentaires mondiaux. Il estime « mécaniquement » la production (et le besoin en surfaces cultivées qui en découlerait) sans tenir compte d'ajustements possibles en lien avec les niveaux des prix des matières agricoles et de possibles fluctuations de ces prix. Le cas échéant, il peut « autoriser » certaines régions à cultiver en 2050 moins de terres qu'en 2010, laissant apparaître ce que nous appellerons par la suite un « surplus potentiel de terres ». Par construction du modèle, cette diminution des surfaces cultivées entre « 2010 » et 2050 peut même concerner des régions qui resteraient importatrices nettes en 2050, alors qu'il est possible qu'en réalité, les régions concernées mobilisent leur disponibilité en surfaces cultivables pour réduire leurs taux d'importation et augmenter leur production domestique (si les conditions de marché sont favorables à la rentabilité d'une telle augmentation plutôt qu'au recours aux importations).

L'intérêt des simulations présentées ici n'est donc pas de modéliser les futurs les plus probables ou les plus vraisemblables. Il est de mettre en lumière les conséquences que pourraient avoir, sur les bilans matières de chaque région du monde à l'horizon 2050, les évolutions de chacune des composantes de leur système alimentaire inséré dans les échanges mondiaux. Ce qui constitue, de fait, une des limites du modèle (l'absence de rôle donné aux prix dans les ajustements) peut également être vu comme une de ses forces, celle de permettre : (i) l'examen individuel des effets de chacune des composantes du système et (ii) la mise en évidence des régions pouvant disposer, à terme (2050), de marges de manœuvres en matière de surfaces cultivables ou, à l'inverse, de régions pouvant faire face à des situations foncières tendues (en termes d'expansion des surfaces agricoles au détriment de milieux naturels). On reprendra au chapitre 6 la question de l'apparition de ces marges de manœuvre et de ces situations de tensions de façon à voir si les premières ne peuvent être mobilisées pour réduire les secondes.

5.1. Besoins en surfaces cultivées à l'horizon 2050 selon les composantes des systèmes alimentaires des régions d'Europe et du monde

Pour analyser les rôles respectifs des différentes variables du système sur son état à l'horizon 2050, on a procédé à une série de simulations « pas-à-pas », c'est-à-dire en introduisant successivement les évolutions à l'horizon 2050 de chacune des variables d'entrée du modèle. On commence par les variables de demande, de façon à évaluer le rôle respectif de la dimension démographique et de la dimension régime alimentaire, et on poursuit avec les variables d'offre (efficiences animales, intensités culturales, rendements végétaux), en tenant compte *in fine* des ajustements des équilibres dus aux contraintes en terres cultivables qui pèsent directement sur les régions concernées, et, par contrecoup, sur toutes les autres régions.

[110] Rappelons que la contrainte en terres telle que modélisée dans GlobAgri-AE2050 ne porte que sur les surfaces cultivées (*cf.* Chapitre 1). L'extension des surfaces en prairies permanentes est donc libre de contrainte. Nous discuterons néanmoins de cette possibilité d'extension « infinie » des surfaces toujours en herbe (*cf.* Section 5.2).

5.1.1. Évolutions estimées en Europe

Du point de vue de l'**ensemble européen**, les effets démographiques et des régimes alimentaires « tendanciels » interviennent à peu près à parts égales dans la détermination de l'effet de la demande domestique sur le besoin européen en terres cultivées (Figure 5-1)[111]. Ce double effet est néanmoins largement compensé par la combinaison des effets des évolutions des intensités culturales et des rendements végétaux, à tel point que, même sous hypothèse de rendements « bas », l'ensemble européen n'aurait pas besoin de mobiliser la totalité des terres qui y étaient cultivées en « 2010 » pour satisfaire ses propres besoins tout en maintenant ses taux d'importations et en préservant ses parts de marchés à l'exportation[112]. L'apparition d'un tel surplus potentiel de terres par rapport à « 2010 » serait accentuée sous hypothèse de rendements « hauts ». Le surplus potentiel total de terres de l'Europe passerait alors de 4 millions d'hectares (Mha) sous hypothèse de rendements « bas » à 21 Mha sous hypothèse de rendements « hauts », soit une diminution de -3 % à -17 % du besoin total en surfaces cultivées en Europe relativement à « 2010 ».

Une adoption généralisée de régimes « sains » (à l'échelle mondiale) renforcerait encore cette tendance. En effet, prise isolément, la poursuite tendancielle des régimes alimentaire nécessiterait une expansion des surfaces cultivées par rapport à « 2010 », que l'adoption de régimes « sains » annulerait quasiment (Figure 5-1). Sous l'hypothèse de rendements « bas », l'Europe pourrait alors dégager un surplus potentiel de terres de 14 Mha par rapport à « 2010 » (soit l'équivalent de 11 % de ses surfaces cultivées de « 2010 »), surplus qui passerait à près de 30 Mha (soit 23 % des surfaces cultivées de « 2010 ») dans le cas de rendements « hauts ».

Les régions européennes se différencient entre elles tout d'abord par leur dynamisme démographique, dont l'effet sur le besoin en terres cultivées est majeur. Ainsi, l'**Europe de l'Est**, la **Pologne** et l'**Europe du Sud**, dont les populations tendraient à décroître à l'horizon 2050, se distinguent par un effet démographique de très faible ampleur sur le besoin en surfaces cultivées, ce qui leur permet de dégager un surplus de terres par rapport à « 2010 » proportionnellement plus fort que les autres régions européennes (Tableau 5-1). À cet effet démographique, vient s'ajouter, pour ces mêmes régions, un surplus potentiel de terres mécaniquement plus important quand on se place dans l'hypothèse de rendements « hauts ». En cumulant ces deux effets (démographie et rendements « hauts »), ces trois régions européennes seraient susceptibles de dégager en 2050 un surplus de terres par rapport à leurs surfaces cultivées en « 2010 » variant, selon l'hypothèse d'évolution des rendements, entre 1 et 7 Mha pour l'Europe de l'Est, entre 0,4 et 3 Mha pour la Pologne et entre 6 et 10 Mha pour l'Europe du Sud (Figure 5-2). Au total, ce surplus pourrait représenter jusque 30 % de la surface cultivée en « 2010 » en Europe. Ce surplus serait amené à augmenter encore si des régimes alimentaires « sains » étaient mondialement adoptés. Néanmoins, l'effet du passage à des régimes « sains » est ici moins prononcé que dans d'autres régions européennes du fait de la plus forte proximité de leurs régimes alimentaires de « 2010 » avec leurs régimes « sains » de 2050.

Bien que moins directement concernées par de telles évolutions démographiques, l'**Allemagne** et l'**Europe centrale**, dont la population tendrait à stagner à l'horizon 2050**,** seraient également en mesure de dégager un surplus de terres dans le cas de rendements « hauts », se retrouvant ainsi dans la même situation que les trois régions précédentes. Cette capacité serait cependant plus limitée, représentant de l'ordre de 15 % des surfaces cultivées en « 2010 » en régimes « tendanciels » (soit

[111] L'évolution des efficiences animales (tous secteurs d'élevage) à l'horizon 2050 a également tendance à accentuer l'augmentation du besoin en terres cultivées, effet qui s'explique par l'augmentation relative de la part des fourrages « de qualité » (fourrages cultivés et prairies temporaires) dans les rations de vaches laitières en 2050 par rapport à « 2010 » (cette évolution des rations des vaches laitières est nécessaire pour satisfaire l'augmentation de la productivité de ce secteur à l'horizon 2050). Sans cette modification de la composition des rations des vaches laitières, l'effet de la projection des efficiences animales des secteurs ruminants (et monogastriques) aurait au contraire légèrement diminué le besoin en surfaces cultivées. Les effets cumulés des évolutions des efficiences animales tous secteurs confondus sur les besoins en terres en Europe reste faible par rapport à celui de la demande humaine, puisque son amplitude est équivalente à moins de 10% de l'effet cumulé de la démographie et des régimes, et ce quelle que soit l'évolution de ces derniers. La méthode de projection des efficiences animales est expliquée plus en détail dans le chapitre 3.

[112] On pourra être surpris par l'importance des effets attribués aux évolutions des intensités culturales dans une région comme l'Europe. Comme on l'a vu plus haut (Section 3.4), on a, dans cette étude, utilisé les coefficients des intensités culturales annuelles (ICA) et leurs évolutions à 2050 proposés par la FAO (2018). La FAO envisage ainsi des évolutions d'ICA en Chine (+18 %), en Europe (+14 %), en Amérique du Nord (+14 %) et dans l'ex-URSS (+8 %), bien plus importantes que dans les autres régions du monde, où ces coefficients n'augmentent que de quelques points de pourcentage, voire même diminuent comme en Afrique du Nord et au Proche et Moyen-Orient. Les explications de ces évolutions avancées par la FAO (2018) sont assez vagues : elles seraient dues, selon les données FAO-IIASA-GAEZ V4, à l'allongement des périodes de croissance permettant d'insérer deux cultures par campagne ainsi que de différents facteurs relevant du progrès technique (irrigation). Ce point est, comme on le voit ici, assez crucial dans les projections des équilibres emplois-ressources. Il est souvent peu documenté dans les travaux relatifs à la sécurité alimentaire mondiale et mériterait donc des investigations complémentaires qui n'ont pu être menées dans le cadre de cette étude.

2 Mha pour l'Allemagne et 0,9 Mha pour l'Europe centrale) et de l'ordre de 20-25 % en régimes « sains » (soit 3 Mha pour l'Allemagne et 1,2 Mha pour l'Europe centrale).

La **France**, le **Royaume-Uni** et le **reste de l'Europe** ne seraient pas concernées par une diminution du besoin en surfaces cultivées par rapport à « 2010 ». Ces régions sont caractérisées par des dynamiques démographiques encore positives, et la croissance des rendements végétaux y est relativement modérée même sous hypothèse de rendements « hauts ». Leurs besoins en surfaces cultivées en 2050 seraient, peu ou prou, identiques aux surfaces cultivées en « 2010 ».

Figure 5-1. Besoins de l'Europe en terres cultivées à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 » sous l'effet de chacune des composantes du système alimentaire européen, prises successivement (en milliers d'ha)

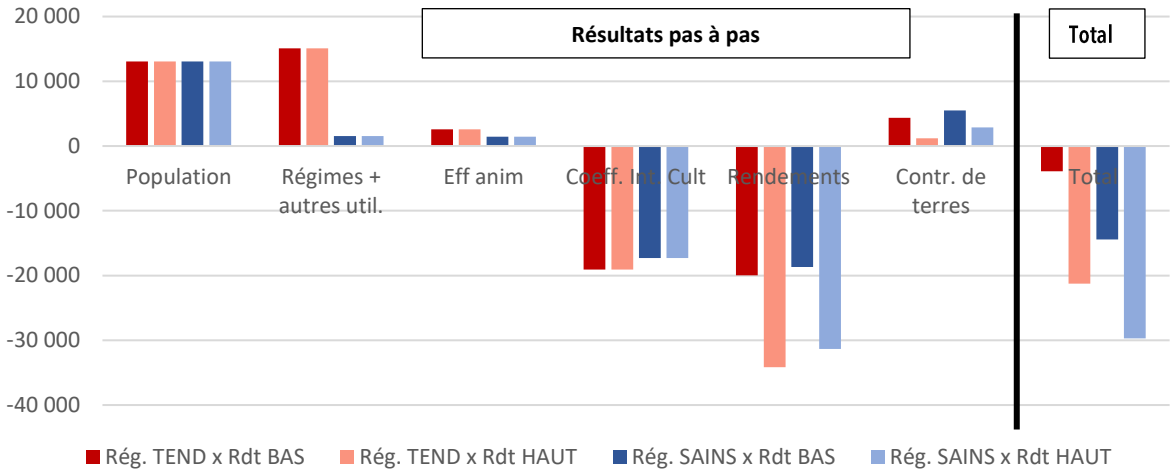
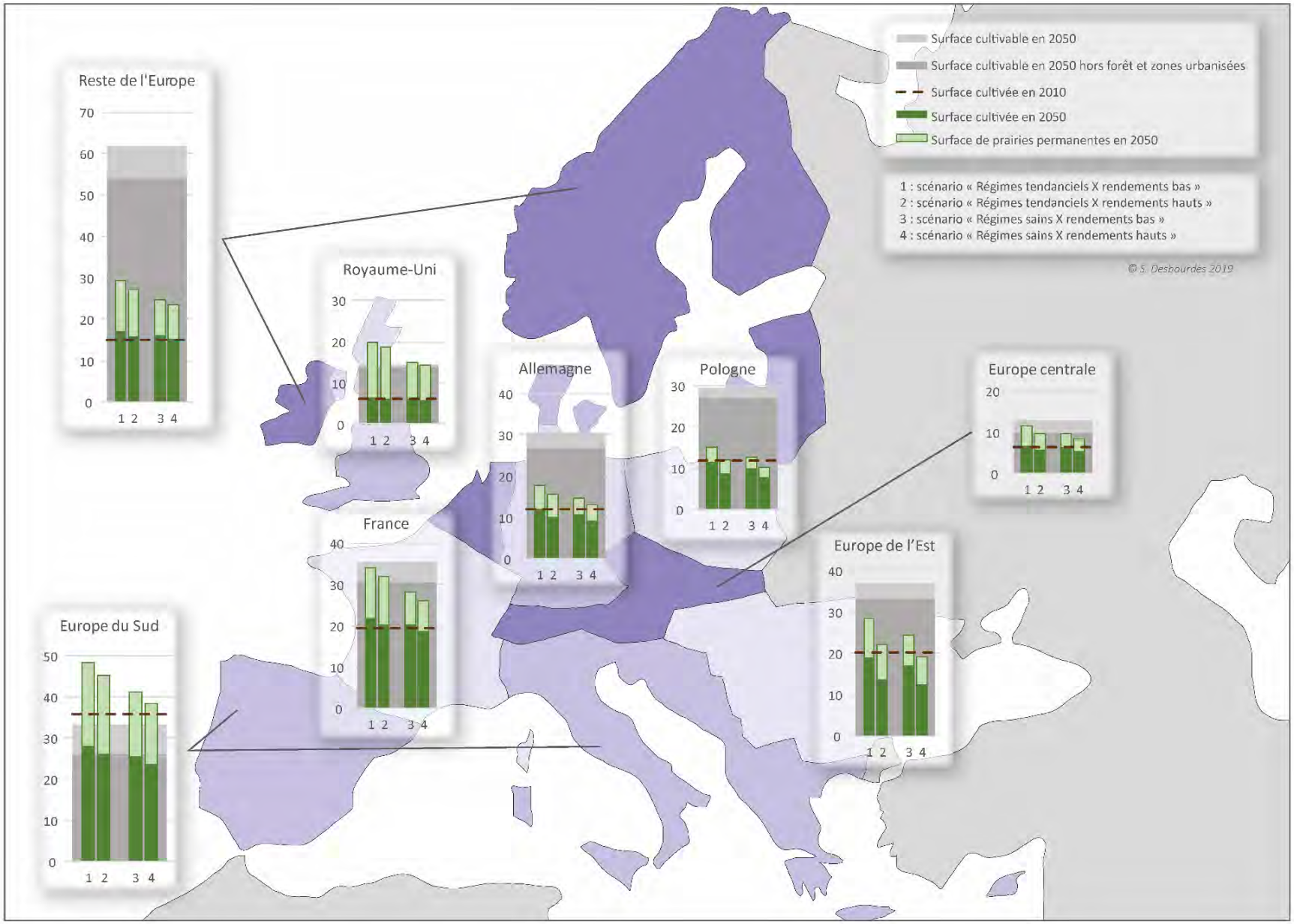


Tableau 5-1. Effet des composantes du système alimentaire de chaque région européenne sur son besoin en terres cultivées par rapport à « 2010 » (en milliers d'ha)

		Surfaces cultivées "2010"	+ Pop 2050	+ Rég. alim. + Autres util.	+ Eff anim.	+ Int cult. (ICA)	Effets rdts "bas" + Rdts "bas"	Effets rdts "bas" + Contr. de terres	Total **Rdts "bas"**	Effets rdts "hauts" + Rdts "hauts"	Effets rdts "hauts" + Contr. de terres	Total **Rdts "hauts"**
France	Rég. Tend.	19 300	+4 266	+2 708	+312	-3 209	-3 239	+747	**+1 586**	-3 567	+288	**+799**
	Rég. Sains			+338	+155	-2 904	-3 037	+967	**-214**	-3 071	+516	**-699**
Allemagne	Rég. Tend.	12 100	+1 600	1 399	+184	-1 843	-2 079	+519	**-221**	-3 459	+112	**-2 008**
	Rég. Sains			-457	+223	-1 624	-1 863	+549	**-1 572**	-3 070	+342	**-2 986**
Royaume-Uni	Rég. Tend.	6 100	+1 266	+534	+221	-977	-1 020	+125	**+149**	-990	-6	**+48**
	Rég. Sains			+121	+171	-921	-1 003	+169	**-197**	-1 061	+126	**-298**
Pologne	Rég. Tend.	11 700	+73	1 345	1 267	-1 738	-1 843	+477	**-420**	-4 189	+153	**- 3 090**
	Rég. Sains			-89	+886	-1 519	-1 640	+484	**-1 806**	-3 655	+277	**-4 027**
Europe du Sud	Rég. Tend.	36 000	+1 172	+3 296	-646	-4 804	-5 603	+903	**-5 682**	-9 288	+362	**-9 908**
	Rég. Sains			+30	-979	-4 369	-5 218	+1 400	**-7 965**	-8 644	+463	**-12328**
Europe de l'Est	Rég. Tend.	20 300	+741	+2 730	+55	-2 871	-2 517	+426	**-1 436**	-7 460	+111	**-6 695**
	Rég. Sains			+260	+26	-2 570	-2 334	+601	**-3 276**	-6 634	+135	**-8 042**
Europe centrale	Rég. Tend.	6 500	+993	+793	+249	-1 032	-969	+219	**+252**	-1 956	+27	**-927**
	Rég. Sains			+224	+206	-959	-938	+257	**-216**	-1 873	+153	**-1 255**
Reste de l'Europe	Rég. Tend.	15 200	+2 954	2 296	+956	-2 581	-2 710	+938	**+1 853**	-3 254	+137	**508**
	Rég. Sains			+1 130	+743	-2 415	-2 651	+1 059	**+820**	-3 350	+886	**-52**
Total Europe	Rég. Tend.	127 100	+13 066	+15 099	+2 597	-19 056	-19 980	+4 354	**-3 920**	-34 163	+1 184	**-21 273**
	Rég. Sains			+1 556	+1 433	-17 280	-18 685	+5 485	**-14 425**	-31 358	+2 898	**-29 686**

Figure 5-2. Surfaces cultivées et surfaces en prairies permanentes à l'horizon 2050 par région européenne dans les 4 scénarios de référence (en Mha)



INRAE – Rapport de synthèse de l'étude « Agricultures européennes 2050 » Février 2020

5.1.2. Évolutions estimées dans le reste du monde

La situation dans les autres régions du monde est bien plus contrastée que la situation européenne ou que ce que prêterait à penser une analyse menée au niveau mondial considéré comme un seul ensemble (Figure 5-3). En effet, les résultats de simulation montrent qu'**à l'échelle mondiale**, l'effet démographique dominerait assez largement celui des régimes alimentaires, et que le passage de régimes alimentaires « tendanciels » à des régimes alimentaires « sains » ne réduirait que peu le besoin en terres cultivées porté par la croissance de la demande alimentaire mondiale qui se répercute sur l'offre agricole. De la même façon, les effets rendements domineraient très largement les autres effets de l'offre (efficiences animales et intensités culturales). Enfin, la disponibilité en terres cultivables serait limitante dans les deux régions de l'**Afrique du Nord** et du **Proche et Moyen-Orient**, sans toutefois modifier profondément les équilibres emplois-ressources à l'échelle mondiale du fait du faible poids relatif de ces deux régions dans les échanges mondiaux[113]. Au final, les effets rendements ne compenseraient les effets de demande que sous hypothèse de rendements « hauts » en 2050. Dans ce cas, il n'y aurait pas d'extension des surfaces cultivées mondiales à l'horizon 2050, qui pourraient même légèrement diminuer à la fois sous hypothèse de régimes alimentaires « tendanciels » (-11 Mha) et « sains » (-52 Mha). En revanche, dans le cas où les évolutions des rendements végétaux seraient plus modérées (rendements « bas »), le besoin en terres cultivées s'accroitrait de +14 % (+223 Mha) sous régimes « tendanciels » et de +13 % (+194 Mha) sous régimes « sains » par rapport à « 2010 ».

Dans ce contexte, les évolutions qui caractérisent la région **Canada-USA** s'apparentent assez largement à celles simulées pour les régions européennes (Tableau 5-2). L'augmentation de la demande agricole sous l'effet de la démographie y serait cependant plus marquée, tout comme l'effet d'une évolution tendancielle des régimes alimentaires, ce qui se traduirait par une forte extension du besoin en terres cultivées portée par la demande en produits agricoles. Cette pression foncière se réduirait drastiquement sous l'hypothèse d'un passage à des régimes alimentaires « sains », l'effet de la composante nutritionnelle inversant alors la tendance à l'expansion des surfaces cultivées. De leur côté, les effets de l'évolution des rendements et des intensités culturales sont sensiblement de même ampleur qu'en Europe. Ainsi, le besoin en terres cultivables est en 2050 supérieur à ce qu'il était en « 2010 » dans le cas où se combinent « régimes tendanciels X rendements bas ». Dans les trois autres cas, la région Canada-USA serait en mesure de dégager un surplus conséquent de terres cultivables par rapport à « 2010 », équivalent à 16 Mha (soit 8 % des surfaces cultivées de « 2010 ») sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements hauts » ou de « régimes sains X rendements bas », et jusqu'à 44 Mha (23 % des surfaces cultivées de « 2010 ») quand se combinent « régimes sains X rendements hauts » (Figure 5-4).

Le cas de la région constituée par les pays de l'**ex-URSS** est encore plus spectaculaire : les surplus de terres que cette région serait en capacité de dégager par rapport à « 2010 » sont de 54 Mha (soit 27 % des surfaces cultivées en « 2010 ») dans le cas de « régimes alimentaires tendanciels X rendements bas », et jusqu'à 83 Mha (40 % des surfaces cultivées de « 2010 ») dans le cas de « régimes sains X rendements hauts ». Les composantes de la demande en produits agricoles sont responsables de ce phénomène pour une large partie. En effet, les évolutions démographiques et les effets des régimes alimentaires y sont très atténués, et très amplement compensés par des effets rendements assez marqués, notamment sous hypothèse haute des évolutions de ces derniers (Tableau 5-2).

La **Chine** se distingue par un effet démographique très faible dû au fort ralentissement de la croissance de sa population attendue à cet horizon 2050. Bien que l'effet des évolutions de rendements végétaux y soit bien plus modéré qu'ailleurs (tant sous hypothèse basse que haute), ce seul effet démographique permettrait à la Chine d'être en capacité de dégager un surplus de terres, même sous l'hypothèse « régimes tendanciels X rendements bas ». Ce surplus, limité à 5 Mha si les régimes évoluent tendanciellement, serait bien plus important dans le cas d'un passage à des régimes alimentaires « sains » (Tableau 5-2). Les surplus de terres par rapport à « 2010 » seraient alors de 28 Mha (soit 23 % des surfaces cultivées en « 2010 ») sous hypothèse de rendements « bas », et de 36 Mha (29% des surfaces cultivées en « 2010 ») sous hypothèse de rendements « hauts ».

[113] Ceci ne signifie en rien qu'il faille négliger la situation de dépendance aux importations dans laquelle sont aujourd'hui ces deux régions, situation qui aura tendance à s'aggraver à l'horizon 2050, comme on l'a largement montré lors d'une précédente étude (Le Mouël et Schmitt, 2018).

Figure 5-3. Besoins en terres cultivées dans l'ensemble du Monde à l'horizon 2050 de chacune des composantes des systèmes alimentaires, prises successivement (en milliers d'ha)

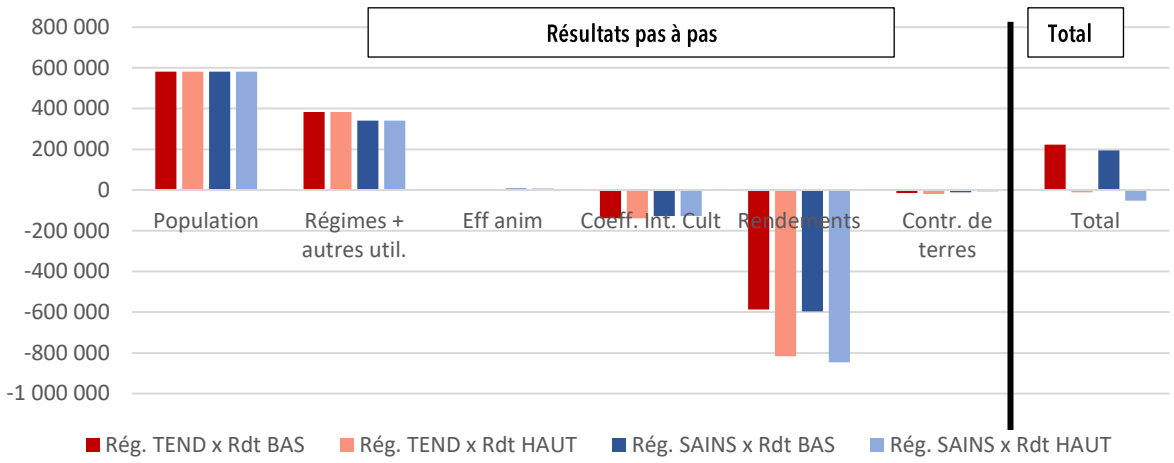
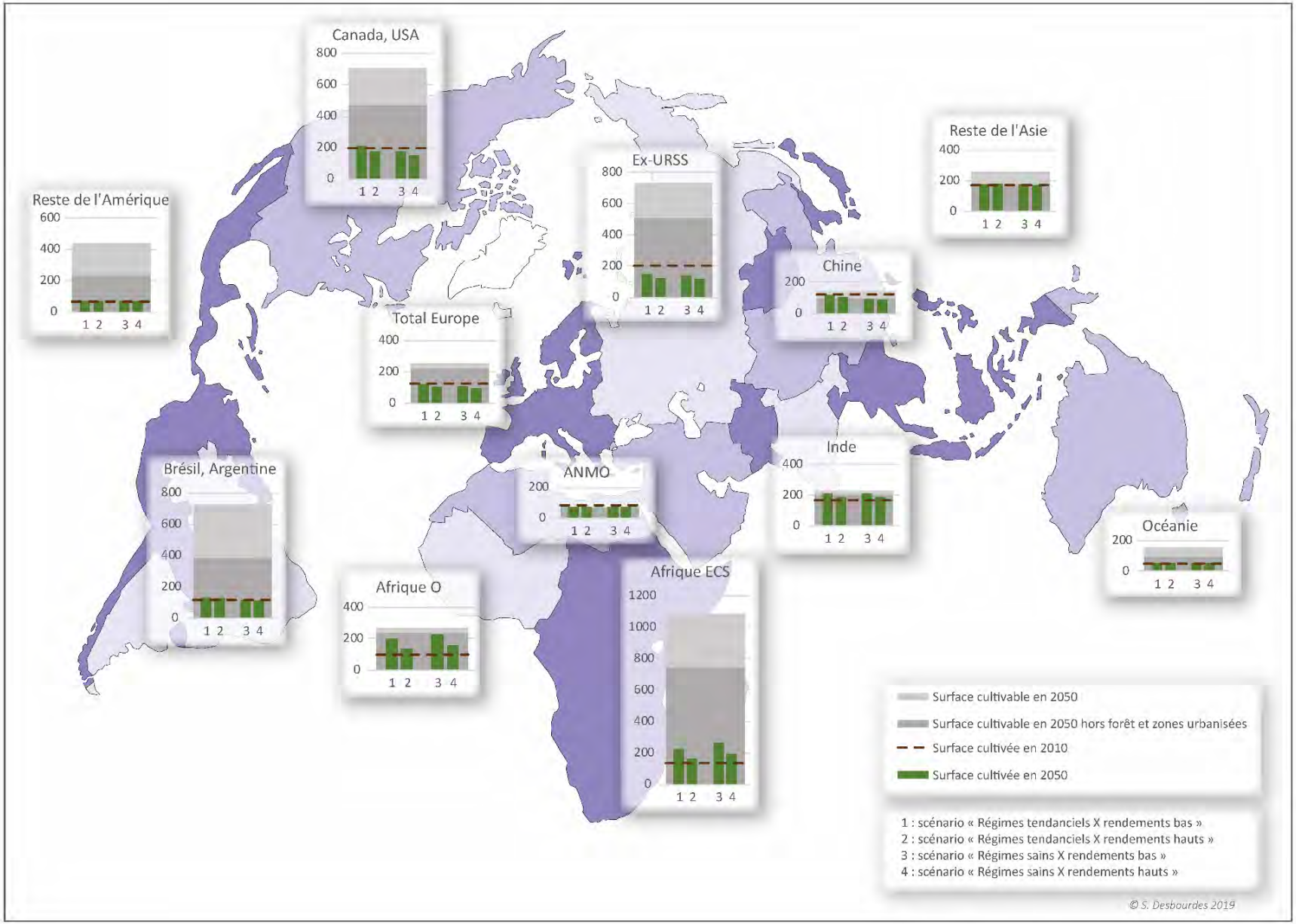


Tableau 5-2. Effet des composantes du système alimentaire de chaque région du monde sur son besoin en terres cultivées par rapport à « 2010 » (en milliers d'ha)

		Surfaces cultivées "2010"	+ Pop 2050	+ Rég. alim. + autr. util.	+ Eff anim.	+ Coef. int cult.	Effets rendts "bas" + Rdts "bas"	Effets rendts "bas" + Contr. de terres	**Total Rdt "bas"**	Effets rendts "hauts" + Rdts "hauts"	Effets rendts "hauts" + Contr. de terres	**Total Rdt "hauts"**
Canada, USA	Rég. Tend.	193 200	+45 613	+32 652	+3 218	-33 163	-31 659	+2 561	**+19 220**	-62 599	-1433	**-15 714**
	Rég. Sains			-14 449	+2 479	-27 388	-26 736	+4 181	**-16 301**	-51 540	+970	**-44 316**
Brésil, Argentine	Rég. Tend.	116 100	+23 016	+38 322	+1 173	-3 685	-43 901	+1 320	**+16 245**	-47 300	+365	**+11 890**
	Rég. Sains			+12 862	+1 887	-3 175	-37 230	+2 396	**-244**	-40 587	+736	**-5261**
Reste Amérique	Rég. Tend.	68 800	+21 658	+13 405	-2 003	-2 101	-27 930	+714	**+3 743**	-26 760	-253	**+3 946**
	Rég. Sains			+10 454	-1 365	-2 053	-27 065	+1 529	**+3 159**	-26 775	+417	**+2 336**
Ex-URSS	Rég. Tend.	201 900	+20 549	+12 603	-13 760	-17 224	-58 634	+2 205	**-54 260**	-78 974	-4056	**-80 861**
	Rég. Sains			+4 379	-10 853	-16 810	-57 372	+3 045	**-57 062**	-81 578	+1 336	**-82 977**
Chine	Rég. Tend.	122 500	+1 625	+25 615	+17 005	-25 406	-23 871	+237	**-4 796**	-34 134	+104	**-15 192**
	Rég. Sains			-880	+11 716	-20 565	-20 216	+455	**-27 865**	-27 974	+169	**-35 909**
Inde	Rég. Tend.	169 400	+52 289	+102 500	-5 578	-12 888	-91 421	+829	**+45 731**	-115 692	+445	**+21 075**
	Rég. Sains			+81 633	+8 858	-12 628	-87 888	+639	**+42 904**	-110 532	+424	**+20 045**
Reste Asie	Rég. Tend.	171 900	+48 911	+40 342	-1 297	-6 669	-74 369	+1 103	**+8 022**	-70 412	+454	**+11 329**
	Rég. Sains			+30 859	-902	-6 435	-70 425	+1 436	**+3 442**	-70 137	+793	**+3 088**
P&M-Orient	Rég. Tend.	57 200	+26 425	+4 823	+498	+946	-24 416	-9 092	**-816**	-31 844	-1 664	**-816**
	Rég. Sains			+7 399	+351	+972	-24 928	-11 035	**-816**	-33 733	-2 230	**-816**
Afrique Nord	Rég. Tend.	28 300	+17 014	+7 817	+866	+574	-13 418	-22 104	**-9 249**	-19 992	-15 529	**-9 249**
	Rég. Sains			+8 351	+896	+580	-13 418	-22 672	**-9 249**	-21 606	-14 484	**-9 249**
Afrique Ouest	Rég. Tend.	98 500	+142 680	+43 437	-1 316	-8 679	-74 344	+380	**+102 157**	-134 326	+134	**+41 930**
	Rég. Sains			+90 818	-2 666	-10 089	-89 551	+376	**+131 568**	-160 787	+126	**+60 081**
Afrique E.C.S.	Rég. Tend.	134 100	+151 650	+40 477	-2 857	-9 908	-86 100	+388	**+93 649**	-145 673	-770	**+32 919**
	Rég. Sains			+101 791	-3 103	-11 778	-106 755	+581	**+132 385**	-176 242	+147	**+62 463**
Océanie	Rég. Tend.	47 900	+16 631	+6 747	-1 257	-730	-16 154	+2 255	**+7 493**	-13 654	+1 763	**+9 500**
	Rég. Sains			+5 174	-793	-718	-15 878	+2 705	**+7 121**	-13 273	+1 913	**+8 934**
Reste monde	Rég. Tend.	2 300	+43	+238	-124	-145	-508	+37	**-458**	-473	+19	**-441**
	Rég. Sains			+409	-114	-155	-552	+90	**-280**	-508	+37	**-288**
Total Monde	Rég. Tend.	1 539 400	+581 170	+384 078	-2 834	-138 133	-586 705	-14 814	**+222 762**	-815 998	-19 239	**-10 956**
	Rég. Sains			+340 356	+7 820	-127 524	-596 697	-10 790	**+194 335**	-846 630	-6 748	**-51 555**

Figure 5-4. Surfaces cultivées à l'horizon 2050 dans les différentes régions du monde selon les 4 scénarios de référence (en Mha)



INRAE – Rapport de synthèse de l'étude « Agricultures européennes 2050 » Février 2020

À l'inverse des régions précédentes (Canada-USA, ex-URSS et Chine) qui sont susceptibles de dégager en 2050 des surplus de terres par rapport à « 2010 », les régions d'**Amérique latine**, et notamment la région **Brésil-Argentine**, combinent les poids importants de leurs composantes démographiques et de leurs composantes nutritionnelles, le passage à des régimes alimentaires « sains » réduisant néanmoins quelque peu l'importance de ce dernier facteur (Tableau 5-2). Les évolutions, même fortes, des rendements végétaux ne permettraient que difficilement de compenser l'ampleur de ces deux effets de demande. Au total, la tendance serait plutôt à l'extension des terres cultivées dans ces régions du monde à l'horizon 2050 (Figure 5-4) : avec des régimes alimentaires « tendanciels », la région Brésil-Argentine accroitrait ses surfaces cultivées de +14 % (soit +16 Mha) sous hypothèse de rendements « bas » et de +10 % (soit +12 Mha) sous hypothèse de rendements « hauts ». Seul un passage à des régimes alimentaires « sains » permettrait à cette région de stabiliser ses surfaces cultivées, voire même de les réduire de -5 Mha par rapport en « 2010 » en cas de rendements « hauts ».

La situation est bien plus tendue en ce qui concerne l'**Inde**. S'y cumulent un effet démographique important et un effet régime alimentaire de très grande ampleur, qu'un passage à des régimes « sains » ne détendrait que faiblement (Tableau 5-2). Même si les effets des évolutions des rendements végétaux sont ici particulièrement prononcés, ils restent très insuffisants pour compenser les effets d'une démographie encore en expansion en 2050 et d'un rattrapage nutritionnel en cours. Ainsi, les surfaces cultivées en Inde à l'horizon 2050 pourraient s'accroître, sous hypothèse de rendements « bas », de +46 Mha en régime « tendanciel » (+27% des surfaces cultivées de « 2010 ») et de +43 Mha en régime « sain » (+25% des surfaces cultivées de « 2010 »). Cette augmentation des surfaces cultivées serait réduite de moitié (+21 et +20 Mha selon que les régimes sont « tendanciels » ou « sains ») sous hypothèse de rendements « hauts ».

Enfin, la situation deviendrait extrême dans les deux régions d'**Afrique subsaharienne** considérées ici, soit l'**Afrique de l'Ouest** et l'**Afrique de l'Est, centrale et du Sud**. À lui seul, l'effet démographique multiplie par plus de deux les besoins en terres cultivées de ces régions, comme on pouvait s'y attendre au vu de leurs évolutions démographiques (Tableau 5-2). S'y ajoute un effet régime qui, contrairement à toutes les autres régions, s'accentue lors d'un passage de régimes alimentaires « tendanciels » à des régimes alimentaires « sains ». Comme on l'a vu précédemment, l'adoption de régimes « sains » se traduit, dans ces deux régions, par une augmentation de la demande en produits agricoles par rapport à « 2010 », alors qu'une telle évolution a tendance à atténuer l'effet régime alimentaire dans toutes les autres régions. Parallèlement, les effets relativement élevés de l'évolution des rendements végétaux ne compensent pas l'accroissement des besoins en surfaces cultivées liés à la demande domestique en produits agricoles. Comme les surfaces cultivables sont ici très peu contraintes (les données GAEZ même affectées du changement climatique identifient une superficie très importante de terres potentiellement cultivables), les surfaces cultivées s'étendraient considérablement à l'horizon 2050 tant en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique de l'Est, centrale et du Sud (Figure 5-4). Sous hypothèse basse de l'évolution des rendements végétaux, l'extension des terres cultivées serait, pour cet ensemble continental, de presque +200 Mha à l'horizon 2050 dans le cas de régimes « tendanciels » et de +264 Mha en régimes « sains », ce qui revient à un doublement des surfaces cultivées africaines relativement à « 2010 ». Cette extension serait réduite sous hypothèse haute d'évolutions des rendements végétaux : une telle hypothèse ramènerait l'accroissement des surfaces cultivées de ces deux régions à +75 Mha si les régimes alimentaires évoluent tendanciellement, et à +123 Mha en cas d'adoption de régimes « sains ».

5.2. Des régions à forte tension sur les surfaces et des régions à surplus potentiel de terres

5.2.1. Des évolutions de surfaces cultivées très différenciées selon les régions et les scénarios

Nos résultats de simulations mettent en évidence une tendance à l'extension des surfaces cultivées au niveau mondial, tendance d'autant plus marquée que les évolutions des rendements végétaux sont modérées (notamment du fait de faibles effets des évolutions techniques sur cette variable), ou que les régimes alimentaires suivent des trajectoires similaires à celles engagées au cours des dernières décennies. Ainsi, dans le scénario « régimes tendanciels et rendements bas », cette extension serait de l'ordre de +220 Mha de surfaces cultivées supplémentaires en 2050 par rapport à « 2010 » à l'échelle de l'ensemble de la planète. L'amplitude de cette extension est plus sensible à l'évolution des rendements qu'à la nature des régimes alimentaires adoptés à l'horizon 2050. En effet, en maintenant une trajectoire tendancielle des régimes alimentaires, l'hypothèse haute d'évolution des rendements végétaux permettrait, à elle seule, un maintien des surfaces cultivées mondiales à leur niveau de « 2010 ». Inversement, sous hypothèse basse d'évolution des rendements végétaux, la seule

adoption généralisée de régimes alimentaires « sains » ne réduirait que de quelques -30 Mha l'extension des surfaces cultivées mondiales par rapport aux besoins en surface cultivée mondiale estimée en 2050 sous « régimes tendanciels X rendements bas ». Ce résultat, quelque peu brutal dans la mesure où il amènerait à considérer qu'au niveau mondial, il serait plus efficace de compter sur les évolutions techniques agricoles que sur les changements de comportements alimentaires pour éviter l'extension des surfaces cultivées, doit néanmoins être pris avec précaution. En effet, il masque de fortes disparités entre régions du monde dont une partie est directement liée au fonctionnement même du modèle GlobAgri-AE2050. En outre, il ne prend pas en compte l'impact potentiellement positif sur la santé des populations de régimes alimentaires plus sains, ni l'impact potentiellement négatif sur l'environnement d'un accroissement des rendements si celui-ci ne s'appuie que sur une intensification conventionnelle des systèmes de cultures actuels.

Comme on l'a vu précédemment, les simulations font en effet apparaître des cas de figures régionaux très contrastés. D'un côté, certaines régions verraient leurs surfaces cultivées augmenter, parfois considérablement, d'ici 2050. Le cas extrême est bien sûr celui des **deux régions d'Afrique subsaharienne** (Afrique de l'Ouest et Afrique de l'Est, centrale et du Sud) où l'extension de surfaces cultivées serait de grande ampleur (Figure 5-4). De telles extensions sont portées, en premier lieu, par une demande alimentaire dont la forte hausse est le résultat d'une croissance démographique très élevée et d'un nécessaire rattrapage nutritionnel, qu'un simple prolongement des tendances passées ne suffirait pas à combler et qui impose une évolution plus prononcée des régimes alimentaires vers des régimes « sains » pour être effectif. L'évolution des rendements, même dans la large fourchette matérialisée par les deux hypothèses retenues, ne permet pas de faire face à cette explosion de la demande à surfaces cultivées constantes, du fait de la faiblesse des rendements végétaux actuellement enregistrés dans ces régions. Étant donné l'importance des terres cultivables disponibles en Afrique subsaharienne à l'horizon 2050, le modèle permet aux surfaces cultivées de s'y étendre autant que de besoin sans jamais buter sur la contrainte de terres. L'**Inde** se trouve dans une situation assez comparable, bien que moins extrême. Les évolutions des composantes de la demande alimentaire y sont un peu moins prononcées et donc un peu plus facilement compensées par les évolutions des rendements. Néanmoins, compte tenu de ses particularités géographiques, le besoin en surfaces cultivées de l'Inde approcherait fortement sa contrainte en terres cultivables en 2050, notamment si les évolutions de rendements végétaux restaient modérées. À ce groupe des régions susceptibles d'accroître leurs surfaces cultivées, il y a lieu d'adjoindre les **deux régions d'Amérique latine** (Brésil-Argentine et reste de l'Amérique), ainsi que le **reste de l'Asie** (hors Chine) et l'**Océanie**. Bien que réels, les augmentations des besoins en surfaces cultivées sont ici plus limitées et pourraient être réduites, soit par adoption de régimes « sains », soit par évolution plus à la hausse des rendements végétaux.

À l'opposé, d'autres régions du monde seraient en capacité de dégager un surplus non négligeable de surfaces cultivées par rapport à « 2010 ». C'est le cas en particulier de l'**ex-URSS** et ce, quelles que soient les combinaisons d'hypothèses relatives à l'évolution des régimes alimentaires et des rendements végétaux. En dépit d'hypothèses relativement conservatrices en matière de rendements végétaux, ce sont les faibles évolutions des composantes de la demande qui permettent de dégager un tel surplus de terres par rapport à « 2010 ». Certaines régions européennes, marquées par un faible, voire très faible, dynamisme démographique, pourraient se retrouver dans une situation similaire : il s'agit principalement de l'**Europe de l'Est** et de la **Pologne** ainsi que de l'**Allemagne** et de l'**Europe centrale** (Figure 5-2). La région **Canada-USA** et, dans une bien moindre mesure, la **France**, voire le **Royaume-Uni**, pourraient, selon les hypothèses retenues, rejoindre ce groupe des régions susceptibles de dégager un surplus de terres cultivées. En effet, le besoin en surfaces cultivées de ces régions serait supérieur aux surfaces cultivées de « 2010 » dans le cas d'une évolution tendancielle des régimes alimentaires, tandis que l'adoption de régimes « sains » leur permettrait de dégager un surplus de terres par rapport à « 2010 ». Ce dernier pourrait être conséquent pour la région Canada-USA, notamment en cas d'évolution des rendements suivant notre hypothèse haute, beaucoup plus modeste pour la France et quasi-inexistante pour le Royaume-Uni.

Les deux cas de l'**Europe du Sud** et de la **Chine** méritent un examen spécifique. Selon les résultats issus de GlobAgri-AE2050, ces deux régions seraient également en capacité de dégager un surplus de terres par rapport à leurs surfaces cultivées en « 2010 ». Ces deux régions sont néanmoins assez fortement importatrices, leurs taux de dépendance nette aux importations étant en « 2010 » de 34 % pour l'Europe du Sud et de 12 % pour la Chine, cette dernière région étant en outre le premier importateur net mondial de produits agricoles en équivalent énergie (*cf.* Tableau A.2 en Annexe A). Comme le modèle conserve en l'état les taux d'importations des régions non contraintes par leurs disponibilités en terres cultivables, ces régions se trouvent, à l'issue de nos simulations, dans une situation pouvant paraître paradoxale, consistant à maintenir à un niveau élevé leurs importations (*cf.* Figure 5-7) tout en étant en capacité de dégager un surplus de terres par rapport à « 2010 » (Figures 5-2 et 5-4). On peut faire l'hypothèse que ces régions feraient le choix de mobiliser ces surplus de terres afin de réduire leurs importations agricoles si les contextes de prix des produits et de coûts de production font que cette option est économiquement plus intéressante (c'est-à-dire plus rentable).

5.2.2. Des résultats globaux en cohérence avec la littérature

Pris globalement, les résultats obtenus ici sont cohérents avec la littérature scientifique relative aux enjeux de sécurité alimentaire mondiale et, notamment, avec les travaux qui intègrent dans leur problématique les impacts et défis du changement climatique. Dans leur revue de littérature sur cette question, Le Mouël et Forslund (2017) relèvent qu'à l'horizon 2050, les scénarios pris en compte dans les 25 études intégrées à leur analyse envisagent une extension des surfaces cultivées mondiales allant de 0 à près de +200 Mha par rapport à 2010, cette extension concernant plus particulièrement l'Afrique subsaharienne et l'Amérique latine. Nos résultats s'étagent, quant à eux, entre +223 et -11 Mha sous hypothèse de régimes « tendanciels » et entre +194 et -52 Mha sous hypothèse de régimes « sains ». De son côté, la prospective Agrimonde-Terra, conduite par le Cirad et l'Inra (Le Mouël *et al.*, 2018), envisage des évolutions de surfaces cultivées mondiales allant de +620 Mha dans la variante la plus pessimiste du scénario *Metropolization* (celle qui prolonge les transitions nutritionnelles avec accroissement de la consommation de produits animaux) à -56 Mha dans la variante la plus optimiste du scénario *Healthy*.

Si on se penche plus particulièrement sur le travail réalisé par Popp *et al*. (2017) qui récapitule les résultats de simulations obtenus à partir d'un ensemble de modèles économiques dans le cadre des simulations des *Shared Socio-economic Pathways* (SSP) sur lesquels s'appuient les différents scénarios du GIEC, il en ressort une extension de +216 Mha à l'horizon 2050 pour le scénario le plus proche de nos hypothèses tendancielles, c'est-à-dire le scénario *Middle of the Road*, SSP-2 (associé à une trajectoire d'émissions de type RCP-6.0)[114]. Le récent travail de la FAO (2018) fait, quant à lui, apparaître une extension des terres cultivées de +165 Mha entre 2012 et 2050 pour son scénario *Business as Usual* (BAU), cette extension des surfaces cultivées mondiales se réduisant à +86 Mha pour le scénario le plus vertueux (TTS, *Towards Sustainability*) et pouvant atteindre +325 Mha pour le scénario le plus pessimiste (SSS, *Stratified Societies*). L'extension des surfaces cultivées est, ici aussi, particulièrement marquée en Afrique subsaharienne ; elle est plus modérée en Amérique latine et en Asie de l'Est-Pacifique (hors Chine). Parallèlement, les trois scénarios de FAO (2018) envisagent une réduction des surfaces cultivées en Chine, allant jusqu'à -12 % dans le cas du scénario *BAU*. Dans ce même scénario, les pays à haut revenu (*High Income Countries*) seraient également susceptibles de ne pas mobiliser en 2050 toutes les surfaces qu'ils cultivaient en 2012, la réduction de surfaces cultivées étant néanmoins très faible (-2 % relativement à 2012).

Nos résultats, allant d'une réduction de -52 millions d'hectare des surfaces cultivées mondiales (en cas de « régimes sains X rendements hauts ») à un accroissement maximal de +223 Mha (en cas de « régimes tendanciels X rendements bas »), s'inscrivent dans les mêmes fourchettes d'évolutions des surfaces cultivées mondiales que les travaux antérieurs. Ils pointent en outre les mêmes régions du monde comme étant les plus concernées par cette extension (Afrique subsaharienne, Inde, Amérique latine).

Ils en diffèrent néanmoins sur un premier point important. Les augmentations de surfaces cultivées estimées par GlobAgri-AE2050 dans les régions concernées sont particulièrement amples, notamment en **Afrique subsaharienne** et en **Inde**. Parallèlement, nos résultats font apparaître de conséquents, et possiblement surprenants, surplus de terres par rapport à « 2010 » dans des régions comme l'**ex-URSS**, la **Chine**, l'**Europe** ou encore la région **Canada-USA**. Aucun des travaux s'appuyant sur des modèles prenant en compte les comportements économiques des agents et des opérateurs ne débouchent sur de tels résultats, dans la mesure où les offres et les demandes régionales de produits agricoles s'ajustent par l'intermédiaire des prix qui régulent en outre les échanges internationaux. L'absence de prise en compte de tels mécanismes est bien sûr une limite forte de GlobAgri-AE2050, comme de tous les modèles de bilans matière. Cette limite, qui fait apparaître des régions exprimant des besoins en terres cultivées difficilement supportables et des régions susceptibles de dégager des surplus de terres cultivées, offre néanmoins l'opportunité d'une réflexion plus ouverte sur les options qui favoriseraient la limitation des tensions sur les terres cultivées de par le monde, tensions que les modèles économiques complets tentent de résorber de façon par trop mécaniste et insuffisamment explicite. C'est une telle réflexion, centrée sur la place que les régions européennes pourraient trouver dans ces options, qui est développée dans le chapitre 6 de ce rapport.

[114] On peut également relever que, sous le scénario *Convential Development* (SSP-5) associé à la trajectoire d'émissions RCP6.0, l'extension des surfaces cultivées serait de +313 Mha et que, sous le scénarios *Sustainability* (SSP-1) associé cette fois à la trajectoire RCP4.5, la contraction des surfaces cultivées mondiales serait en 2050 de -29 Mha.

5.2.3. Des extensions des surfaces en prairies permanentes qui pourraient devenir extrêmes

Une autre différence majeure entre nos résultats et ceux mis en avant dans la littérature scientifique concerne les évolutions des surfaces en prairies permanentes. Selon Le Mouël et Forslund (2017), les quelques travaux qui précisent leurs hypothèses et résultats en matière de systèmes d'élevage et de surfaces en fourrages envisagent des extensions plutôt modérées des surfaces fourragères mondiales, notamment des prairies permanentes, voire des réductions de celles-ci en cas d'évolution des régimes alimentaires vers des régimes moins riches en produits animaux. Le Mouël et Forslund (2017) rapportent ainsi que la mise en œuvre du scénario SSP-2 (*Middle of the Road*) chez Popp *et al.* (2017) conduirait à une augmentation de +113 Mha des surfaces en prairies à l'horizon 2050, soit +3,3 %, alors que l'application du scénario SSP-1 (*Sustainability – Taking the Green Road*) aboutirait à une réduction de +367 Mha de ces surfaces en prairies. De son côté, les résultats de la prospective Agrimonde-Terra (Le Mouël *et al.,* 2018) envisagent une extension des pâtures de +700 Mha dans la variante pessimiste du scénario *Metropolization* et de +85 Mha dans la variante optimiste du scénario *Healthy*.

Nos résultats se traduisent par une extension bien plus considérable des surfaces en prairies permanentes, allant, selon les scénarios envisagés, de +2 à +2,8 milliards d'hectares pour une superficie actuelle (« 2010 ») de 3,2 milliards d'ha (Tableau A.2 en Annexe A). Cet important écart entre nos résultats et ceux de la littérature repose sur plusieurs éléments qu'il est nécessaire de bien préciser. Tout d'abord, comme dans Agrimonde-Terra, ces surfaces en prairies permanentes n'interviennent pas dans la contrainte de terres que nous avons réduite aux seules surfaces cultivées du fait notamment des fortes incertitudes qui pèsent sur les évaluations des surfaces en prairies permanentes dans les statistiques mondiales. Les prairies permanentes peuvent donc s'étendre à « l'infini » en fonction des besoins domestiques en produits animaux. Les deux variables clefs sous-jacentes à ces évolutions sont les hypothèses faites, d'une part, en matière de rendements des fourrages et, d'autre part, en matière d'efficiences animales et de la place des fourrages dans les rations des ruminants. Comme on l'a vu précédemment (Section 3.2), nous avons fait peu évoluer les rendements des différents fourrages, en adoptant une hypothèse conservatrice considérant qu'il n'y aurait pas d'ici à 2050 d'évolutions techniques susceptibles d'améliorer le rendement des prairies permanentes (en tonne par hectare). Ces rendements n'évolueraient alors que sous les effets du changement climatique. Bien que les autres travaux de modélisation et de simulation sur la sécurité alimentaire mondiale documentent peu les évolutions des rendements de l'herbe et des autres fourrages, on peut penser qu'ils s'appuient sur des hypothèses d'évolution des rendements de l'herbe beaucoup plus marquées à la hausse que les nôtres[115]. Par ailleurs, le travail spécifique qui a été réalisé sur les efficiences animales et leurs projections à l'horizon 2050 (*cf.* Section 3.3) privilégie un recours accru aux aliments pour les bovins destinés à la viande, ce qui augmente notamment (mécaniquement) le besoin en prairies permanentes. Combinée à la faible progression des rendements de l'herbe, cette hypothèse amplifie les besoins en pâtures, surfaces spécifiquement destinées aux animaux. Compte tenu de la force de ces deux hypothèses (la productivité des prairies permanentes et recours aux fourrages pour les bovins), nos résultats dans ce domaine sont à considérer avec la plus grande prudence. Ils nous permettent cependant de conforter l'identification des régions du monde où les tensions sur les surfaces agricoles pourraient à l'horizon 2050 devenir particulièrement cruciales.

L'extension des prairies serait particulièrement marquée en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud**, en **Chine** et en **Afrique de l'Ouest** (Figure 5-5). Dans ces régions, auxquelles on pourrait ajouter le reste de l'Asie, on assisterait à un doublement, voire un triplement, des surfaces en prairies permanentes par rapport à « 2010 ». Comme pour les surfaces cultivées, l'extension des surfaces en prairies permanentes dans les deux régions de l'Afrique subsaharienne observée sous hypothèse d'évolution tendancielle des régimes serait fortement renforcée par l'adoption de régimes « sains », compte tenu de l'augmentation des consommations de calories, y compris en produits animaux, que comporte cette amélioration des régimes alimentaires en Afrique par rapport aux consommations qui caractérisent les régimes « tendanciels ». Il n'en est pas de même en Chine, où le passage à des régimes alimentaires « sains » maintiendrait les surfaces en prairies permanentes au même niveau qu'en « 2010 ». Un tel changement de régime alimentaire atténuerait nettement l'extension des surfaces en prairies permanentes estimée dans le reste de l'Asie sous hypothèse de régimes « tendanciels ».

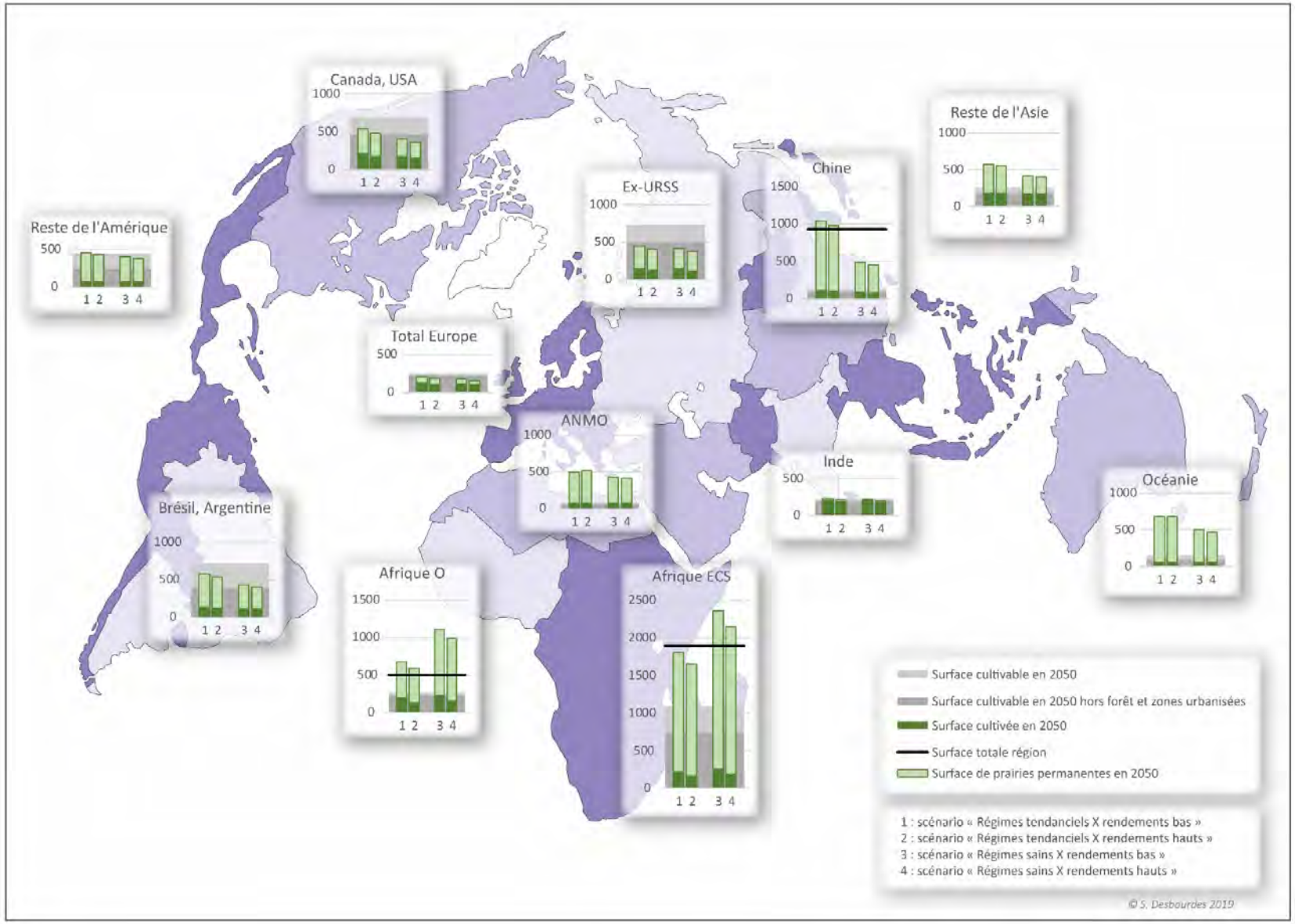
Pour les autres régions du monde et d'Europe, les augmentations de surfaces en prairies permanentes sont plus limitées. En outre, le passage à des régimes alimentaires « sains » réduirait systématiquement ces augmentations, les surfaces affectées

[115] Notamment si ces travaux mobilisent, pour les évolutions des rendements à l'hectare de l'herbe, des processus d'évolution technique de même nature que pour les autres cultures. Rappelons que, parmi les modèles utilisés pour simuler les effets des SSPs, deux calent leurs projections de rendements sur diverses projections de la FAO (dont Alexandratos et Bruinsma, 2012), deux utilisent une équation estimée intégrant les changements techniques « *as a function of GDP* », et un a un module de progrès technique endogène dans lequel le rythme de progrès technique est tiré par la demande et influence positivement les rendements selon une fonction *ad hoc*.

aux prairies permanentes pouvant même se réduire par rapport à « 2010 » dans plusieurs régions. Presque toute l'Europe serait concernée par ce cas de figure, avec notamment la **France**, l'**Allemagne**, le **Royaume-Uni** et l'**Europe du Sud**, ainsi que la **Pologne**, l'**Europe centrale** et l'**Europe de l'Est** bien que, dans ces trois dernières régions, la réduction porte sur des surfaces initialement déjà très limitées (Figure 5-2). Il en serait de même pour les régions **Canada-USA** et **ex-URSS**, la baisse des surfaces en prairies permanentes concernant alors non seulement le cas de régimes alimentaires « sains » mais aussi celui de régimes « tendanciels » (Figure 5-5).

Ainsi, en cumulant nos résultats relatifs aux surfaces cultivées et aux surfaces en prairies permanentes (Figures 5-2 et 5-5), il apparaît clairement qu'aux conditions techniques fixées pour 2050 (incluant les hypothèses conservatrices faites sur le rendement des prairies permanentes et l'importance du recours aux fourrages pour les ruminants destinés à la viande), la situation pourrait devenir particulièrement tendue sur le plan foncier en **Afrique de l'Est, centrale et du Sud** et en **Afrique de l'Ouest**, ces deux régions pouvant atteindre, voire « dépasser », les limites physiques de leurs surfaces affectables à l'agriculture. Il faut ajouter, à ces situations délicates, l'**Afrique du Nord** et le **Proche et Moyen-Orient** qui dépassent déjà aujourd'hui leur contrainte de surfaces cultivables. Les tensions sur les terres concerneraient également, mais dans une moindre mesure, le **reste de l'Asie** et l'**Océanie**, quelles que soient les hypothèses retenues en matière d'évolution des régimes alimentaires et des rendements végétaux, ainsi que la **Chine** notamment dans le cas d'une évolution tendancielle des régimes alimentaires (du fait de la forte croissance des consommations et des offres de produits animaux). L'**Inde**, compte tenu de sa faible marge de manœuvre en matière de surfaces cultivables, rejoindrait sans doute ce groupe des régions du monde à situation tendue en matière d'extension des surfaces destinées aux activités agricoles. La situation des régions d'Amérique latine (**Brésil-Argentine** et **reste de l'Amérique**) serait potentiellement sensible, sans devenir critique, notamment si les régimes alimentaires y poursuivaient une trajectoire tendancielle, les évolutions de leurs surfaces cultivées et en prairies permanentes se maintenant à peu près à leur niveau de « 2010 » en cas de changements des régimes alimentaires vers des régimes « sains ». À l'opposé, l'ex-URSS, certaines régions d'Europe (**Europe de l'Est**, **Pologne**, **Allemagne**, **Europe centrale**) ainsi que la région **Canada-USA** pourraient dégager, notamment sous l'hypothèse de régimes alimentaires « sains », des marges de manœuvre, potentiellement mobilisables pour réduire les tensions auxquelles seraient amenées à faire face d'autres régions du monde.

Figure 5-5. Surfaces cultivées et surfaces en prairies permanentes à l'horizon 2050 dans les différentes régions du monde selon les 4 scénarios de référence[116]



[116] La « surface totale région » correspond à la superficie régionale des terres émergées (terres dont le « *suitability index* » défini par GAEZ est supérieur ou égal à 0)

INRAE – Rapport de synthèse de l'étude « Agricultures européennes 2050 » Février 2020

5.3. Production et participation aux échanges internationaux des régions d'Europe et du reste du monde à l'horizon 2050

C'est à partir de ces surfaces destinées à l'agriculture et des conditions techniques que nous avons fixées de façon exogène, que le modèle détermine les niveaux de production agricole des différentes régions du monde ainsi que leurs niveaux d'exportations et d'importations. Comme la contrainte en terres cultivables ne joue, dans nos simulations, que peu sur la détermination des équilibres emplois-ressources, et en outre seulement en Afrique du Nord et au Proche et Moyen-Orient, ces niveaux de production, d'importations et d'exportations seront essentiellement fixés en vue de répondre à la demande domestique de chacune des régions tout en maintenant les taux d'importations et les parts de marché à l'exportation. Ces derniers seront néanmoins modifiés, mais *in fine* de façon modérée à l'échelle mondiale, du fait de la demande en importations qu'exprimeront à l'horizon 2050 les deux régions contraintes, l'Afrique du Nord et le Proche et Moyen-Orient.

5.3.1. Évolutions estimées en Europe

On ne sera alors pas surpris, compte tenu des caractéristiques de sa demande en 2050, par la croissance modérée des niveaux des productions agricoles **en Europe** à cet horizon (Figure 5-6). Alors que la production mondiale augmenterait de près de +50 % à l'horizon 2050 en cas de « régimes tendanciels X rendements bas », et de plus de +30 % dans le cas de « régimes sains X rendements hauts », l'Europe prise globalement verrait sa production agricole progresser de +22 à +24 % si les régimes alimentaires évoluaient de façon tendancielle et de +10 à +13 % s'ils s'orientaient vers des régimes alimentaires plus sains[117]. Les exportations de toutes les régions européennes[118] seraient en croissance relativement élevée en pourcent (de l'ordre de +50 %), croissance qui ne serait que faiblement affectée par un passage à des régimes alimentaires « sains » (*cf.* Figure C.10b en Annexe C). Cette croissance des exportations des régions européennes concernerait principalement les céréales[119]. Les évolutions des importations des différentes régions européennes sont moins homogènes : elles seraient assez limitées sous l'hypothèse de régimes alimentaires « tendanciels » (+11 % en moyenne), et c'est le passage à des régimes « sains » qui ferait chuter les importations de toutes les régions européennes de façon assez conséquente (*cf.* Figure C.10.c en Annexe C). Cette chute toucherait, comme on peut s'en douter, toutes les importations agricoles peu ou prou liées aux produits animaux, produits animaux eux-mêmes mais aussi céréales, tourteaux et oléo-protéagineux ainsi que les huiles et produits sucriers.

Derrière ces résultats communs aux différentes régions européennes se cache une très forte hétérogénéité, reflet à la fois de leurs positions actuelles en matière de consommations, productions, importations et exportations (*cf.* Chapitre 1, Tableau 1-1) et des évolutions des composantes de leur demande et de leur offre telles qu'intégrées dans les hypothèses de chacun de nos quatre scénarios de référence.

Ainsi, parmi les régions européennes, ce serait la **France** qui aurait la plus forte croissance de sa production (Figure 5-6), avec une dégressivité de son taux de croissance à mesure que l'on se déplace d'un scénario de « régimes tendanciels X rendements bas » (+36 % d'ici 2050) vers un scénario de « régimes sains X rendements hauts » (+27 %). On peut voir ici les effets combinés de sa démographie encore relativement dynamique et de sa position historique d'exportateur net. Cette position d'exportateur net tend à se renforcer à l'horizon 2050 (Figure 5-7a). Il est intéressant de relever que ce renforcement s'accentue en cas de passage à des régimes alimentaires « sains » à travers le monde, sous le double jeu d'une diminution des importations agricoles françaises (due à la baisse de la demande en produits animaux) et d'une accélération de la croissance de ses exportations agricoles portée par une demande mondiale en céréales qui aurait tendance à augmenter, du fait notamment des positions africaines et indiennes.

La production agricole s'accroîtrait également au **Royaume-Uni** et dans le **reste de l'Europe**. Les évolutions seraient néanmoins moins prononcées qu'en France, notamment en cas de passage à des régimes alimentaires « sains » : un tel changement entrainerait une augmentation plus modérée des exportations de ces régions importatrices nettes de produits

[117] Ces fourchettes représentent l'écart entre les deux niveaux de rendements végétaux pris en compte ici. La première valeur est relative à l'hypothèse de rendements « hauts » et la seconde à l'hypothèse de rendements « bas ».

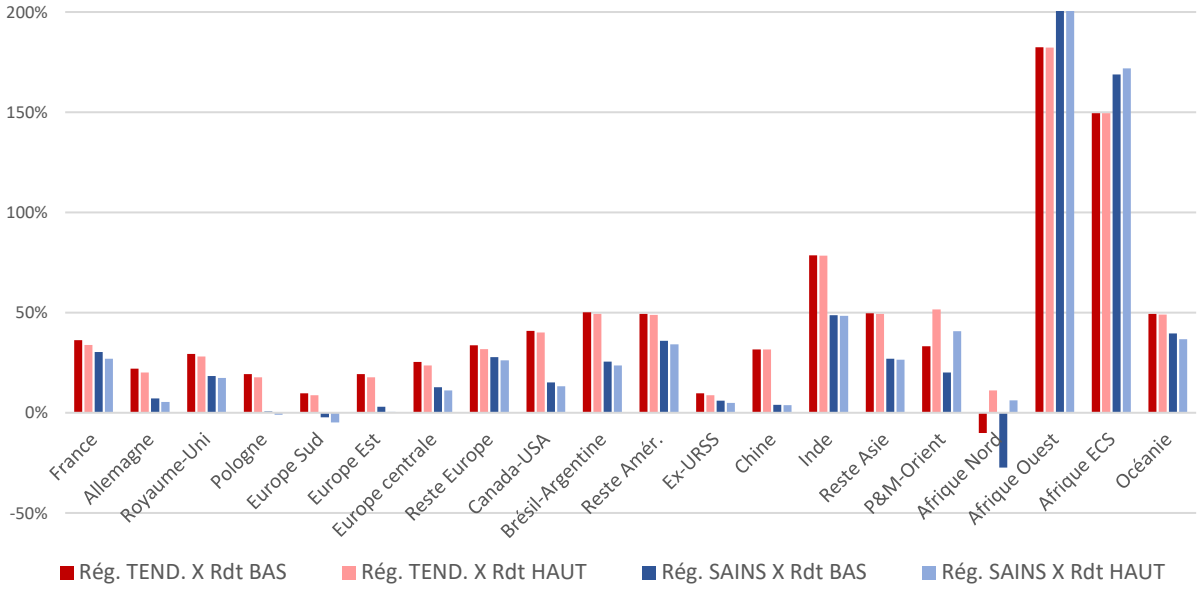
[118] Rappelons que, compte tenu de l'importance du commerce intra-européen, la position globale de l'Europe dans les échanges mondiaux ne peut être examinée au travers de la simple somme des exportations et des importations de chacune des 8 régions européennes distinguées dans l'étude.

[119] Les résultats par produit sont rassemblés dans les tableaux D.4 à D.19 de l'Annexe D.

agricoles et une réduction plus limitée de leurs importations[120]. Ces deux régions européennes resteraient toutes deux importatrices nettes de produits agricoles en 2050 (Figure 5-7a), leur dépendance aux importations étant plus forte si les régimes évoluent de façon tendancielle que s'ils évoluent vers des régimes « sains ».

En dépit des différences de poids relatifs des déterminants de l'équilibre offre-demande, le cas de l'**Europe de l'Est** se rapprocherait de celui de la France. Exportatrice agricole nette en « 2010 », cette région verrait sa production agricole et ses exportations s'accroître de façon conséquente, même en cas de passage à des régimes alimentaires « sains ». Sa position d'exportateur net serait nettement renforcée (Figure 5-7a). Son poids dans les échanges internationaux (intra-européens compris) pourrait encore augmenter si l'important surplus de terres que cette région pourrait dégager était lui aussi mobilisé (*cf.* Chapitre 6). Cette différence avec la France, qui, comme on l'a vu, ne pourrait dégager de (faibles) surplus de terres qu'en cas de passage à des régimes « sains », rapprocherait l'Europe de l'Est d'une position de premier plan parmi les exportateurs nets européens.

Figure 5-6. Évolutions à l'horizon 2050 de la production agricole (mesurée en équivalents kilocalories) dans les différentes régions d'Europe et du Monde selon les scénarios de référence (en %)



Dans les autres régions d'Europe, l'évolution des niveaux des productions agricoles serait plus limitée : la production y augmenterait de l'ordre de +20 % à l'horizon 2050 dans le cas de régimes « tendanciels », et se maintiendrait peu ou prou à son niveau de « 2010 » en cas de passage à des régimes alimentaires « sains » (Figure 5-6). De telles évolutions associées à la réduction des importations due au changement dans les régimes alimentaires permettraient à l'**Allemagne** et, dans une moindre mesure, à la **Pologne** et à l'**Europe centrale**, de passer d'une position de (léger) importateur net à une position de (léger) exportateur net (Figure 5-7a). Notons que ces positions d'exportateur net pourraient être renforcées si ces régions mobilisaient l'ensemble des surplus de surfaces qu'elles pourraient dégager à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 » (*cf.* Figure 5-2 et Chapitre 6).

Le cas de l'**Europe du Sud** est spécifique et mérite, comme on l'a déjà souligné, d'être traité à part. Compte tenu d'une évolution démographique peu favorable, la production agricole y progresserait peu dans le cas d'un maintien de régimes alimentaires « tendanciels », et diminuerait de quelques pourcents en cas de passage à des régimes « sains » (Figure 5-6). Parallèlement, elle verrait ses exportations augmenter nettement, et ce quel que soit le scénario retenu, du fait de l'importance de ses parts de marché à l'export sur certains produits. Ses importations diminueraient légèrement sous hypothèse de régimes « tendanciels » et plus fortement en cas de passage aux régimes « sains » (Figure C.10 en Annexe C). La combinaison de ces deux mouvements réduirait de façon importante sa position d'importateur net de produits agricoles sans pour autant l'annuler (Figure 5-7a). Le mode d'ajustement des équilibres emplois-ressources du modèle se traduit ainsi par cette situation paradoxale, déjà signalée, d'une capacité de l'Europe du Sud à dégager des surplus de terres non mobilisés

[120] Principalement due aux caractéristiques du modèle GlobAgri-AE2050.

pour réduire, voire annuler, le poids des importations de la région. Un calcul simple d'affectation (*ex post*) des surfaces cultivées en « 2010 » et potentiellement non cultivées en 2050 à la couverture des importations de la région met en lumière que la mobilisation de ce potentiel surplus de terres permettrait de diminuer de -25 % les importations de la région dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas », et de -75 % dans le scénario « régimes sains X rendements hauts ». Notons qu'un tel calcul reste très théorique et ne tient pas compte du fait que certains produits agricoles continueront à faire l'objet d'échanges du fait de l'impossibilité à les produire en toute région du monde. Par ailleurs, la capacité de l'Europe du Sud à diminuer son taux de dépendance aux importations par mobilisation de toutes ses terres cultivées en « 2010 » pourrait être remise en cause en cas de limitation de la ressource en eau, qui peut être particulièrement prégnante dans cette région européenne. Ce dernier point fait l'objet d'une analyse de sensibilité spécifique présentée au chapitre 7 de ce rapport de synthèse.

5.3.2. Évolutions estimées dans le reste du monde

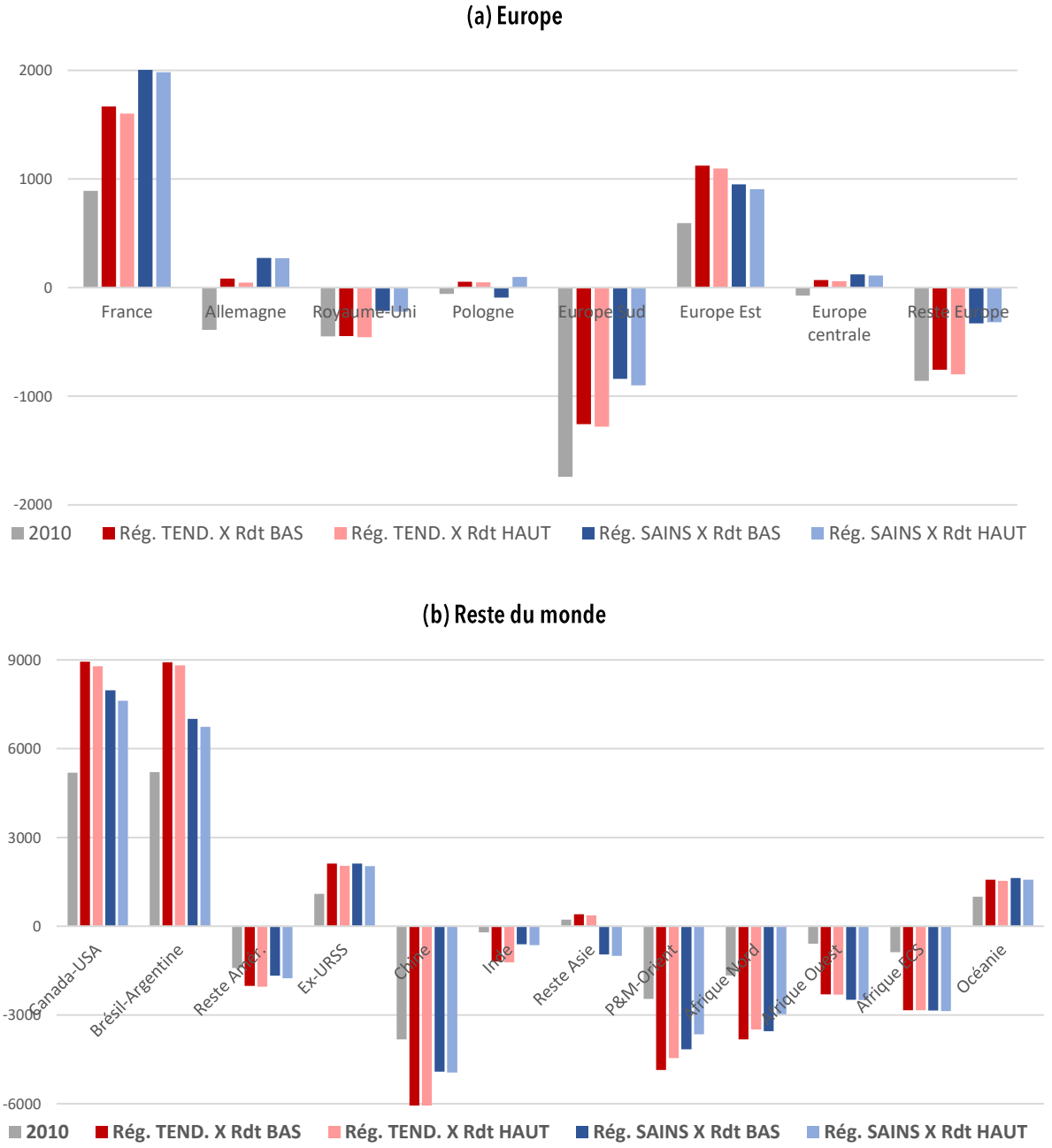
Dans le **reste du monde**, les grandes régions productrices et exportatrices, comme le **Canada-USA** et le **Brésil-Argentine**, renforceraient quelque peu leurs positions respectives. Leur production agricole s'accroîtrait à des taux supérieurs à celui de la France (Figure 5-6), avec en outre des volumes de production de 4 à 6 fois supérieurs. L'écart entre la production nord-américaine et la production de l'ensemble européen, faible en « 2010 », s'accroîtrait sensiblement, et la région Brésil-Argentine serait en passe de rattraper le niveau de production de l'ensemble de la zone Europe. Les composantes des demandes domestiques évoluant de manière assez similaire en France et dans les régions Canada-USA et Brésil-Argentine, les augmentations de production, relativement plus élevées dans ces deux dernières régions sont liées pour une large part à leurs exportations. Ces deux régions renforceraient considérablement leur statut de grands exportateurs agricoles nets mondiaux, notamment dans l'hypothèse de régimes alimentaires « tendanciels » (Figure 5-7b). Le passage à des régimes alimentaires « sains » éroderait néanmoins de façon importante la croissance de leur production et le renforcement de leurs positions exportatrices. La région Canada-USA serait la plus touchée en matière de croissance de sa production agricole, du fait de l'important coup de frein sur la demande intérieure que représenterait de tels changements alimentaires. La région Brésil-Argentine serait plus durement touchée en termes d'évolution de ses exportations nettes, ces dernières étant particulièrement sensibles à la demande mondiale de produits nécessaires à l'alimentation animale. Sous cette hypothèse de changement des régimes alimentaires, l'augmentation des exportations de tourteaux de la région Brésil-Argentine marquerait en effet très sérieusement le pas en 2050, passant d'environ 175.10^{12} Kcal en régimes « tendanciels » à environ 115.10^{12} Kcal en régimes « sains » (*cf.* Tableau C.25 en Annexe C)[121].

Du fait d'une croissance également forte de ses niveaux de production, associée à une légère augmentation de ses surfaces cultivées, l'**Océanie** renforcerait également son statut d'exportateur agricole net en 2050 mais toujours loin derrière les régions Canada-USA et Brésil-Argentine en matière de volumes exportés (Figure C.9 en Annexe C).

Comme en matière d'évolution des surfaces cultivées, la situation de la région constituée des pays de l'**ex-URSS** est assez particulière. Sa production agricole évoluerait peu, de +9-10 % par rapport à « 2010 » dans les scénarios à régimes « tendanciels » et de +5-6 % dans les scénarios à régimes « sains » (Figure 5-6). La région renforcerait quelque peu sa position d'exportateur net sans que n'apparaissent clairement de différences selon les scénarios considérés (Figure 5-7b). Elle resterait néanmoins très en-deçà des capacités productives qu'elle pourrait atteindre si le surplus de terres qu'elle serait susceptible de dégager en 2050 par rapport à « 2010 » (entre 50 et 80 Mha, soit entre 25 et 40 % de sa surface cultivée en « 2010 »), était mobilisé (Figure 5-4). Cette position particulière de réserve de capacité productive s'apparente, avec une différence d'échelle marquée, à celle des régions d'Europe centrale et orientale que nous avons examinée plus haut et sur laquelle nous reviendrons par la suite dans le chapitre 6.

[121] Partant d'un niveau de production assez bas, le reste de l'Amérique latine ne modifierait pas sa position d'importateur net, en dépit d'un taux de croissance de sa production de même ampleur que celui de la région Brésil-Argentine.

Figure 5-7. Niveaux d'exportations nettes* en « 2010 » et à l'horizon 2050 dans les différents scénarios de référence en Europe (a) et dans le reste du monde (b) (en milliards de Kcal)



*Exportations nettes = Exportations - Importations (en milliards de Kcal)

Parmi les régions du monde plutôt en position d'importateur agricole net, la **Chine** mérite également une attention particulière. En effet, la croissance de sa production agricole resterait relativement modérée, +32 % en régimes « tendanciels » et +4 % en régimes « sains » (Figure 5-6), permettant à la Chine de demeurer le premier producteur agricole mondial. Néanmoins, une telle évolution ne serait pas en mesure de limiter la croissance des importations agricoles chinoises. La position d'importateur agricole net de la Chine se trouverait même considérablement renforcée à l'horizon 2050 : ses importations nettes augmenteraient de +60 % sous les scénarios de régimes « tendanciels » et de +30 % sous les scénarios de régimes alimentaires « sains » (Figure 5-7b). Or, comme on l'a vu précédemment, le mode de fonctionnement du modèle permet à la Chine, comme dans le cas de l'Europe du Sud, de dégager des surplus de terres par rapport à « 2010 », sans toutefois les mobiliser pour réduire ses importations. Le même type de calcul *ex post* que celui proposé plus haut pour l'Europe du Sud (avec les mêmes limites) met en lumière qu'il faut ici distinguer deux types d'hypothèses et donc de scénarios : s'opposent ainsi les scénarios avec régimes alimentaires « tendanciels » dont on a vu qu'ils ne libéreraient que

peu de surfaces cultivées par rapport à « 2010 » et les scénarios avec régimes alimentaires « sains » qui, comparés à « 2010 », dégageraient d'importantes surfaces cultivées. Dans le premier cas, la mobilisation de ses surfaces permettrait à la Chine de réduire ses importations en 2050 de -20 % sous hypothèse de rendements « bas » et de -70 % sous hypothèse de rendements « hauts ». En cas de rupture dans l'évolution des régimes alimentaires vers des régimes « sains », la Chine, en mobilisant tous les surplus de terres que le modèle lui attribue, serait en mesure de couvrir à l'horizon 2050 l'intégralité de ses importations et de dégager encore un surplus de terres cultivées par rapport à « 2010 ». En effet, sous hypothèse de rendements « bas », près de 8 Mha cultivés en « 2010 » ne seraient pas utiles à la couverture des besoins domestiques chinois, ces surfaces pouvant passer, sous hypothèse de rendements « hauts », à 17 Mha (soit 14 % de la surface cultivée en Chine en « 2010 »), chiffres à comparer avec le surplus de 17 Mha que les régions européennes (hors Europe du Sud) seraient également susceptibles de dégager en 2050 par rapport à « 2010 ».

L'**Inde** et le **reste de l'Asie** augmenteraient de façon conséquente leurs niveaux de production agricole (Figure 5-6), sans pour autant modifier significativement leurs positions respectives d'importateur net et d'exportateur net de produits agricoles. L'Inde verrait néanmoins sa position d'importateur net s'accentuer, notamment en cas d'évolution tendancielle des régimes alimentaires, et le reste de l'Asie pourrait passer d'un statut de faible exportateur net à celui d'importateur net (Figure 5-7b). Pour ce qui est des échanges, l'Inde, qui participe aujourd'hui peu au commerce mondial agricole, n'y recourrait pas plus en 2050 (sous les hypothèses de fonctionnement du modèle) et le reste de l'Asie qui, en « 2010 », exporte presqu'autant qu'elle importe, augmenterait simultanément et à des rythmes quasi-équivalents ses importations et ses exportations de produits agricoles (toujours sous les hypothèses de fonctionnement du modèle).

Les régions de l'**Afrique du Nord** et du **Proche et Moyen-Orient**, qui sont à la fois de petits producteurs à l'échelle mondiale et, dans nos scénarios de référence à 2050, les seules régions à être contraintes par leurs surfaces cultivables, ne verraient leurs niveaux de production évoluer que faiblement (Figure 5-6). Du fait de la pression des composantes de leur demande domestique, elles renforceraient fortement leur position d'importateurs nets (sur ce point, voir aussi Le Mouël et Schmitt, 2018). L'augmentation de leurs taux de dépendance aux importations agricoles tendrait néanmoins à s'atténuer quelque peu à mesure que les hypothèses d'évolution des rendements végétaux seraient revues à la hausse et que les régimes alimentaires deviendraient plus sains (Figure 5-7b).

Comme on pouvait s'y attendre compte tenu, d'une part, de la pression démographique et des évolutions rapides des régimes alimentaires et, d'autre part, de la disponibilité en terres cultivables, les évolutions les plus spectaculaires en matière de croissance de la production agricole concernent les deux régions d'Afrique subsaharienne considérées, soit l'**Afrique de l'Ouest** et l'**Afrique de l'Est, centrale et du Sud**. Selon les scénarios retenus, la production agricole de ces deux régions pourrait doubler, voire tripler, par rapport à « 2010 », cette croissance étant renforcée par le passage à des régimes alimentaires « sains » (Figure 5-6), en cohérence avec ce que l'on a vu plus haut en matière de besoins en surfaces cultivées. De telles augmentations permettraient à cet ensemble africain d'atteindre en 2050 des niveaux de production agricole comparables à ceux de la région Canada-USA, et même de les dépasser en cas de passage à des régimes alimentaires « sains ». Dans ce dernier type de scénario, cet ensemble deviendrait l'égal de la Chine en matière de production agricole. Néanmoins, ces évolutions considérables ne permettraient ni à l'Afrique de l'Ouest, ni à Afrique de l'Est, centrale et du Sud, de couvrir leurs besoins domestiques. Leur recours aux marchés mondiaux, déjà non négligeable aujourd'hui au regard de leur production, serait amené à se renforcer de façon conséquente. Quel que soit le scénario retenu, leurs volumes d'importations seraient multipliés par deux ou par trois (*cf.* Tableaux C.41 et C.43 en Annexe C), ce qui accentuerait fortement leur statut d'importateurs agricoles nets (Figure 5-7b).

Au total, les trajectoires suivies à l'horizon 2050 par les différentes régions du monde tendraient à renforcer les positions acquises historiquement en termes à la fois de productions intérieures et de participation aux échanges mondiaux. Au-delà de la croissance de la production agricole dans la plupart des régions du monde, en réponse à la dynamique des différentes composantes des demandes régionales, les régions Canada-USA et Brésil-Argentine, tout comme la France et l'Europe de l'Est, renforceraient leur statut d'exportateurs agricoles nets, alors que l'Afrique du Nord, le Proche et Moyen-Orient mais aussi les deux régions d'Afrique subsaharienne et la Chine accentueraient leur statut d'importateurs agricoles nets. Feraient néanmoins exceptions plusieurs régions européennes. D'une part, le Royaume-Uni, l'Europe du Sud et le reste de l'Europe (Irlande, Benelux et Europe du Nord) pourraient limiter leur dépendance aux importations, et ceci d'autant plus fortement qu'elles seraient en mesure de mobiliser les surplus de terres que le fonctionnement du modèle leur permet de dégager en 2050 par rapport à « 2010 ». D'autre part, l'Allemagne, l'Europe centrale et la Pologne pourraient passer d'importateur agricole net à exportateur net, position que la mobilisation de leurs surplus de terres par rapport à « 2010 » accentuerait. La région constituée des pays de l'ex-URSS renforcerait aussi sa position d'exportateur agricole net, en dépit d'un maintien au niveau de « 2010 » de son niveau de production. Cette position pourrait être massivement accentuée si les importants surplus

de terres par rapport à « 2010 » étaient affectés en 2050 à la production agricole de cette vaste région. La Chine qui serait, du point de vue de ce surplus de terres, dans une situation similaire à l'ex-URSS, pourrait en profiter pour limiter ses importations agricoles nettes et même inverser sa position en devenant exportateur agricole net dans le cas d'un passage à des régimes alimentaires « sains ».

Enfin, il est important de noter que, si les deux variantes de rendements utilisées (rendements « bas » *versus* « hauts ») modifient assez fortement les évolutions de surfaces cultivées dans les différentes régions du monde, elles ne différencient pas significativement les évolutions des productions, des importations et des exportations. À l'inverse, le passage à des régimes alimentaires plus sains amortirait grandement, voire annulerait dans certains cas, les évolutions des productions et le renforcement des positions historiques mentionné plus haut, du fait de la limitation des demandes de produits agricoles dans nombre de régions du monde. Les régions de l'Afrique subsaharienne font figure d'exception notable car elles ont besoin d'un surcroît de hausse de leur production et secondairement de leurs importations nettes pour faire face aux évolutions de leur demande, encore augmentée sous cette hypothèse de régimes alimentaires « sains ».

5.4. Sensibilité des résultats à des contraintes plus restrictives sur les terres cultivables

On aura compris que la contrainte de terres cultivables que nous avons mobilisée jusqu'à présent est relativement lâche car autorisant de fortes extensions de surfaces agricoles dans des régions-clés du système alimentaire mondial. De telles augmentations de surfaces cultivées peuvent être responsables de dégâts environnementaux importants et notamment induire un accroissement des émissions agricoles de gaz à effet de serre par mise en culture de nouvelles terres. C'est pourquoi, parmi les différentes analyses que nous avons réalisées pour évaluer la sensibilité de nos résultats à des jeux d'hypothèses différents sur certaines variables-clés[122], nous privilégierons ici les analyses intégrant un resserrement de la contrainte portant sur les terres cultivables. Deux cas sont analysés : le premier exclut des disponibilités en terres cultivables les surfaces actuellement affectées à la forêt et celles susceptibles d'être urbanisées à l'horizon 2050 ; le second, plus extrême, vise au maintien des surfaces cultivées à leur niveau de « 2010 » dans chacune des régions du monde et par suite, n'autorise aucun accroissement des surfaces cultivées de par le monde.

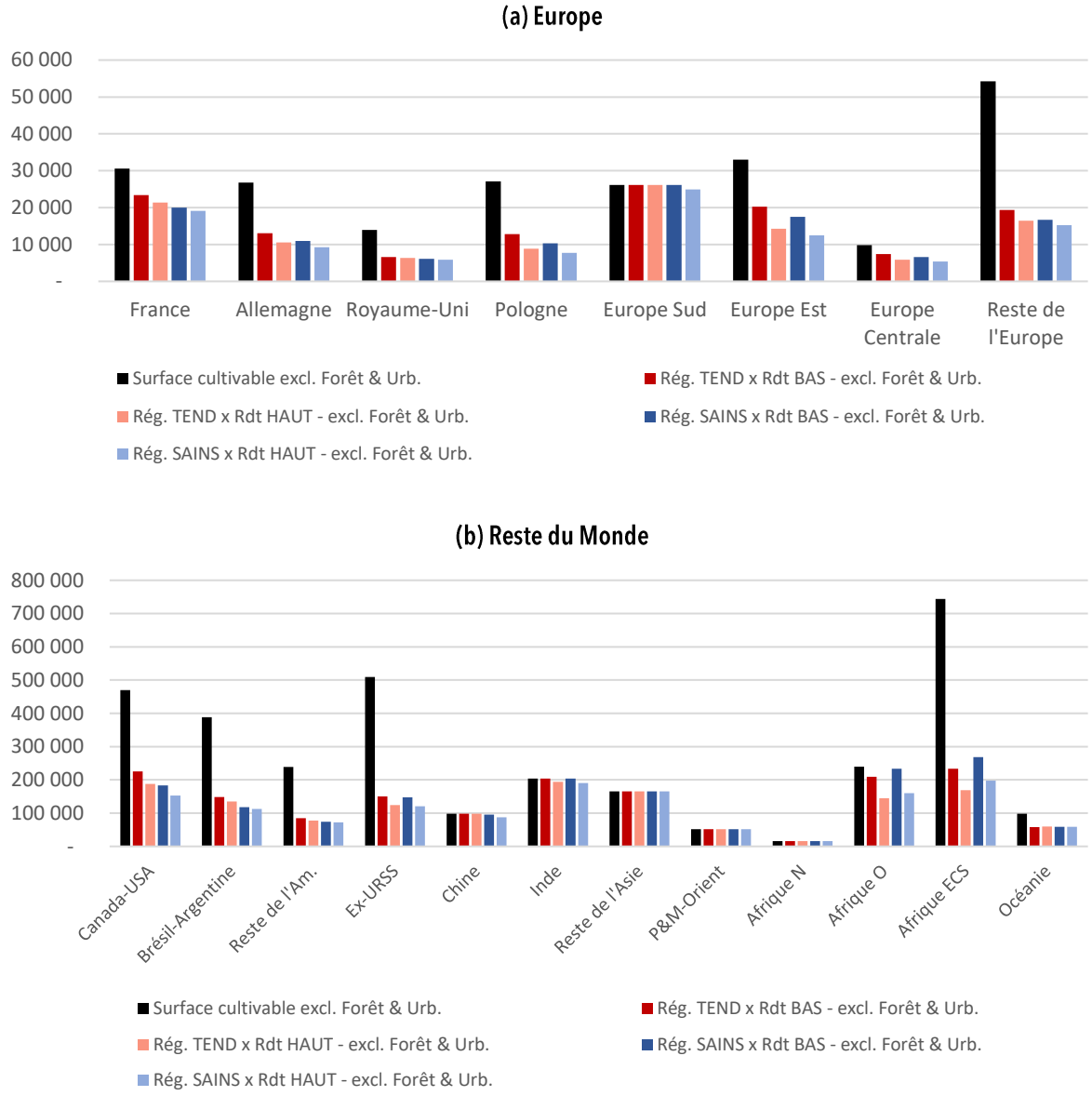
5.4.1. Limitation des terres cultivables aux surfaces non couvertes par la forêt et susceptibles d'être urbanisées

Limiter les terres cultivables aux surfaces non couvertes par la forêt et susceptibles d'être urbanisées est une cible qui combine, d'une part, le retrait de l'usage à des fins agricoles de sols qui pourraient être urbanisés à l'horizon 2050 et, d'autre part, l'impossibilité de mise en culture de terres actuellement boisées. Si le premier élément prend en compte un processus social considéré comme difficilement évitable, le second est un objectif plus directement politique en lien avec les enjeux d'atténuation du changement climatique et la préservation de la biodiversité. Cette contrainte complémentaire réduit considérablement les possibilités d'extension des surfaces cultivées mondiales : la disponibilité en terres cultivables à l'horizon 2050 serait réduite de plus de 30 % à l'échelle mondiale, soit -1,6 milliard d'hectares sur les 5 milliards d'ha considérés comme cultivables dans les simulations précédentes (*cf.* Sous-Section 3.4). Néanmoins, cette forte restriction

[122] L'Annexe D présente les résultats de deux analyses complémentaires portant plus spécifiquement sur les rendements végétaux. La première (Tableau D.1) envisage une différenciation de ces rendements en appliquant aux régions européennes l'hypothèse haute de rendements tout en conservant l'hypothèse basse pour toutes les autres régions du monde. La seconde (Tableau D.2) propose un ensemble de résultats obtenus en fixant les rendements en 2050 sans tenir compte des évolutions techniques (application des seuls effets du changement climatique aux rendements de « 2010 » de chacune des régions du monde). Ce deuxième cas de figure met particulièrement en lumière la formidable hausse des surfaces cultivées mondiales qui serait alors nécessaire pour répondre à la demande (substitution du levier « évolutions techniques » par le levier « surfaces mises en culture ») : là où nos hypothèses des scénarios de référence conduisent à une hausse maximale de +223 Mha (dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas »), cette hypothèse alternative sur les rendements se traduirait par un besoin additionnel en terres cultivées de +763 Mha (dans le cas « régimes sains X rendements hauts », la contraction des terres cultivées de -51 Mha deviendrait un besoin supplémentaire de +601 Mha de surfaces cultivées par rapport à « 2010 »). Cette expansion des surfaces cultivées concernerait en premier lieu les régions disposant de disponibilités en terres cultivables, soit les régions de l'Afrique subsaharienne et les régions où pouvaient apparaître des surplus de terres cultivées (ex-URSS, par exemple) qui seraient alors intégralement mobilisés pour combler les déficits de rendements. Cette analyse complémentaire illustre aussi l'importance clef des évolutions techniques, que celles-ci soient le fruit d'un accroissement des intrants (intensification) ou d'un progrès biologique ou technique (*cf.* Sous-Section 3.4.1).

n'affecterait que peu les marges de manœuvre des régions à fortes disponibilités en terres cultivables telles que les **deux régions d'Afrique subsaharienne**, les trois régions du **continent américain**, l'**ex-URSS** ou même la plupart des **régions européennes** (Figure 5-8).

Figure 5-8. Surfaces cultivables hors surfaces boisées en « 2010 » et surfaces potentiellement urbanisées à l'horizon 2050, et besoin en surfaces cultivées dans les différents scénarios sous cette contrainte en 2050 en Europe (a) et dans le reste du monde (b) (en 1000 ha)



Le resserrement de cette contrainte toucherait principalement les **trois régions d'Asie** qui, comme l'**Afrique du Nord** et le **Proche et Moyen-Orient**, viendraient saturer leur contrainte en terres cultivables. Le **reste de l'Asie** serait limité dans l'extension de ses terres cultivées quel que soit le scénario de référence envisagé, alors que l'Inde ne le serait que sous l'hypothèse de rendements « bas » et la **Chine** uniquement dans le cas de régimes alimentaires « tendanciels ». L'**Europe du Sud** serait également concernée par une telle restriction, mais uniquement sous l'hypothèse des rendements « bas ». Compte tenu des écarts entre les besoins en surfaces cultivées et les disponibilités en terres cultivables, le resserrement de la contrainte joue peu sur le cas indien mais a de forts effets en Chine, dans le reste de l'Asie et dans l'Europe du Sud (Tableau D.3 en Annexe D). Dans ces trois régions, la nouvelle contrainte en terres cultivables à l'horizon 2050 est inférieure aux surfaces cultivées en « 2010 ». Et les surplus de terres que les simulations des scénarios de référence faisaient apparaître en Chine et en Europe du Sud par rapport à « 2010 », ne couvriraient plus les besoins en terres cultivées de ces deux régions que

dans le cas d'une réduction de ceux-ci grâce à l'adoption de régimes alimentaires « sains » en Chine et des rendements végétaux « hauts » en Europe du Sud. Dans les autres cas de figure, la mobilisation de ces surplus ne couvrirait qu'une partie des besoins engendrés par la poursuite des tendances actuelles du régime alimentaire chinois ou par une augmentation limitée des rendements végétaux en Europe du Sud. Dans ce contexte, c'est alors le reste de l'Asie qui subirait une limitation assez sévère de ses capacités productives par rapport à « 2010 » dans la mesure où cette région devait déjà augmenter ses surfaces cultivées pour faire face à l'évolution de ses demandes.

En vue de faire face à ces nouvelles contraintes, ces régions procéderaient à une limitation de leurs exportations qui pourraient, si nécessaire, être accompagnée d'une hausse de leurs importations. En **Inde**, dans le **reste de l'Asie** et en **Europe du Sud**, la réaction se cantonnerait à une réduction des exportations. Seule la **Chine** (ainsi que l'**Afrique du Nord**) augmenterait également son recours aux importations (Tableau D.3 en Annexe D). Pour couvrir ces baisses d'exportations et ces hausses d'importations, les **régions nord- et sud-américaines** ainsi qu'en Europe, la **France**, l'**Allemagne** et la **Pologne**, seraient mises à contribution en augmentant leurs surfaces cultivées ou en limitant les surplus de terres cultivées que les simulations de référence faisaient apparaître.

Compte tenu des poids respectifs des régions concernées et de l'intensité du resserrement de la contrainte en terres, la déviation des résultats par rapport aux simulations de nos hypothèses de référence ne serait significative que dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas ». Sous cette double hypothèse, l'extension des surfaces cultivées mondiales s'accentuerait encore d'environ 13 Mha. En outre, la **Chine** renforcerait sa position d'importateur agricole net, alors que les régions exportatrices nettes, comme le **Canada-USA**, le **Brésil-Argentine** ou la **France**, amplifieraient encore leurs positions à l'export (Tableau D.3 en Annexe D). Les écarts relativement aux simulations de référence seraient nettement moins significatifs, voire insignifiants, dans les trois autres scénarios de référence, et notamment en cas d'amélioration des régimes alimentaires vers des régimes « sains ».

5.4.2. Restriction des terres cultivables aux seules surfaces cultivées en « 2010 »

Les bouleversements seraient notablement plus profonds en cas de limitation des surfaces cultivables aux seules surfaces cultivées en « 2010 ». Une telle restriction peut s'envisager comme étant le résultat de la mise en œuvre d'accords internationaux visant à la préservation des espaces naturels et des terres boisées ou en prairie, à des fins d'atténuation du changement climatique et/ou de limitation de l'érosion de la biodiversité. Elle peut aussi résulter des divers phénomènes à l'origine de la dégradation de la qualité des sols au regard de leur potentiel agronomique. On connait aujourd'hui l'acuité du problème, que le dernier rapport spécial du GIEC a cherché à documenter (Jia *et al.*, 2019). Néanmoins, son ampleur est difficile à quantifier et sa projection à 2050 *a fortiori* délicate. La restriction des surfaces cultivées à ce qu'elles sont aujourd'hui est ainsi une façon indirecte d'appréhender l'impact de tels enjeux sur les équilibres mondiaux.

Compte tenu des importants besoins en surfaces cultivées qui apparaissaient dans nos simulations précédentes pour des régions-clés comme celles de l'Afrique subsaharienne, la contrainte sur les terres cultivables deviendrait alors drastique et conduit même à des impossibilités de bouclage du modèle. Trois de nos quatre scénarios de référence ne peuvent en effet être simulés sous cette contrainte accentuée, les surfaces disponibles dans le monde étant insuffisantes pour couvrir les besoins des régions devant limiter l'extension de leurs surfaces cultivées[123].

L'hypothèse de rendements « bas » engendre systématiquement l'échec de la simulation. Dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas », la mobilisation des 77 Mha de surplus de terres dégagés avec la contrainte en terres initiale (situés en grande partie en ex-URSS) ne suffirait pas à compenser la production permise par les 300 Mha d'extension de surfaces cultivées que les régions concernées (notamment, l'Afrique subsaharienne et l'Inde) ne pourraient plus mobiliser. L'écart entre ces deux valeurs serait un peu moins conséquent si les régimes alimentaires évoluaient vers des régimes plus sains : les 127 Mha de surplus de terres susceptibles d'être remobilisés seraient toujours insuffisants pour couvrir ce qu'auraient pu produire les 321 Mha qui ne pourraient plus être cultivés. Cette infaisabilité perdure quand le scénario combine « régimes sains X rendements hauts », même si, dans ce cas, les surplus potentiels en surfaces cultivées (208 Mha) sont supérieurs aux surfaces qui ne peuvent plus être cultivées (157 Mha). Dans ce cas de figure, ce sont principalement les besoins des deux régions d'Afrique subsaharienne qu'il faudrait couvrir : leurs besoins concernent les 122 Mha qu'elles

[123] Ceci se traduit dans le modèle par une infaisabilité, *i.e.* l'impossibilité d'ajuster l'offre à la demande à l'échelle mondiale.

auraient pu exploiter en plus avec la contrainte de terres initiale. Il est possible que le modèle bloque alors en ne trouvant pas comment augmenter les importations dont ces régions auraient besoin pour couvrir leurs besoins en certains produits spécifiques.

In fine, ce n'est que dans le cas de « régimes tendanciels X rendements hauts », que le modèle trouve les moyens de couvrir les besoins de chacune des régions du monde sans augmenter nulle part les surfaces cultivées par rapport à leur extension de « 2010 ». Dans cette configuration et par rapport à l'hypothèse de référence, les 130 Mha de besoins en terres qui ne pourraient plus être cultivées, émaneraient pour plus de la moitié des **deux régions de l'Afrique subsaharienne**, mais aussi de l'**Inde**, du **Brésil-Argentine**, du **reste de l'Asie** et de l'**Océanie**. Ils pourraient être compensés par la production réalisée sur les surplus de terres que les autres régions du monde seraient en capacité de remobiliser.

Outre l'**ex-URSS**, les différentes **régions européennes**, l'ensemble **Canada-USA** et la **Chine** seraient en mesure de contribuer à cet effort en mettant en culture l'ensemble des terres qu'elles cultivaient en « 2010 ». Ainsi, à l'issue de la simulation, toutes les régions du monde atteignent leur contrainte en terres cultivées quand celle-ci correspond aux surfaces cultivées en « 2010 » et aucune ne fait plus apparaître de surplus de terres.

De ce fait, toutes les régions qui dégageaient des surplus de terre sous la contrainte en terres cultivables initiale augmenteraient significativement leur production agricole : l'**ex-URSS** doublerait sa production par rapport à « 2010 », l'**Europe** dans son ensemble, le **Canada-USA** et la **Chine** augmenteraient leurs productions chacun de 50 % par rapport à « 2010 » (Figure 5-9 et Tableau D.4 en Annexe D). A l'inverse, les régions contraintes limiteraient la progression de leur niveau de production. Ainsi, les **deux régions d'Afrique subsaharienne** n'auraient « que » la possibilité de doubler leur production agricole, alors que celle-ci était en mesure de tripler avec la contrainte de terres utilisée dans les scénarios de référence. L'Inde devrait limiter cette augmentation à +60 % au lieu de +75 % sous l'hypothèse de référence.

La contrepartie de cette contrainte consiste bien sûr en un accroissement des échanges mondiaux et une accentuation de la dépendance aux importations des régions concernées (Figure 5-10). Ainsi, les volumes d'importations nettes des **régions d'Afrique subsaharienne** doubleraient par rapport à ce qu'ils seraient devenus avec une contrainte en terres cultivables moins stricte. De telles évolutions correspondraient à une multiplication par six ou par sept des importations nettes « 2010 » de ces régions, induisant des dépendances nettes aux importations presque trois fois plus élevée qu'en « 2010 » pour la région **Afrique de l'Ouest** (34 % versus 12 % dans la situation initiale) et de plus du double pour la région **Afrique de l'Est, centrale et du Sud** (33 % versus 15 % dans la situation initiale). L'**Inde**, dont les importations nettes sont en « 2010 » relativement faibles et augmenteraient déjà significativement dans nos projections initiales, atteindraient dans ce scénario un niveau de dépendance aux importations agricoles proche de ceux de l'Afrique sub-saharienne dans la situation initiale (soit 13 % versus 1% dans la situation initiale).

En réponse à ces demandes mondiales, l'**ex-URSS**, en mobilisant l'ensemble de ses surfaces actuellement cultivées, deviendrait un acteur majeur des échanges internationaux *via* un quadruplement de ses exportations : ses niveaux d'exportations seraient alors supérieurs à ceux de l'ensemble **Brésil-Argentine** qui, du fait de la contrainte de surfaces, devrait ralentir la croissance de ses productions et de ses exportations. Le **Canada-USA** renforcerait également, mais dans une moindre ampleur, ses exportations nettes, tandis qu'en Europe, seule l'**Europe de l'Est** accroitrait suffisamment ses exportations nettes pour jouer un rôle, certes limité, dans l'approvisionnement nécessaire aux régions du monde à la fois très contraintes et en forte croissance de leur demande. Enfin, la **Chine** resterait un importateur agricole net majeur tout en exportant des quantités non négligeables sur les marchés mondiaux (Tableau D.4 en Annexe D).

Au total, le resserrement de la contrainte de terres cultivables ne modifierait que peu les résultats des simulations si elle était limitée au maintien des surfaces boisées ou urbanisables, les régions à fort besoin de terres cultivées étant alors peu contraintes. Seule la **Chine**, dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas », serait amenée à recourir plus massivement aux importations, tout en mobilisant toutes ses terres cultivables non boisées. L'équilibre entre les emplois et les ressources serait nettement plus difficile à assurer au niveau mondial si le resserrement de la contrainte allait jusqu'à l'impossibilité d'étendre, dans chaque région du monde, les surfaces cultivées au-delà des niveaux de l'année de référence « 2010 ». Cette situation extrême ne serait d'ailleurs pas en mesure de couvrir les besoins en produits agricoles des différentes régions du monde dans trois de nos quatre scénarios, et les conclusions que nous avons précédemment tirées du seul scénario susceptible de nourrir le monde à hauteur de nos hypothèses, seraient assez radicalement remises en cause : les échanges mondiaux s'amplifieraient fortement grâce à la progression des niveaux de production **nord-américain** et de l'**ex-URSS**, les **régions européennes** ne pouvant alors que contribuer peu à l'établissement de ces équilibres mondiaux.

Figure 5-9. Niveaux de production européens et dans le reste du monde, en « 2010 » et à l'horizon 2050 sous deux hypothèses de contrainte de terres cultivables : contrainte initiale *versus* restriction aux seules surfaces cultivées en « 2010 » (scénario « régimes tendanciels x rendements hauts », en milliards de Kcal)

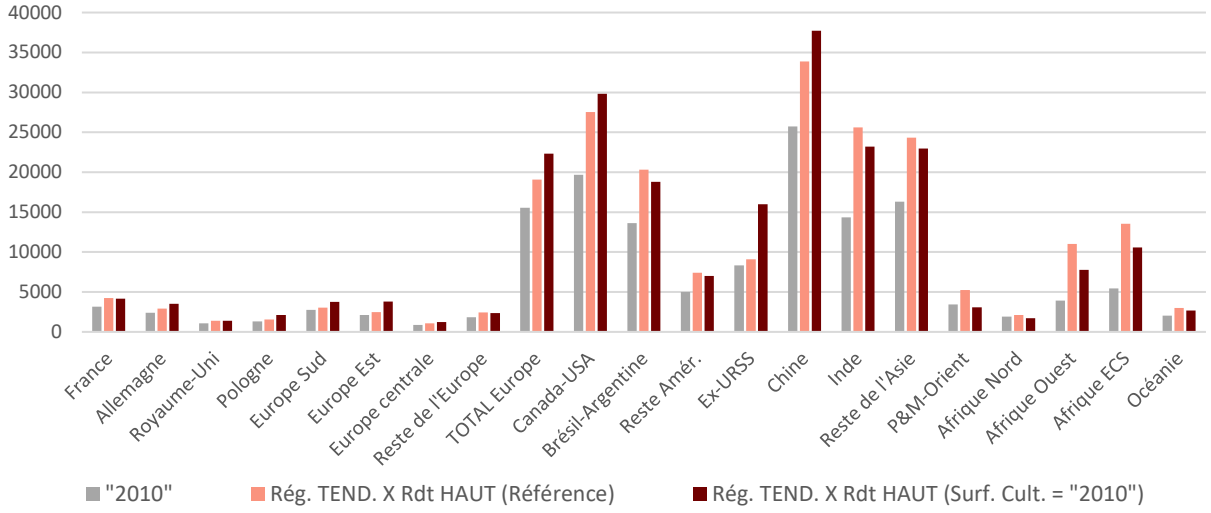
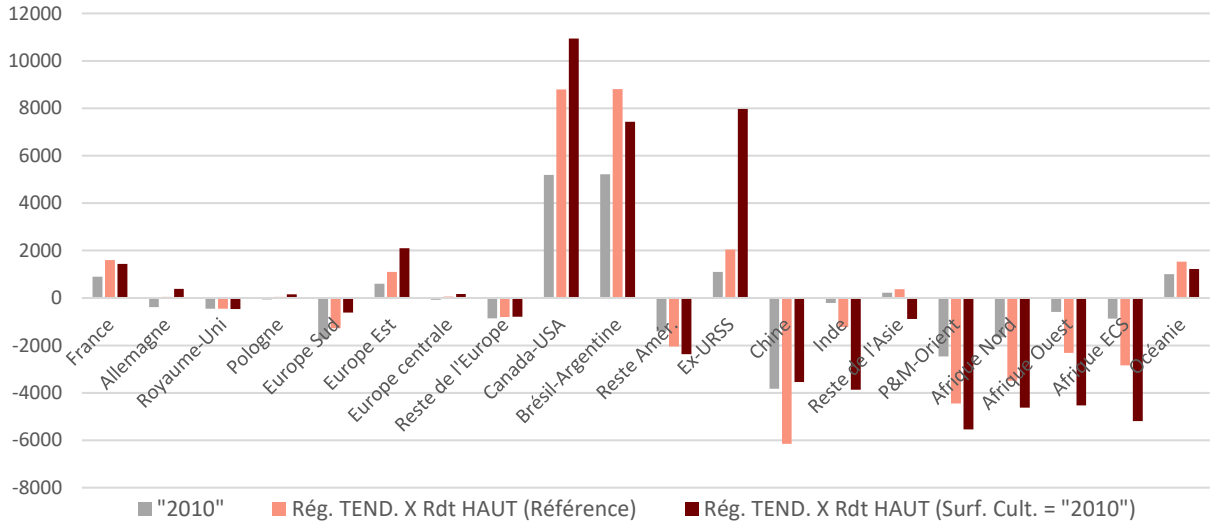


Figure 5-10. Niveaux d'exportations nettes en Europe et dans le reste du monde, en « 2010 » et à l'horizon 2050 sous deux hypothèses de contrainte de terres cultivables : contrainte initiale *versus* restriction aux seules surfaces cultivées en « 2010 » (scénario « régimes tendanciels x rendements hauts », en milliards de Kcal)



5.5. Synthèse partielle

En cohérence avec la littérature antérieure, nos résultats de simulation font apparaître des **extensions de surfaces cultivées modérées à l'échelle agrégée de l'ensemble du monde à l'horizon 2050, voire, sous certaines hypothèses très favorables, une possible contraction de ces surfaces**, comme c'est le cas d'une évolution des régimes alimentaires mondiaux vers des régimes « sains » qui, combinée à de fortes hausses des rendements végétaux, permettrait de réduire de 3 % les surfaces cultivées mondiales par rapport à leur extension de « 2010 ». Néanmoins, derrière ces évolutions globales, se cache une **forte différenciation entre régions du globe, entre des régions à forte augmentation du besoin en surfaces cultivées et des régions pour lesquelles les contractions de surfaces cultivées pourraient être importante**s.

En tenant compte également des évolutions de surfaces affectées aux prairies permanentes (que les hypothèses retenues ici en matière de rendements de l'herbe surestiment probablement fortement), nos résultats font apparaître des **situations de tensions extrêmes sur les surfaces agricoles dans certaines régions du monde où les augmentations de surfaces consacrées à l'agriculture (cultures et prairies permanentes) affecteraient grandement les surfaces actuellement en forêt ou à l'état naturel (savane et lande comprises)**. De telles évolutions, peu compatibles avec les impératifs environnementaux contemporains, que ceux-ci visent l'atténuation du changement climatique ou la réduction de la dégradation de la biodiversité, concernent principalement l'**Afrique subsaharienne**, compte tenu de sa croissance démographique à venir et des besoins nutritionnels de sa population insuffisamment couverts aujourd'hui. L'**Inde** pourrait se retrouver dans une situation comparable compte tenu de sa dynamique démographique et de sa faible disponibilité en terres. Il en serait de même, mais dans une moindre mesure et essentiellement dans le cas de la poursuite des tendances actuelles des régimes alimentaires mondiaux, pour le **Brésil-Argentine** qui augmenterait ses surfaces cultivées pour répondre non seulement à l'évolution de sa demande domestique mais aussi à l'augmentation de la demande mondiale en produits agricoles destinés à l'alimentation animale, c'est-à-dire pour accroître ses exportations de tourteaux et de produits animaux. Si, pour les régions d'Afrique subsaharienne et l'Inde, l'enjeu est de limiter l'extension des surfaces agricoles tout en répondant aux besoins nutritionnels de leur population, l'enjeu pour le Brésil-Argentine, mais aussi pour l'ensemble du monde dans un contexte où le changement climatique et la biodiversité sont des biens publics globaux, est d'éviter les extensions de surfaces cultivées en réduisant ou en réorientant les demandes de leurs clients en produits agricoles, notamment destinés à l'alimentation animale.

A l'inverse, **certaines régions du monde verraient leurs besoins en surfaces cultivées se réduire, leur permettant de dégager des surplus de terres par rapport à ce qu'elles exploitent dans l'année de base « 2010 »**. Compte tenu notamment des évolutions de leurs populations respectives, les pays de l'**ex-URSS** et, en Europe, l'**Europe de l'Est**, la **Pologne**, l'**Allemagne** et l'**Europe centrale** pourraient se retrouver dans cette situation. La mobilisation de ces surplus de terres en vue de répondre aux enjeux d'extension des surfaces cultivées dans d'autres zones du monde pointées ci-dessus, ainsi qu'à la situation alarmante de dépendance aux importations agricoles de l'Afrique du Nord et du Proche et Moyen-Orient, engendrerait, soit un renforcement prononcé de la position exportatrice de l'ex-URSS et l'Europe de l'Est, soit un passage d'importateur agricole net à exportateur net pour les autres régions européennes concernées. Elles rejoindraient ainsi les grandes régions exportatrices (Canada-USA, Océanie et, pour certains produits, la France) dont le rôle d'exportateur net aurait tendance à s'accentuer. Dans le cas d'un passage à des régimes alimentaires « sains », la **France** et la région **Canada-USA** seraient également en mesure de dégager des surplus de terres et pourraient ainsi participer également aux efforts de réduction des extensions de surfaces agricoles relevées plus haut.

Selon nos résultats, la **Chine** et l'**Europe du Sud** sont deux cas particuliers. Ces deux régions, de taille bien sûr très différente, sont actuellement fortement importatrices de produits agricoles. Elles seraient néanmoins, toujours selon nos résultats, en mesure de réduire leurs surfaces cultivées à l'horizon 2050 tout en maintenant à un niveau élevé les volumes de leurs importations. Un tel résultat, dû à certaines spécificités du modèle utilisé, apparaît peu réaliste, les régions concernées ayant probablement avantage de **mobiliser leurs surfaces cultivées pour réduire à terme leur dépendance aux importations agricoles**. C'est ce que pourrait faire en partie l'Europe du Sud, à condition que ses ressources en eau le lui permettent. La Chine pourrait même aller plus loin dans le cas d'un passage à des régimes alimentaires « sains ». Dans ce cas, elle dégagerait encore des surplus de terres après avoir couvert l'ensemble de ses importations par une augmentation de sa production domestique. Néanmoins, il est difficile de considérer que la Chine pourrait devenir à l'horizon 2050 un exportateur net compte tenu des évolutions possibles de ses disponibilités en terres cultivables non affectées aux usages forestiers ou urbains.

Chapitre 6. Marges de manœuvre pour réduire l'extension des terres cultivées dans certaines régions du monde : quelle contribution possible de l'Europe ?

La diminution du besoin en terres cultivées dans certaines régions européennes à l'horizon 2050 et le surplus potentiel de terres qui en résulte permettent d'examiner dans ce chapitre **dans quelle mesure l'agriculture européenne pourrait contribuer à mieux faire face à des enjeux environnementaux mondiaux directement liés à l'usage agricole des terres**. En effet, le surplus de terres dégagé offre l'opportunité de réfléchir à des stratégies agricoles d'utilisation de ce potentiel, auxquelles pourraient contribuer l'Europe, qui favoriseraient l'allègement des tensions foncières identifiées dans d'autres zones du monde dans le Chapitre 5.

Dans ce chapitre, nous analysons donc comment l'agriculture européenne pourrait contribuer à diminuer la tension sur les terres dans les régions du monde où nos projections envisagent une extension des terres cultivées, comme, par exemple, en Afrique subsaharienne ou en Amérique du Sud. **Deux hypothèses alternatives d'utilisation agricole des surplus de terres européens sont considérées correspondant à, respectivement, 1) l'augmentation de la production agricole européenne, permettant de dégager un surplus de production dédié à l'exportation ; 2) le développement de la culture d'oléo-protéagineux en substitution (au moins partielle) aux importations européennes de protéines végétales utilisées en alimentation animale**. Ces options ne sont pas exclusives, au sens où elles peuvent être combinées dans des proportions variables.

Dans la mesure où d'autres régions du monde (Canada-USA et ex-URSS) pourraient également disposer, relativement à aujourd'hui (« 2010 »), d'un surplus potentiel de terres, parfois bien plus important que les régions européennes, **ces deux alternatives sont également envisagées pour le Canada-USA et l'ex-URSS**, ceci afin de comparer les capacités respectives des régions européennes et de ces autres pays à diminuer la pression sur les terres cultivées dans les autres zones du monde.

Dans une région donnée, le surplus potentiel de terres disponible à l'horizon 2050 pour la mise en œuvre de ces stratégies correspond à la différence entre les surfaces cultivées en « 2010 » et le besoin en terres cultivées en 2050 tel qu'estimé dans les scénarios de référence. Comme expliqué dans le Chapitre 5, le fonctionnement du modèle GlobAgri-AE2050 conduit à ce que certaines régions diminuent leurs besoins en terres cultivées tout en restant importatrices nettes de produits agricoles. Dans un tel contexte, il est possible et sans doute plus réaliste de supposer que ces régions chercheront à mobiliser les surplus de terres correspondants pour réduire leur dépendance aux importations. Ceci nous conduit à exclure l'Europe du Sud et la Chine des calculs qui suivent[124]. Ci-après, le « surplus potentiel de terres européen » désigne donc systématiquement la totalité des surplus potentiels de terre des régions européennes, à l'exclusion de l'Europe du Sud.

Comme souligné dans le Chapitre 5, les surplus potentiels de terres disponibles sont logiquement plus élevés dans un contexte de rendements « hauts » relativement à un contexte de rendements « bas ». Dans les régions européennes, l'hypothèse de régimes alimentaires « sains » ajoute une marge de manœuvre supplémentaire par rapport à l'hypothèse de régimes alimentaires « tendanciels » (Figure 6-1)[125]. Le surplus potentiel de terres serait principalement situé en **Europe de l'Est** (entre 1,4 et 8 millions d'hectares – Mha – selon les scénarios), en **Pologne** (entre 0,4 et 4 Mha), en **Allemagne** (entre 0,2 et 3 Mha) et en **Europe centrale** (entre 0,2 et 1,3 Mha). La **France**, le **Royaume-Uni** et le **Reste de l'Europe** disposeraient de surplus potentiels nettement plus faibles, et seulement dans les scénarios de régimes alimentaires « sains » (au maximum 700 000 ha pour la France, 300 000 ha pour le Royaume-Uni et 50 000 ha pour le reste de l'Europe dans le scénario « régimes sains X rendements hauts ») (Figure 6-1 ; Tableau E.1 en Annexe E). Le surplus potentiel de terres en Europe qui serait utilisé pour développer l'une des deux stratégies serait donc compris entre 2 Mha au minimum (scénario de référence « régimes tendanciels X rendements bas ») et 17 Mha au maximum (scénario de référence « régimes sains X rendements hauts »).

[124] Rappelons que, dans le premier cas, la mobilisation du surplus de terres en vue de réduire la dépendance aux importations, ne conduirait qu'à limiter celle-ci, alors que, dans le cas de la Chine et si ses habitants adoptaient un régime alimentaire plus sain, elle pourrait passer du statut d'importateur net à celui d'exportateur net dans des proportions assez importantes (*cf.* Sous-Sections 5.3.1 et 5.3.2).

[125] Ce qui n'est pas le cas dans les régions de l'Afrique subsaharienne qui, sous cette hypothèse, accroîtraient encore de façon importante leurs terres cultivées).

Par comparaison, l'**ex-URSS** disposerait d'un surplus potentiel compris entre 54 et 83 Mha et le **Canada-USA** d'un surplus potentiel variant entre 16 et 44 Mha, sauf dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas » où cette région ne dégagerait pas de surplus de terres (Figure 6-2).

Figure 6-1. Surplus potentiels de terres dans les différentes régions européennes (hors Europe du Sud) dans les quatre scénarios de référence (1000 ha)

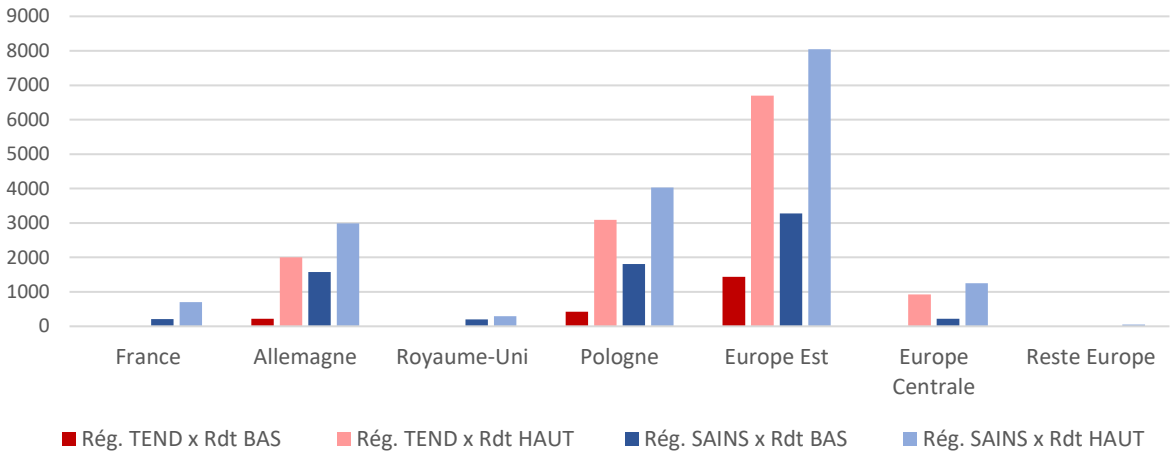
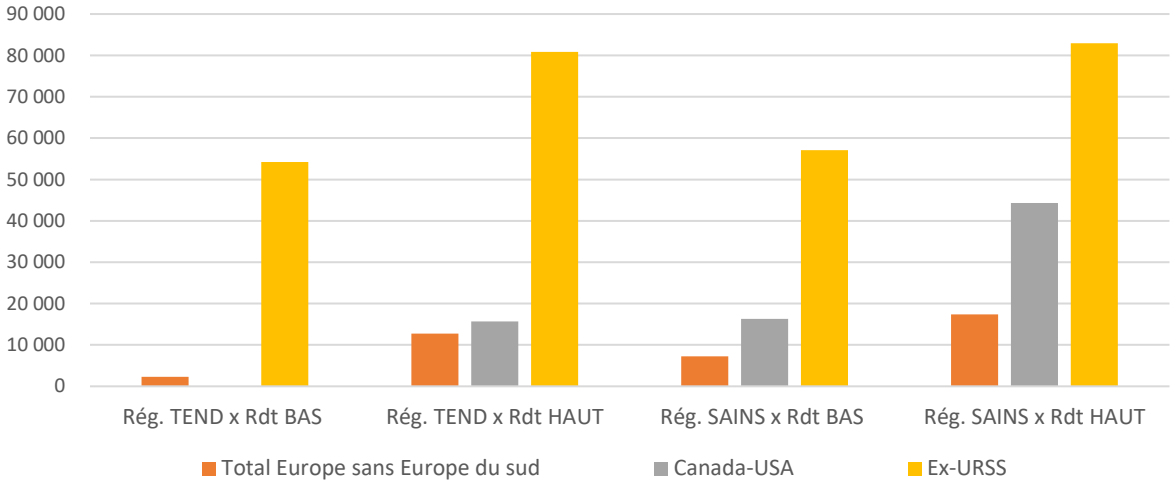


Figure 6-2. Surplus potentiels de terres en Europe (sans l'Europe du Sud), au Canada-USA et en ex-URSS dans les quatre scénarios de référence (1000 ha)



6.1. Augmentation des exportations permise par l'utilisation des surplus potentiels de terres

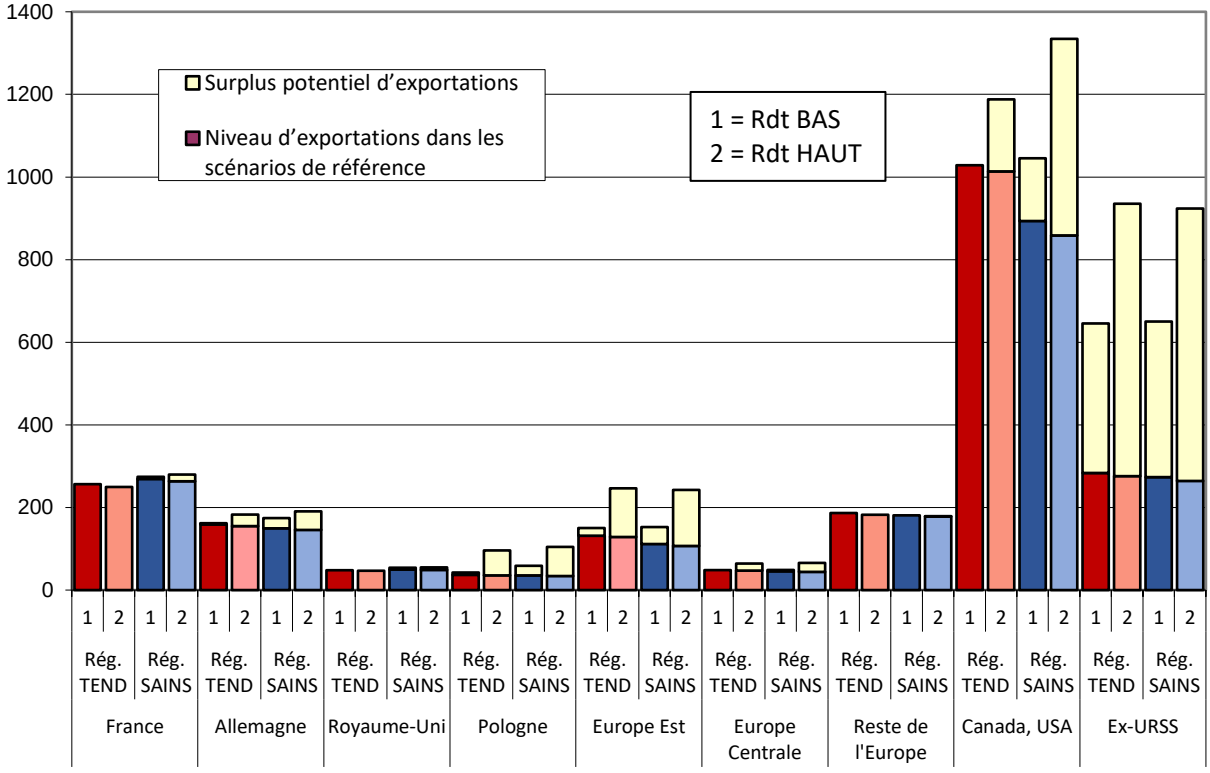
En mobilisant la totalité du surplus potentiel de terres européen pour augmenter les productions végétales dédiées à l'export, l'Europe pourrait, *via* la mécanique des échanges mondiaux, contribuer à alléger des tensions sur les surfaces en Afrique en permettant à cette dernière de s'appuyer davantage sur les importations pour répondre à sa demande domestique plutôt que d'étendre ses surfaces cultivées et en prairies permanentes ; au prix néanmoins d'une dépendance accrue aux importations

qui n'est pas sans poser problème (*cf. infra*)[126]. Dans un premier temps, nous calculons les productions végétales[127] supplémentaires (surplus potentiel de production) qui pourraient être exportées par les régions européennes disposant d'un surplus potentiel de terres selon les scénarios de référence (*cf. supra*)[128].

6.1.1. Évaluation du potentiel d'exportations agricoles de l'Europe sur les surplus de terres

La Figure 6-3 présente les niveaux des exportations agricoles totales en 2050, en équivalent calories, des différentes régions européennes, du Canada-USA et de l'ex-URSS dans les quatre scénarios de référence, et les augmentations potentielles des exportations des régions qui disposeraient de surplus de terres en 2050.

Figure 6-3. Niveaux des exportations agricoles en 2050 et augmentations possibles de celles-ci à partir des surplus potentiels de terres dans les quatre scénarios de référence (Md kcal)



Au sein des régions européennes, les augmentations potentielles les plus élevées se situent dans les régions où les surplus de terres seraient les plus importants, soit en Europe de l'Est, en Pologne, puis en Allemagne et en Europe centrale. Ces quatre régions pourraient augmenter de manière significative leurs exportations agricoles, ceci d'autant plus si les rendements évoluaient selon la dynamique la plus favorable et si des régimes « sains » étaient adoptés (les niveaux des rendements ont un impact plus élevé sur ces exportations que les régimes). L'**Europe de l'Est** pourrait ainsi augmenter ses exportations agricoles dans une fourchette comprise entre +14 à +127 %, la **Pologne** entre +16 et +206 %, l'**Allemagne** entre +2 et +31 %, et l'**Europe centrale** entre +7 à +50 %, par rapport au niveau de leurs exportations dans les scénarios

[126] Notons que l'analyse conduite dans ce chapitre se centre plus spécifiquement sur l'allègement des tensions foncières en Afrique sub-saharienne via une augmentation des exportations européennes ; de manière plus générale, nous avons analysé le rôle de l'Europe dans l'allégement des tensions foncières dans les régions du monde où elles risquent d'être les plus fortes (en plus de l'Afrique sub-saharienne, en Afrique du Nord, au Proche et le Moyen Orient et en Asie) dans le chapitre 5, partie 5.1 traitant l'analyse de sensibilité avec contrainte de terres bloquée au niveau des surfaces cultivées en « 2010 ».

[127] Nous considérons ici toutes les productions végétales à l'exception des fourrages.

[128] Pour déterminer quelle culture serait développée sur les surplus potentiels de terres, on convertit les exportations de cultures des différents scénarios de référence en équivalents surfaces en utilisant les projections des rendements associées. On applique ensuite cette structure d'exports au surplus potentiel de terres dans chaque région, en utilisant à nouveau les projections de rendements des différents scénarios pour calculer les productions supplémentaires de chaque région. Les structures relatives à l'exportation, d'une part, des graines, et, d'autre part, des huiles/tourteaux sont supposées inchangées par rapport à celles définies en 2050 dans les scénarios de référence.

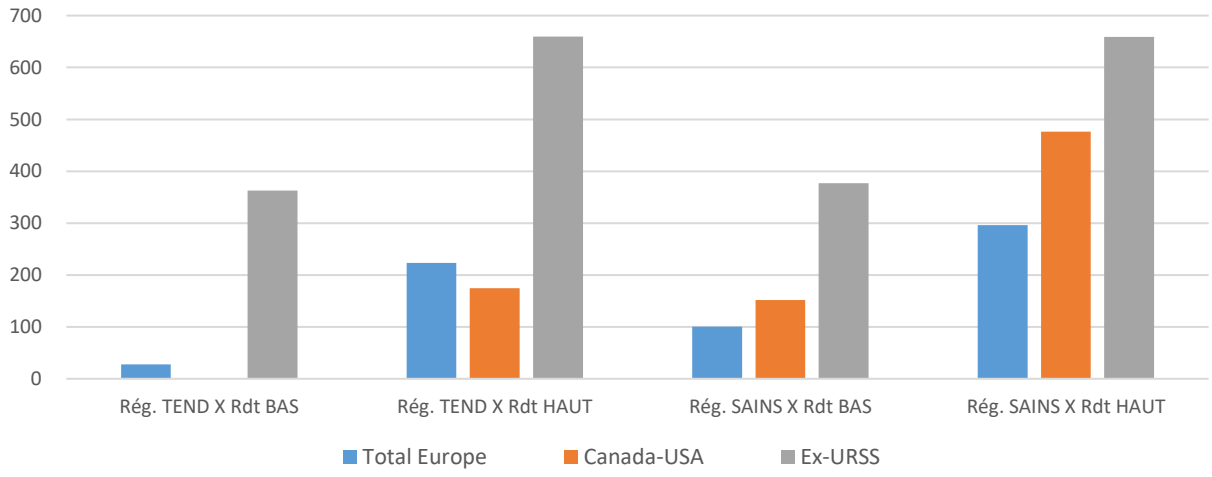
de référence. Par contraste, la France, le Royaume-Uni et le Reste de l'Europe ne disposeraient pas de surplus de terres suffisants pour augmenter significativement leurs exportations agricoles. L'augmentation potentielle maximale serait, dans le scénario « régimes sains X rendements hauts », de +13 % au **Royaume-Uni**, de +6 % en **France** et de 0,3 % dans le **Reste de l'Europe**.

En équivalent calories, l'**Europe de l'Est** disposerait du plus gros potentiel d'export parmi les régions européennes; soit entre 18 et 136 milliards de Kcal (Md kcal) selon les scénarios. Elle serait suivie par la **Pologne** qui pourrait exporter entre 6 et 71 Md kcal en plus par rapport aux scénarios de référence, et par l'**Allemagne** qui pourrait exporter entre 3 et 45 Md kcal en plus. Les autres régions contribueraient dans des proportions moindres, d'au maximum 22 Md kcal pour l'**Europe centrale**, à 16 Md kcal pour la **France**, 6 Md kcal pour le **Royaume-Uni** et 1 Md kcal maximum pour le **reste de l'Europe**.

Par comparaison, les exportations agricoles additionnelles seraient bien plus importantes pour le Canada-USA, et surtout pour l'ex-URSS. Dans cette deuxième région, le surplus potentiel de terres permettrait de plus que doubler les exportations sous hypothèse de croissance modérée des rendements, voire de les multiplier par 2,5 s'ils atteignaient les niveaux les plus hauts : plus précisément, l'**ex-URSS** pourrait augmenter ses exportations agricoles, en équivalent calories, de +128% au minimum sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements bas » et de +249% au maximum sous hypothèses de « régimes sains X rendements hauts ». Si la nature des régimes adoptée aurait peu d'influence sur le surplus potentiel d'exportations de l'ex-URSS, ce ne serait pas le cas pour la région **Canada-USA**. Sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements bas », la région nord-américaine ne pourrait pas augmenter ses exportations agricoles. Elle le pourrait dans les trois autres scénarios de référence, dans une fourchette comprise entre +17 % et +56 %. Ce potentiel d'exportations additionnelles est nettement inférieur à celui de l'ex-URSS, pour un même scénario de référence.

En équivalent calories (*cf.* Figure 6-4), l'**ex-URSS** disposerait ainsi du plus gros potentiel d'exports additionnels, allant de 363 Md kcal au minimum (sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements hauts ») à 660 Md kcal au maximum (quel que soit le régime avec l'hypothèse de rendements « hauts »), tandis que la région **Canada-USA** pourrait augmenter ses exportations, sous hypothèse de régimes « sains », de 152 Md kcal à 476 Md kcal au maximum selon le niveau de rendement retenu. Enfin, **l'Europe** dans son ensemble pourrait exporter entre 28 Md kcal supplémentaires au minimum sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements bas » et 296 Md kcal au maximum sous hypothèses de « régimes sains X rendements hauts ». À titre de comparaison, les importations de l'Afrique (hors Afrique du Nord) s'élèveraient à 580 à 590 Md kcal selon nos scénarios, un niveau 3 fois supérieur aux importations de la zone en « 2010 ». **L'Europe** dans son ensemble serait donc en mesure de satisfaire environ la moitié des importations africaines dans le scénario « régimes sains X rendements hauts », tandis que le **Canada-USA** pourrait en satisfaire plus de 80 % et l'**ex-URSS** pourrait combler plus de la totalité des importations africaines quel que soit le régime sous l'hypothèse de rendements « hauts ». Les exportations additionnelles des trois zones représenteraient au minimum 4 % pour l'**Europe**, 26 % pour le **Canada-USA** et 63 % pour l'**ex-URSS** des importations africaines dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas ».

Figure 6-4. Surplus potentiels d'exportations des régions européennes, du Canada-USA et de l'ex-URSS à partir des surplus de terres dans les quatre scénarios de référence (Md kcal)



6.1.2. Contribution de l'Europe à l'allègement des tensions sur les surfaces africaines

L'Europe ainsi que (et même surtout) les autres régions exportatrices disposant d'un surplus potentiel de terres pourraient contribuer à alléger les tensions foncières identifiées dans les scénarios de référence dans les autres régions du monde, notamment dans les deux régions de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud[129]. Comme on l'a vu plus haut (*cf.* Chapitre 5), d'autres régions du monde, telle que l'Inde, verraient également leurs surfaces cultivées augmenter de façon notable mais les deux régions d'Afrique subsaharienne présentent des caractéristiques qui méritent une attention particulière. Tout d'abord, dans ces deux régions, l'extension des terres cultivées à l'horizon 2050 y serait considérable et s'effectuerait sous le double jeu d'une progression limitée des rendements (même dans l'hypothèse où cette évolution serait la plus marquée) et de l'explosion de la demande liée tant à la croissance démographique qu'à un nécessaire rattrapage nutritionnel. Cette expansion des surfaces cultivées serait même accentuée si des régimes « sains » étaient adoptés. Elle se combinerait en outre à une explosion des prairies permanentes mobilisées pour couvrir les besoins en produits animaux. Même si cette explosion est en partie due à nos hypothèses assez conservatrices en matière d'évolutions du rendement des fourrages et des efficiences animales, de telles évolutions de surfaces agricoles n'en sont pas moins le signe de fortes tensions potentielles sur les usages des sols dans cette partie du monde et de possibles détériorations de ces écosystèmes ayant un rôle important et attendu tant en termes d'atténuation du changement climatique que de préservation de la biodiversité.

L'extension des terres cultivées au détriment des espaces naturels, forestiers ou prairiaux pourrait être allégée à court terme si les exportations agricoles additionnelles de l'Europe, de l'ex-URSS et du Canada-USA permettaient à l'Afrique subsaharienne de sécuriser un recours plus important aux importations. Cependant, sur le plus long terme, cette stratégie d'exportations devrait se doubler d'une stratégie d'amélioration de la productivité de l'agriculture africaine afin que l'aide internationale accompagne ce continent vers une situation alimentaire acceptable et durable.

En traduisant les exportations agricoles estimées précédemment en « équivalents hectares africains », soit en surfaces africaines qu'il ne serait pas nécessaire de mettre en culture en 2050, le « gain potentiel » serait compris entre 4 et 41 Mha grâce aux seuls surplus d'exportations **européens**, entre 26 et 74 Mha grâce à celui du **Canada-USA**, et entre 62 et 97 Mha grâce à celui de l'**ex-URSS** (Tableau E.4 en Annexe E). Si l'Europe, le Canada-USA et l'ex-URSS contribuaient simultanément à cet objectif environnemental, entre 16 % et 60 % des surfaces cultivées en Afrique subsaharienne en 2050 pourraient être préservées : l'extension des surfaces cultivées telle qu'elle apparaît dans les résultats des scénarios de référence serait alors freinée de façon conséquente et même annulée dans certains scénarios. Prise individuellement, la contribution de l'**ex-URSS** (de 14 à 27 % des surfaces subsahariennes en 2050) à cet objectif serait largement supérieure à celle de l'**Europe** (1 à 12 %) ou du **Canada-USA** (8 à 20 %).

Avec ces hypothèses, et dans un contexte de « régimes tendanciels X rendements bas », les surfaces mises en culture dans les deux régions subsahariennes pourraient s'élever à 362 Mha au lieu de 428 Mha estimés dans le scénario de référence équivalent. L'extension des surfaces cultivées pourrait donc être limitée à +56 % par rapport à « 2010 », contre +84 % dans le scénario de référence. Sous hypothèses de « régimes sains X rendements bas », ces surfaces couvriraient 375 Mha au lieu de 497 Mha dans le scénario de référence équivalent, soit une augmentation limitée à +61 % par rapport à « 2010 » (contre +113 % dans le scénario de référence).

Si les rendements évoluaient selon notre hypothèse « haute », le recours aux surplus de productions de l'Europe, de l'ex-URSS et du Canada-USA permettrait même au besoin en surfaces cultivées de l'Afrique subsaharienne de diminuer par rapport à « 2010 ». Les surfaces cultivées dans les deux régions subsahariennes se rétractaient ainsi à 166 Mha sous hypothèse de régimes « tendanciels » au lieu de 308 Mha dans le scénario de référence équivalent (soit -29 % par rapport à « 2010 » contre +32 % dans le scénario de référence) et à 144 Mha sous hypothèse de régimes « sains » au lieu de 355 Mha dans le scénario de référence équivalent (soit -38 % par rapport à « 2010 » contre +53 % dans le scénario de référence). Si l'objectif collectif se limitait au « simple » maintien des surfaces cultivées de l'Afrique subsaharienne, il ne serait pas nécessaire de mobiliser l'ensemble des surplus de terres que pourraient dégager certaines régions par rapport à « 2010 », ce qui laisserait la place, en cas d'augmentation marquée des niveaux de rendements de par le monde, au développement d'autres stratégies complémentaires à cet objectif.

[129] Les régions Afrique du Nord et Proche et Moyen-Orient se trouvent également dans une situation particulièrement tendue du point de vue de leurs surfaces agricoles, mais néanmoins différente. Contrairement au reste de l'Afrique, ces deux régions ne disposent pas de surfaces cultivables pour étendre leurs productions, et ce dès « 2010 » où elles cultivent déjà plus de terres que les surfaces considérées comme cultivables (*cf.* Chapitre 5). Toute augmentation de la demande domestique dans ces deux régions se traduit donc, automatiquement, par des augmentations des importations agricoles sans extension des surfaces cultivées et par un accroissement de leur dépendance aux importations agricoles, déjà élevée en « 2010 » (*cf.* Le Mouël et Schmitt, 2018).

Cette stratégie d'utilisation des surplus potentiels de production de l'Europe, du Canada-USA et de l'ex-URSS pour alléger les tensions foncières en Afrique répond à un objectif environnemental de limitation de la conversion de terres herbacées et forestières en cultures dans cette partie du monde et devrait, pour être crédible, s'intégrer dans des cadres d'accords internationaux relatifs à l'atténuation du changement climatique et/ou de préservation de la biodiversité. Présentée ici uniquement à titre illustratif de l'ampleur de l'économie possible de terres cultivées en Afrique subsaharienne, ce scénario présente néanmoins l'inconvénient majeur d'accroître la dépendance aux importations agricoles du continent africain, alors que ses importations agricoles sont déjà élevées dans la situation initiale de « 2010 »[130]. Il ne peut donc se concevoir qu'accompagné d'une gouvernance agricole et alimentaire efficace au niveau du monde, notamment pour éviter que le continent soit sous la menace de ruptures unilatérales des approvisionnements de la part des régions exportatrices. Cette gouvernance mondiale agricole et alimentaire, qui devra également intégrer l'augmentation de la productivité de l'agriculture africaine, est aujourd'hui défaillante. De plus, il serait légitime que le continent africain bénéficie aussi de mécanismes financiers qui rémunéreraient les bénéfices environnementaux, en termes notamment de stockage de carbone et de préservation de la biodiversité, liés à une moindre conversion de prairies et de forêts en cultures. Dit autrement, le scénario ici considéré n'est envisageable que dans le cadre non seulement d'une gouvernance agricole et alimentaire mondiale, mais aussi d'une gouvernance mondiale des biens publics environnementaux globaux que sont le climat et la biodiversité : cette deuxième gouvernance est néanmoins aujourd'hui encore plus défaillante que la première.

6.2. Utilisation des surplus potentiels de terres pour diminuer la dépendance européenne aux importations de protéines végétales

L'Europe pourrait choisir d'utiliser ses surplus potentiels de terres pour développer la production domestique de protéines destinées à l'alimentation animale. Cette seconde stratégie pourrait, *via* la réduction des importations européennes de protéines, contribuer à alléger des tensions sur les surfaces hors Europe dédiées à ces productions, notamment en Amérique Latine, permettant ainsi de contribuer à l'enjeu environnemental global de lutte contre l'utilisation des surfaces forestières et des prairies permanentes pour la culture de soja[131]. En cultivant différents types d'oléagineux et/ou de protéagineux, cette stratégie permettrait aussi à l'Europe de diversifier ses cultures, contribuant ainsi à d'autres objectifs environnementaux, domestiques cette fois, par exemple la réduction des utilisations d'engrais minéraux avec des effets bénéfiques sur la biodiversité, la qualité de l'eau et les émissions de gaz à effet de serre (liées à l'azote et les transports notamment). L'Europe étant fortement dépendante des protéines importées, cette option permettrait enfin de réduire sa dépendance protéique, notamment en tourteaux de soja. La dépendance protéique de l'Europe, définie ici comme les importations totales de tourteaux de la zone rapportées à la consommation domestique totale de tourteaux, est en effet supérieure à 50 % en « 2010 », en équivalent protéines. Sa réduction permettrait aussi de limiter les risques d'insécurité des approvisionnements futurs et de possibles flambées des prix dans un contexte d'augmentation croissante de la demande mondiale en protéines végétales, portée notamment par la Chine. La question de la réduction de la dépendance européenne aux importations de tourteaux protéiques fait l'objet d'une attention politique importante au sein de l'Union européenne et dans ses États membres même si force est de reconnaître que les actions et plans adoptés à cette fin ont été, à ce jour, d'une portée très limitée[132].

Dans cette Section, nous calculons le potentiel de production de cultures oléo-protéagineuses permis par l'exploitation des surplus potentiels de terres européens à l'horizon 2050, en prenant l'exemple illustratif du soja qui représente, en « 2010 », 80 % des importations européennes de tourteaux d'oléagineux. Il est naturellement possible d'imaginer d'autres cultures oléagineuses que le soja. L'Encadré 6-1 résume les résultats obtenus en considérant le développement, en Europe, des cultures de colza, de tournesol ou encore de pois protéagineux.

[130] Plus précisément, les deux régions d'Afrique subsaharienne sont, en « 2010 », fortement importatrices de cultures de zone tempérée (blé, maïs, riz, sucre). Elles sont, par contraste, exportatrices nettes, mais dans une moindre mesure, de produits tels que le café, le cacao, certains fruits tropicaux, des fibres, ainsi que certains oléagineux (coprah, arachide).

[131] Sur le point de la déforestation, voir, notamment, European Commission (2013).

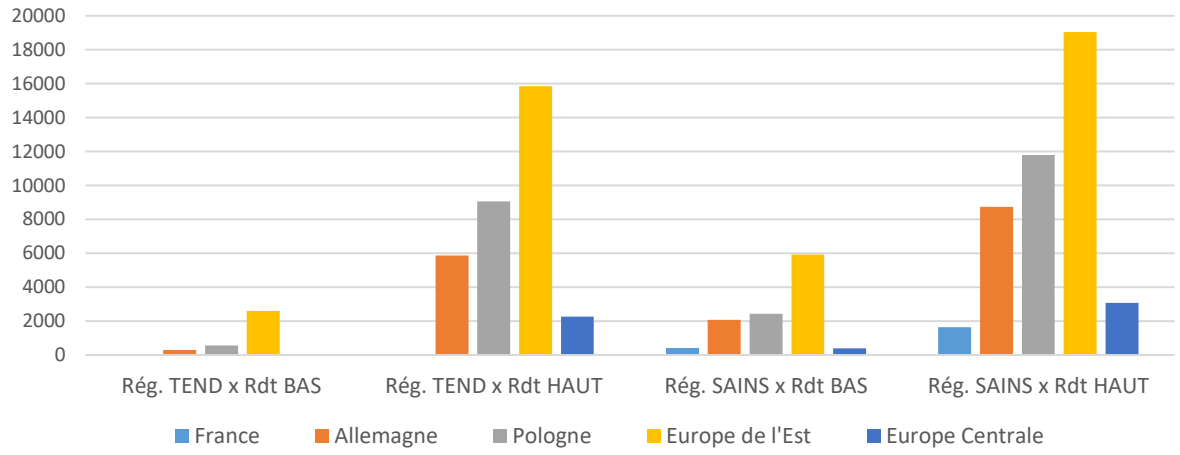
[132] Cette attention s'est récemment traduite par un (nouveau) rapport de la Commission (2018) au Conseil et au Parlement européen sur le développement des protéines végétales dans l'Union européenne (COM/2018/757 final) et, en France, par la définition du Plan protéines végétales pour la France (2014-2020).

6.2.1. Évaluation du potentiel de production de soja en Europe

La question de la possibilité agronomique de la culture de soja dans les différentes régions européennes se pose. Cette culture est déjà bien développée dans certaines zones, comme les régions de la zone Danubienne, de la Suisse à la Roumanie, en passant par la plaine du Pô en Italie[133], auxquelles il faut ajouter la France (Aquitaine, Occitanie, Bourgogne). Il s'agit alors d'une culture le plus souvent irriguée dans le sud de l'Europe et conduite en sols profonds. La culture du soja reste marginale dans les autres zones européennes mais avec un potentiel de développement élevé dans certaines d'entre-elles, plus spécifiquement en Allemagne et en Pologne "grâce" au changement climatique. Dans ces régions du centre et du nord de l'Europe, la culture de soja peut s'envisager sans irrigation (comme c'est le cas en maïs). Au nord de cette latitude, la saison de culture serait trop courte même avec des variétés adaptées : nous avons donc supposé que le Reste de l'Europe et le Royaume-Uni ne pourraient pas développer la culture du soja.

Sur cette base, **l'Europe** dans son ensemble serait en mesure de produire de l'ordre de 4 à 44 millions de tonnes (Mt) de tourteaux de soja selon l'hypothèse retenue quant aux régimes et à la dynamique d'évolution des rendements. Notons que les productions potentielles de graines de soja permettant l'obtention de ces tourteaux entraineraient une co-production d'huile de soja de l'ordre de 1 à 10 Mt. Cette production additionnelle proviendrait pour l'essentiel de l'**Europe de l'Est** qui contribuerait à hauteur de 42 % à 75 % à la production européenne totale de tourteaux de soja, selon les scénarios (Tableau E.5 en Annexe E). Cette seule région européenne serait ainsi capable de produire, sur son surplus de terres, l'équivalent de 3 à 20 Mt de tourteaux selon les scénarios (Figure 6-5). Ensuite viennent la **Pologne**, avec une production potentielle de tourteaux de soja comprise entre 1 et 12 Mt, et l'**Allemagne**, qui pourrait produire moins de 1 Mt à près de 9 Mt de tourteaux de soja selon les scénarios. Les deux autres régions productrices, contribueraient à hauteur de 0,4 à 1,6 Mt pour la **France** et de 0,4 à 3,1 Mt pour l'**Europe centrale**.

Figure 6-5. Production potentielle de tourteaux de soja permise par l'utilisation des surplus potentiels de terres européens en fonction des scénarios (1000 tonnes)



Ces chiffres sont à comparer à la production européenne actuelle (« 2010 ») de soja, soit 1,6 Mt de graines et 11 Mt de tourteaux de soja dont 1 Mt environ à partir de graines domestiques et 10 Mt environ à partir de graines importées. Les importations nettes de tourteaux de soja étaient égales, en « 2010 », à environ 20 Mt. La demande totale de tourteaux de soja pour l'alimentation du bétail était donc de 31 Mt en « 2010 ». La production additionnelle de tourteaux de soja dans les différents scénarios, allant de l'ordre de 4 Mt (scénario « Régimes tendanciels x rendements bas ») à 44 Mt (scénario « Régimes sains x rendements hauts »), pourrait donc représenter entre 11 % et jusqu'à plus de 140 % de la demande actuelle de tourteaux de soja en Europe.

[133] Les surfaces européennes de soja étaient égales, en « 2010 », à 688 000 ha au total, dont 288 000 ha en Europe de l'Est, 277 000 ha en Europe du Sud, 68 000 ha en Europe centrale, 54 000 ha en France, 1400 ha en Allemagne et 200 ha en Pologne.

6.2.2. Évaluation de l'évolution de la dépendance protéique de tourteaux en l'Europe

En remplaçant les importations par les productions domestiques potentielles de tourteaux de soja, il apparaît que l'Europe serait capable de substituer une partie, voire l'intégralité sous hypothèse haute d'évolution des rendements, de ses importations nettes par une production domestique et ainsi de réduire, voire d'annuler, sa dépendance aux importations de tourteaux protéiques. Ce résultat est ici obtenu en admettant la possibilité d'échanges de tourteaux domestiques de soja des régions européennes excédentaires ou qui le deviennent (Europe de l'Est, Allemagne, Pologne, Europe centrale[134]) vers les régions européennes qui restent déficitaires (France, Royaume-Uni, Reste de l'Europe et Europe du Sud[135]). Ce résultat est illustré par la Figure 6-6 ci-après.

Figure 6-6. Importations nettes de tourteaux en Europe, avant et après déduction de la production domestique potentielle de tourteaux de soja (Mt d'équivalent protéines)



Lorsqu'on déduit la production européenne potentielle de tourteaux de soja des importations européennes nettes de tourteaux (selon le scénario de référence correspondant), il apparaît que le scénario « régimes tendanciels X rendements bas » permettrait de réduire ces importations jusqu'à 11,1 millions de tonnes de protéines équivalent (Mtpe), soit -17 % par rapport aux 13,4 Mtpe importées en 2050 dans le scénario de référence correspondant (premier jeu de colonnes de la Figure 6-6). L'hypothèse d'une augmentation plus forte des rendements apporte une marge de manœuvre importante puisque, toujours sous hypothèse de régimes « tendanciels », l'Europe pourrait aller jusqu'à devenir exportatrice nette de tourteaux de soja à hauteur de 1,7 Mtpe (deuxième jeu de colonnes de la Figure 6-6). Les différences de variation entre ces deux scénarios « extrêmes » s'expliquent par le double fait i) que les surplus potentiels de terres sont bien plus importantes dans le deuxième scénario que dans le premier (respectivement 12,7 et 2,1 Mha) et ii) que le rendement du soja est lui aussi plus élevé dans le deuxième scénario que dans le premier[136].

Sous l'hypothèse d'adoption de régimes « sains », dans lesquels les consommations de produits animaux et, par suite, les importations nettes de tourteaux sont moindres en Europe alors que les surplus potentiels de terres sont plus élevés, ces derniers permettraient de réduire encore plus la dépendance en tourteaux protéiques de l'Europe (troisième jeu de colonnes de la Figure 6-6 sous l'hypothèse de rendements « bas »), et même de l'annuler voire de devenir exportatrice de ce type de produits (quatrième jeu de colonnes de la Figure 6-6 sous l'hypothèse de rendements « hauts »).

L'Europe disposerait donc d'une marge de manœuvre non seulement pour annuler sa dépendance protéique en tourteaux, tout en ayant la possibilité de consacrer ses surplus de terres restant à d'autres usages que la culture de soja. Dans le scénario le plus favorable à cette perspective (« régimes sains X rendements hauts »), l'Europe n'utiliserait en effet que 45 % de son

[134] Sauf pour l'Allemagne, la Pologne et l'Europe centrale dans le scénario « régimes tendanciels x rendements bas » et ceci, quelle que soit l'hypothèse adoptée pour le rendement du soja en Europe, « bas » *versus* « haut ».

[135] L'Europe du Sud est donc exclue de l'analyse des régions européennes qui pourraient dégager un surplus de terres et de productions, mais il n'y a pas lieu de l'exclure des échanges intra-européens de tourteaux.

[136] *Cf.* Tableau E.5 de l'Annexe E pour plus de détails sur les niveaux de rendements de soja utilisés dans chaque scénario.

surplus de terres (environ 8 Mha sur un total de 17 Mha) et disposerait ainsi d'un peu plus de 9 Mha pour d'autres usages agricoles. Sous hypothèses de « régimes tendanciels X rendements hauts », elle pourrait consacrer environ 1,5 Mha à d'autres utilisations que la culture de soja[137].

Encadré 6-1. Quel serait le potentiel de production de protéines en Europe sur les surplus de terres si d'autres oléo-protéagineux (ou des protéagineux) que le soja étaient considérés ?

Les mêmes calculs ont été réalisés en considérant d'autres cultures oléo-protéagineuses que le soja, soit le colza et le tournesol mais aussi des protéagineux comme le pois. La production potentielle de tournesol a été calculée pour les mêmes régions que pour le soja (i.e., en excluant le Royaume-Uni et le Reste de l'Europe). Les productions potentielles de colza et de pois ont, quant à elles, été calculées en supposant que toutes les régions européennes disposant de surplus de terres étaient adaptées à ces deux cultures. Les potentiels de production en Europe seraient compris entre 3 et 48 Mt de tourteaux dans le cas du colza, entre 2 et 23 Mt de tourteaux dans le cas du tournesol, et entre 5 et 47 Mt pour le pois protéagineux, selon les scénarios considérés.

En équivalent protéines, ces productions potentielles permettraient de couvrir les importations totales de tourteaux uniquement dans le scénario combinant « régimes sains X rendements hauts » dans les cas du colza et du pois ; dans ce scénario, la dépendance protéique serait réduite à 6 % avec le tournesol. En plus de réduire la dépendance protéique à zéro, le développement de la culture du colza ou du pois laisserait 7 Mha (colza) et 2 Mha (pois) de terres libres pour d'autres usages agricoles que la culture d'oléagineux ou de protéagineux.

Le développement de ces cultures en Europe pourrait permettre d'économiser des surfaces de soja au Brésil-Argentine, entre 1 et 10 Mha pour le colza, entre 0,7 et 7 Mha pour le tournesol, et entre 1 et 7 Mha pour le pois protéagineux.

6.2.3. Traduction en équivalents surfaces préservées au Brésil-Argentine

Afin de rendre compte de l'impact que pourrait avoir cette production européenne additionnelle de tourteaux de soja sur les marchés mondiaux et en termes de contribution aux enjeux environnementaux globaux, nous la traduisons en « équivalents hectares » au Brésil-Argentine, c'est-à-dire en surfaces qu'il ne serait plus nécessaire de cultiver dans cette région du monde pour l'exportation vers l'Europe. Ces équivalents surfaces peuvent être interprétés comme les ordres de grandeur des surfaces en forêts et autres surfaces naturelles qui pourraient ainsi être préservées.

Le développement de la production européenne de soja pourrait permettre de préserver entre un peu plus d'1 Mha de surfaces au Brésil-Argentine dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas » et jusqu'à un peu plus de 10 Mha si les rendements évoluaient plus à la hausse[138]. Dans le cadre des régimes « sains », entre 5 Mha et 7 Mha pourraient ainsi être préservés selon l'hypothèse d'évolution des rendements retenue. Une moindre superficie serait donc économisée au Brésil-Argentine en cas de régimes « sains » par rapport aux régimes « tendanciels » dans un contexte de rendements « hauts », car l'Europe importerait 30 % de tourteaux en moins dans ce scénario par rapport à celui des régimes « tendanciels »[139].

La contribution de l'Europe aux enjeux environnementaux globaux *via* la préservation de surfaces sud-américaines apparaît donc significative. Les deux autres régions exportatrices et disposant aussi de surplus potentiels de terre significatifs que sont le Canada-USA et l'ex-URSS pourraient également y contribuer, encore plus largement. Dans ces deux régions, la production

[137] Rappelons que les deux scénarios de *régimes « sains »* conduiraient à des importations européennes de tourteaux de soja bien moindres que les deux scénarios de *régimes « tendanciels »* (pour une même hypothèse d'évolution des rendements), ceci grâce à la moindre consommation de produits animaux en Europe qui se répercute sur l'offre de produits animaux et *in fine* sur les volumes d'ingrédients, dont les tourteaux, utilisés en alimentation animale. L'autonomie protéique serait donc « facilitée » dans ces deux scénarios de *régimes « sains »*. De plus, les scénarios de *régimes « sains »* libèrent plus de surfaces, ce qui permet des productions potentielles de soja plus importantes.

[138] Pour situer l'importance de ce chiffre, rappelons que 47 Mha de soja étaient cultivés au Brésil-Argentine en « 2010 ». Soulignons que la production de soja au Brésil-Argentine, sous l'effet d'un accroissement de la demande en Europe mais aussi en Asie et surtout en Chine, a considérablement augmenté depuis « 2010 », si bien que les surfaces totales en soja ont augmenté de 25 % entre « 2010 » et 2017 (FAOSTAT).

[139] Précisons ici que lorsque la production potentielle de tourteaux de soja en Europe dépasse les importations de tourteaux de soja dans un scénario donné, nous avons plafonné les surfaces économisées au Brésil-Argentine pour correspondre aux importations totales de tourteaux de soja en Europe dans le scénario correspondant ; les surfaces économisées ne peuvent donc pas dépasser les importations de tourteaux de soja en Europe du scénario correspondant (ceci est le cas des deux scénarios « régimes tendanciels X rendements hauts » et « régimes sains X rendements hauts » soit l'équivalent de 26 Mt de tourteaux de soja importés dans le premier scénario et 18 Mt dans le deuxième.

domestique potentielle additionnelle de tourteaux de soja est en effet considérable : entre 41 et 123 Mt au **Canada-USA**, et entre 61 et 132 Mt tourteaux de soja dans l'*ex-URSS*. Même dans les situations les moins optimistes en termes de surplus de terres (« régimes sains X rendements bas » pour Canada-USA, et « régimes tendanciels X rendements bas » pour l'ex-URSS), chacune de ces deux régions pourrait remplacer l'intégralité des exportations de tourteaux de soja de la région Brésil-Argentine de l'année « 2010 » (38 Mt de tourteaux de soja). Dans le cas le plus optimiste (« régimes sains X rendements hauts »), elles pourraient remplacer chacune les exportations de tourteaux de soja des différents scénarios de référence (soit entre 43 et 65 Mt de tourteaux de soja exportées par Brésil-Argentine selon les scénarios).

Cette analyse est uniquement illustrative. En réalité, le développement d'une combinaison de différentes cultures oléagineuses et protéagineuses est plus probable. Cette combinaison serait en outre plus adaptée à un objectif de diversification des cultures en Europe, qui aurait cette fois des bénéfices environnementaux sur le sol européen et non plus hors Europe. En outre, l'analyse développée dans cette Section ignore, par construction et du fait du fonctionnement du modèle GlogAgri-AE2050, les mécanismes économiques qui feraient qu'il serait économiquement rentable d'augmenter la production d'oléagineux et de protéagineux en Europe, au Canada-USA et en ex-URSS, ceci dans un contexte où les coûts de production sont aujourd'hui très compétitifs au Brésil-Argentine (soja).

6.3. Synthèse partielle

Dans ce chapitre, nous analysons comment l'agriculture européenne pourrait se saisir de l'opportunité du surplus potentiel de terres mis en évidence dans les scénarios de référence pour contribuer à alléger les tensions résultant de fortes extensions des terres dans d'autres régions du monde, notamment en Afrique subsaharienne et en Amérique du Sud. Plus précisément, nous avons analysé la mise en œuvre de stratégies agricoles dédiées soit au **développement des productions destinées à l'export permettant ainsi à l'Afrique subsaharienne de moins étendre ses terres cultivées**, soit au **développement de la culture d'oléo-protéagineux permettant de limiter les importations de tourteaux en Europe et la déforestation induite par la culture du soja dans la région Brésil-Argentine**.

Même si nos calculs ne sont réalisés qu'à titre purement illustratif et indépendamment de tout mécanisme économique des marchés agricoles mondiaux, ils montrent que **l'Europe dans son ensemble aurait une marge de manœuvre pour contribuer *via* ces stratégies aux enjeux mondiaux à la fois de sécurité alimentaire et environnementale**. Toutefois, **ce potentiel est inégalement réparti entre les différentes régions européennes et situé essentiellement en Europe de l'Est, en Pologne et en Allemagne**, l'Europe du sud étant exclue de l'analyse du fait de sa situation d'importatrice nette. La contribution serait moins nette pour la France, le Royaume-Uni et le reste de l'Europe (pays nord-européens, Benelux, Irlande) qui disposent de peu, voire d'aucun, surplus de terres selon les scénarios considérés. **La marge de manœuvre de ces régions européennes en termes de contribution à la préservation des surfaces africaines et sud-américaines serait néanmoins bien inférieure à celle dont pourraient disposer l'ex-URSS et le Canada-USA** (en cas d'adoption mondiale de régimes alimentaires plus favorables à la santé), et ce quel que soit la stratégie adoptée par l'Europe.

Ces deux stratégies ne pourraient être développées indépendamment d'une gouvernance agricole, alimentaire et environnementale mondiale. Cette gouvernance devrait à la fois permettre la rémunération des bénéfices environnementaux obtenus dans les régions du monde où la conversion des surfaces naturelles en terres cultivées n'aurait plus lieu et sur le plus long terme permettre au continent africain de gérer de manière durable sa dépendance aux importations agricoles notamment en développant la productivité de sa propre agriculture.

L'Europe pourrait par ailleurs saisir l'opportunité des surplus de terres dont elle disposerait pour se centrer sur les défis environnementaux rencontrés sur son propre territoire, notamment en faisant évoluer ses systèmes de culture vers des systèmes moins intensifs en intrants de synthèse. Cette analyse est traitée dans le chapitre suivant.

Chapitre 7. Rendements européens à l'horizon 2050 : marges de manœuvre et incertitudes

À la différence du Chapitre 6 qui examine la place possible de l'Europe (ainsi que du Canada-USA et de l'ex-URSS) dans des stratégies d'usages des terres visant à alléger certaines tensions sur les surfaces cultivées hors Europe (au sens de permettant de réduire les augmentations des surfaces cultivées), ce chapitre est centré sur les défis environnementaux auxquels les différentes régions européennes sont et seront confrontées au sein même de leur territoire.

En premier lieu, la pression croissante exercée sur les écosystèmes par les systèmes de culture européens aujourd'hui majoritaires, ainsi que l'évolution des exigences sociétales vis-à-vis de l'agriculture (préoccupations sociales, économiques, sanitaires, etc.), imposent l'évolution de ces derniers vers des systèmes moins gourmands en intrants de synthèse et en eau, et associés à la fourniture de plus hauts niveaux de services écosystémiques. Si le développement de l'agriculture biologique, de l'agroforesterie, plus généralement de l'agroécologie, peut contribuer à une telle évolution, de tels systèmes ne permettent pas nécessairement d'atteindre des rendements aussi élevés que les rendements moyens actuels ou ceux des scénarios de référence en 2050 : Wilbois et Schmidt (2019) estiment, à partir de 7 méta-analyses, qu'aujourd'hui l'écart de rendement entre productions végétales conduites en agriculture biologique versus agriculture conventionnelle est de -9 % à -25 %. Les agricultures européennes doivent viser à atteindre des niveaux de productivité de la terre suffisants à la fois pour répondre à la demande domestique en produits agricoles et maintenir leur position dans les échanges mondiaux, dans un contexte de forte augmentation de la demande mondiale. Or, et c'est un résultat majeur de cette étude qui confirme ceux de très nombreuses études antérieures ciblées sur la question des disponibilités alimentaires mondiales futures (*cf.* Chapitre 5, une telle augmentation de la demande alimentaire mondiale imposera d'augmenter les échanges agricoles vers l'Afrique du Nord, le Proche et Moyen-Orient et l'Afrique subsaharienne pour assurer la sécurité alimentaire de ces régions.

Le niveau de production agricole résulte de la combinaison des facteurs « rendement », « surface cultivée » et « intensité culturale » (*cf.* Chapitre 3). Une diminution du rendement impose une augmentation de la surface cultivée et/ou de l'intensité culturale pour maintenir un même niveau de production. Dans cette perspective, **la mise en culture des surplus potentiels de terres européens qui émergent des scénarios de référence (*cf.* Chapitre 5) pourrait permettre de substituer le levier « rendement » par le levier « surface » tout en maintenant les niveaux des productions et des échanges estimés en 2050 dans les scénarios de référence (de même que les intensités culturales)**. La diminution potentielle de rendement qui en résulte, analysée dans la Section 7.1, matérialise la **marge de manœuvre pour évoluer vers des systèmes de production européens moins intensifs en intrants**. Par souci de cohérence, nous estimons cette marge de manœuvre uniquement par rapport aux niveaux de rendements les plus bas déjà intégrés dans les scénarios de référence et qui, par construction, recouvrent différentes évolutions possibles des systèmes de culture européens dont une extensification.

En second lieu, **plusieurs régions européennes seront sujettes, à l'horizon 2050, à une moindre disponibilité en eau (précipitations et eau bleue pour l'irrigation)**. Si les projections utilisées dans les scénarios de référence intègrent les effets des variations de pluviométrie propres à chaque région sur les rendements, des incertitudes persistent quant à l'amplitude de ces effets. La Section 7.2 présente, sous la forme d'une analyse de sensibilité des scénarios de référence, les **conséquences d'une accentuation des effets sur les rendements de la moindre disponibilité en eau qui affectera en particulier la France, l'Europe du Sud, l'Europe de l'Est et l'Europe centrale**, ceci en considérant la baisse de la pluviométrie pendant les périodes de croissance des cultures en plus des évolutions annuelles de cette pluviométrie.

7.1. Relâchement de la pression sur les rendements des cultures en Europe

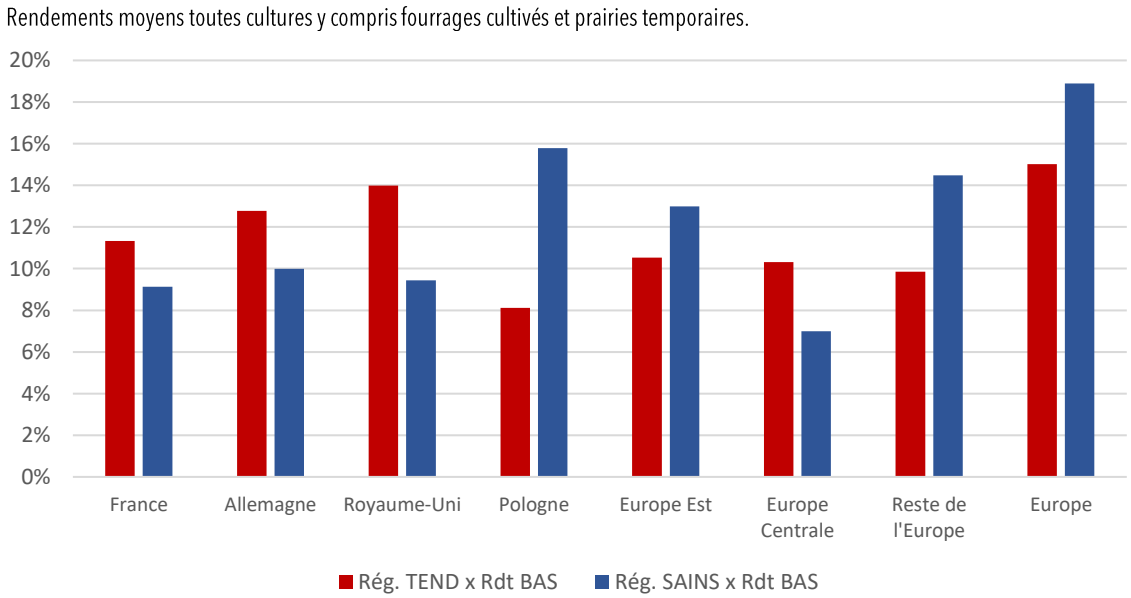
Rappelons que, dans les scénarios de référence prenant comme hypothèse des rendements « bas », quatre des huit régions européennes verraient leur besoin en surfaces cultivées diminuer à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 » sous hypothèse de poursuite tendancielle des régimes alimentaires, et sept sur huit régions européennes seraient concernées sous hypothèses d'adoption généralisée de régimes « sains ». Comme dans le chapitre précédent, l'Europe du Sud (région pour laquelle le modèle estime le surplus potentiel de terres le plus important) est exclue de la présente analyse, faisant l'hypothèse que

cette région mobiliserait cette marge de manœuvre avant tout pour produire davantage afin de limiter sa dépendance aux importations. Ci-après, le « surplus potentiel de terres européen » désigne donc systématiquement la totalité des surplus potentiels de terres des régions européennes, à l'exclusion de l'Europe du Sud.

On fait ici l'hypothèse que les régions européennes disposant d'un surplus potentiel de terres en 2050 optent pour la mise en culture de ces surplus mais sans excéder les niveaux de production atteints à cet horizon dans les scénarios de référence. Cette stratégie d'utilisation des surplus de terres permettrait donc de relâcher la pression sur les rendements européens, d'autant plus si celle-ci est le fruit d'un usage plus intensif d'intrants chimiques et non d'un progrès de la sélection variétale. En d'autres termes, cette stratégie permet d'explorer la marge de manœuvre dont disposent certaines régions européennes pour évoluer vers des systèmes de production moins intensifs tout en maintenant leur place dans les échanges mondiaux agricoles telle qu'elle ressort des scénarios de référence présentés dans le Chapitre 5. Cette diminution potentielle des rendements européens peut également rendre compte de la baisse progressive de la pression sur les rendements qui résulterait de la gestion, par les agriculteurs, de la variabilité interannuelle des rendements qui aura tendance à s'accentuer du fait du changement climatique (qui ne peut que difficilement être prise en compte de façon explicite dans le modèle GlobAgri-AE2050).

Afin de pouvoir apprécier les diminutions potentielles des rendements calculées dans cette Section, la Figure 7-1 rappelle, dans un premier temps, les augmentations des rendements moyens associées à chacun des deux scénarios de référence concernés relativement à « 2010 ». La différence d'augmentation entre les deux scénarios simulés avec des Rendements « bas » s'explique par la différence dans la composition des surfaces récoltées dans ces deux scénarios, cette dernière étant déterminée par l'importance relative de chaque produit agricole dans la demande totale. Ainsi, si les régimes sont « sains », certaines régions européennes produisent plus de cultures à rendements « élevés » (ainsi, par exemple, la Pologne produit proportionnellement davantage de fruits et légumes, ce qui accroît considérablement le rendement moyen de cette zone dans l'hypothèse de régimes « sains ») alors que d'autres régions produisent plus de cultures à rendements plus « faibles » (légumineuses notamment).

Figure 7-1. Augmentations des rendements moyens par rapport à « 2010 » dans les deux scénarios de référence avec rendements « bas » (en %)



Pour estimer la diminution potentielle des rendements par rapport aux rendements « bas » selon les deux scénarios de référence considérés, nous calculons, pour les régions qui disposent d'un surplus de terres, un rendement moyen potentiel toutes cultures confondues égal au ratio de la production en 2050 sur les surfaces récoltées de « 2010 ». Ce rendement moyen potentiel est ensuite comparé au rendement moyen « bas » de 2050 utilisé dans le scénario de référence correspondant (Figure 7-2). Nous comparons également ce rendement moyen potentiel au rendement moyen de chaque région en « 2010 » (Figure 7-3)[140].

[140] Les Tableaux F.1 à F.3 de l'Annexe F fournissent les valeurs associées à ces figures. Pour information, les Tableaux F.4 et F.5 de cette même Annexe fournissent les résultats des calculs équivalents effectués pour l'ex-URSS et le Canada-USA.

Figure 7-2. Diminutions potentielles des rendements moyens par rapport au rendement moyen 2050 des deux scénarios de référence avec rendements « bas » (en %)

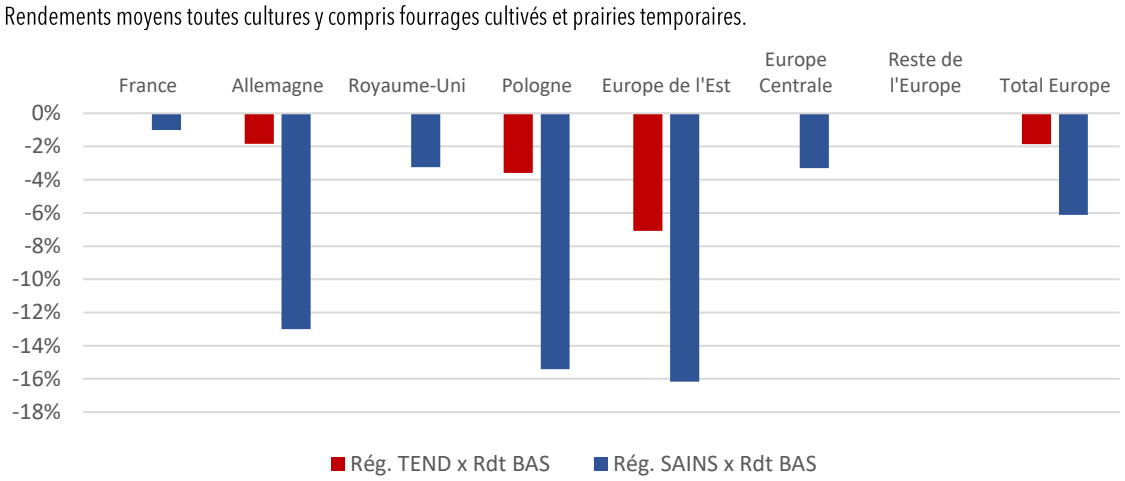
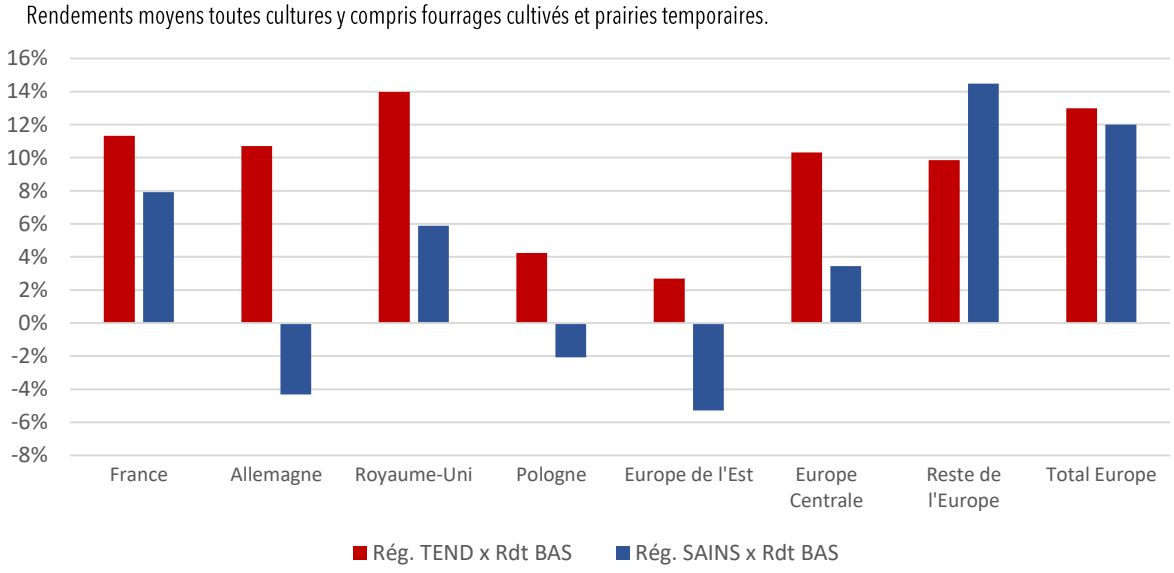


Figure 7-3. Variations potentielles des rendements moyens des deux scénarios de référence avec rendements « bas » par rapport au rendement moyen « 2010 » (en %)



Dans l'hypothèse où les régimes évolueraient de façon tendancielle, la diminution possible du rendement moyen en Europe serait de 2 % seulement par comparaison avec le rendement « bas » de 2050 du scénario de référence correspondant (Figure 7-2). Les situations sont très contrastées selon les différentes régions européennes. Les diminutions les plus fortes se situeraient, naturellement, dans les régions où les surplus de terres sont les plus importants, soit en **Europe de l'Est** (baisse possible des rendements de 7 %), en **Pologne** (-4 %) et en **Allemagne** (-2 %). Pour l'**Europe centrale**, tout comme pour la **France**, le **Royaume-Uni** et le **reste de l'Europe** qui ne disposent pas de surplus de terres sous hypothèse de régimes « tendanciels », aucune diminution potentielle du rendement moyen ne serait possible par rapport au rendement « bas » déjà intégré dans les scénarios de référence[141]. Dans l'hypothèse où les régimes alimentaires évolueraient de façon plus favorable à la santé, la diminution potentielle du rendement moyen européen serait plus importante, -6 % pour **l'Europe** dans son

[141] Ces marges de manœuvre émanant des surplus de terres dégagés par certaines régions européennes pourraient être exploitées, non par chacune des seules régions concernées, mais plus collectivement au niveau européen. La répartition entre toutes les régions européennes du relâchement de la pression sur les rendements à hauteur de la moyenne européenne établie ici, nécessiterait d'être compensée par une accentuation des échanges intracommunautaires permettant que les baisses de production induites dans les régions ne dégageant pas de surplus de terres soient compensées par les hausses de production de celles qui mobiliseraient leurs surplus de terres à des taux de relâchement moins marqués que ce à quoi elles pourraient prétendre.

ensemble, toujours par comparaison avec le rendement « bas » de 2050 du scénario de référence correspondant. Les contrastes entre régions demeurent, avec des baisses pouvant aller jusqu'à -16 % en **Europe de l'Est**, -15 % en **Pologne** et -13 % en **Allemagne**. Les diminutions potentielles sont bien plus faibles dans les autres régions européennes, soit -3 % en **Europe Centrale** et au **Royaume-Uni**, -1 % en **France** et 0 dans le **Reste de l'Europe**.

L'analyse des variations potentielles des rendements moyens relativement au rendement moyen « 2010 » montre que dans l'hypothèse de régimes « tendanciels », les augmentations du rendement moyen seraient limitées à +13 % par rapport à « 2010 », à comparer à une augmentation du rendement moyen de +15 % entre « 2010 » et 2050 selon le scénario de référence. Les augmentations potentielles des rendements moyens par rapport à « 2010 » seraient encore plus faibles si les régimes alimentaires évoluaient vers des régimes « sains », de +12 % à comparer à une augmentation du rendement moyen de +19 % entre « 2010 » et 2050 dans le scénario de référence. Sous cette hypothèse d'évolution des régimes, le rendement moyen 2050 pourrait même être inférieur de plusieurs points de pourcentage à son niveau de « 2010 » en **Europe de l'Est**, en **Allemagne** et en **Pologne**.

In fine, en utilisant son surplus potentiel de terres à l'horizon 2050, l'Europe pourrait donc disposer de quelques marges de manœuvre pour évoluer vers des systèmes de production moins intensifs en intrants et/ou plus résilients aux évènements extrêmes sans sacrifier sa place sur les marchés mondiaux. Notons que cette marge de manœuvre existe même dans la combinaison d'hypothèses « régimes tendanciels X rendements bas ». Néanmoins, ces marges de manœuvre seraient très variables selon les régions européennes, importantes en **Europe de l'Est**, en **Pologne** et en **Allemagne**, nettement plus faibles et même parfois nulles dans les autres régions européennes telles que distinguées dans cette étude.

7.2. Sensibilité des rendements européens à un impact accentué du stress hydrique pendant la période de croissance des cultures

Un des paramètres clefs du changement climatique a trait aux précipitations et à leurs variations futures qui affecteront les disponibilités en eau tant pour la croissance des cultures que pour l'accès à l'irrigation (*cf.* Section 2.1). Les variations des précipitations seront différentes selon les régions du monde, avec augmentation dans certaines d'entre-elles, des évènements de fortes précipitations mais aussi, et également de façon différenciée selon les régions, augmentation des périodes de manque d'eau, au minimum à certaines périodes de l'année et notamment à des périodes clefs du cycle de croissance des végétaux (Rojas *et al.*, 2019). En Europe, continent de latitude moyenne, les précipitations auraient plutôt tendance à diminuer en 2050 relativement à aujourd'hui, cette moyenne masquant des disparités entre régions européennes selon un gradient simplifié Sud - Nord : la baisse des précipitations serait plus importante dans le Sud de l'Europe que dans le Nord. Dans ce contexte général, l'analyse de sensibilité développée ci-dessous vise à apprécier la sensibilité des résultats de simulation des scénarios de référence (*cf.* Chapitre 5) à l'amplitude de l'impact négatif sur les rendements d'une moindre disponibilité en eau dans certaines régions européennes.

Rappelons que les projections des rendements à 2050 des scénarios de référence intègrent déjà, au titre d'une des trois composantes du changement climatique, l'impact des variations des précipitations annuelles sur la base des résultats de l'analyse quantitative réalisée dans le cadre de cette étude (*cf.* Chapitre 3 et Makowski *et al., in press*). Cet impact est logiquement négatif (respectivement positif) si les précipitations diminuent (respectivement augmentent). Ces projections des rendements n'intègrent néanmoins pas les effets liés aux variations de la pluviométrie sur certains mois de l'année. Or, au-delà des moyennes annuelles, et à titre exploratoire, la présente analyse propose une prise en compte de la satisfaction du besoin en eau des cultures pendant leur période de plus forte croissance, soit de mars à juin pour les cultures d'hiver et de mai à août pour les cultures d'été.

7.2.1. Modélisation de la contrainte intra-annuelle en eau et de ses impacts

Une moindre disponibilité en eau à certaines périodes de l'année peut affecter les rendements des cultures *via* deux canaux principaux, les possibilités d'irriguer et les rendements des cultures pluviales. Le modèle GlobAgri-AE2050 dispose d'un module « irrigation » permettant de décomposer les surfaces récoltées et les rendements selon que ces deux variables correspondent à des cultures irriguées ou pluviales. Cette décomposition requiert, de par la construction du modèle, de formuler des hypothèses sur l'évolution des parts des surfaces irriguées dans les surfaces totales, ainsi que sur des ratios des

rendements irrigués sur les rendements pluviaux pour chaque culture à l'horizon 2050 dans les diverses régions du monde[142]. Pour rendre compte d'un impact plus fort de la diminution de la disponibilité en eau à l'horizon 2050, nous devons donc formuler des hypothèses alternatives sur la part de la surface irriguée dans la surface récoltée totale en 2050 et sur le rendement pluvial en 2050, ceci pour les différentes régions européennes où nous supposons que cette contrainte aurait un effet plus fort parce que jouant aussi, au-delà des moyennes annuelles, sur les périodes de plus forte croissance des cultures. Ces hypothèses permettent d'estimer des projections « alternatives » de rendements européens en 2050 qui, après introduction dans le modèle GlobAgri-AE2050, permettent d'évaluer de nouveaux besoins en terres cultivées en 2050 et de les comparer aux besoins estimés dans les scénarios de référence correspondants.

Toutes les autres hypothèses des scénarios de référence sont inchangées. En particulier, aucune hypothèse alternative n'est formulée sur les niveaux de rendements irrigués en 2050 du fait des grandes difficultés à quantifier les effets d'une irrigation limitée (ou déficitaire) – en termes de quantité d'eau apportée aux cultures – sur les rendements. Concernant les cultures irriguées, il a été choisi ici d'ajuster à la baisse le nombre d'hectares irrigués (*via* une baisse de la part des surfaces irriguées dans les surfaces totales récoltées) et de maintenir une irrigation non limitante pour le rendement sur les surfaces où l'irrigation est toujours mise en œuvre. Par ailleurs, la suppression de l'irrigation sur certaines surfaces devrait théoriquement conduire à des modifications des choix des cultures sur au moins une partie des terres qui ne seraient plus irriguées. Cette démarche exploratoire visant à apporter de premiers éléments de réflexion sur la quantification des incertitudes associées aux effets négatifs de la diminution future de la disponibilité en eau, une hypothèse simplificatrice a été adoptée ici consistant à ne pas tenir compte de modifications possibles des assolements, faute de pouvoir quantifier ces dernières avec robustesse.

En résumé, nous avons donc combiné trois hypothèses pour rendre compte des effets que pourraient avoir sur les rendements végétaux européens un effet accru de la limitation des ressources en eau.

1. En premier lieu, ont été sélectionnées les régions européennes dans lesquelles la contrainte intra-annuelle en eau pourrait avoir un effet accentué sur les rendements par rapport aux jeux de projections utilisés dans les scénarios de référence. L'analyse des projections des variations de la pluviométrie sur les périodes de croissance des cultures d'hiver (mars à juin) et des cultures d'été (mai à août) conduit à retenir quatre régions, soit la **France**, l'**Europe du Sud**, l'**Europe de l'Est** et l'**Europe centrale**. Au sein de la zone Europe, c'est dans ces quatre régions que les baisses de la pluviométrie pendant les mois de croissance des cultures seraient les plus importantes (Tableau 7-1).

Tableau 7-1. Variation de la pluviométrie selon les périodes de croissance des cultures d'hiver et d'été dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (ratio de l'année 2050 à la moyenne des années 1996-2015, en %)

	Hiver (mars-juin)	Eté (mai-août)
France	-5,1	-13,8
Europe du Sud	-9,3	-5,5
Europe de l'Est	-2,8	-8,0
Europe centrale	0,8	-6,7

Source : Climate Change Knowledge Portal, Banque Mondiale (https://climateknowledgeportal.worldbank.org/)

2. En second lieu, les rendements pluviaux en 2050 sont ajustés à la baisse dans les quatre régions concernées. Connaissant le rendement accessible par millimètre d'eau transpirée (Doorenbos et Kassam, 1979 ; Steduto *et al.*, 2012), il est possible d'estimer un abattement du rendement pluvial en supposant qu'une baisse de la pluviométrie pendant la période de forts besoins des cultures, d'hiver ou d'été[143], correspond à une baisse équivalente de la consommation de la plante (transpiration). Ce calcul est réalisé pour chaque culture disposant d'un rendement pluvial en 2050[144].

[142] Les données initiales (« 2010 ») relatives aux surfaces cultivées pluviales et irriguées et aux rendements moyens des cultures qu'elles soient irriguées ou pluviales proviennent d'Agreste et d'Eurostat pour la France et les autres zones européennes, et de la base GAEZ pour les autres régions du monde. Les rapports des rendements irrigués aux rendements secs dans les différentes régions du monde sont également issus de la base GAEZ. Les hypothèses relatives à l'évolution du ratio des rendements irrigués sur les rendements secs à l'horizon 2050 sont tirées de la FAO (2018).

[143] La variation de la pluviométrie pour les périodes de croissance des cultures d'hiver et d'été est calculée à partir des données du *Climate Change Knowledge Portal* de la Banque Mondiale : https://climateknowledgeportal.worldbank.org/

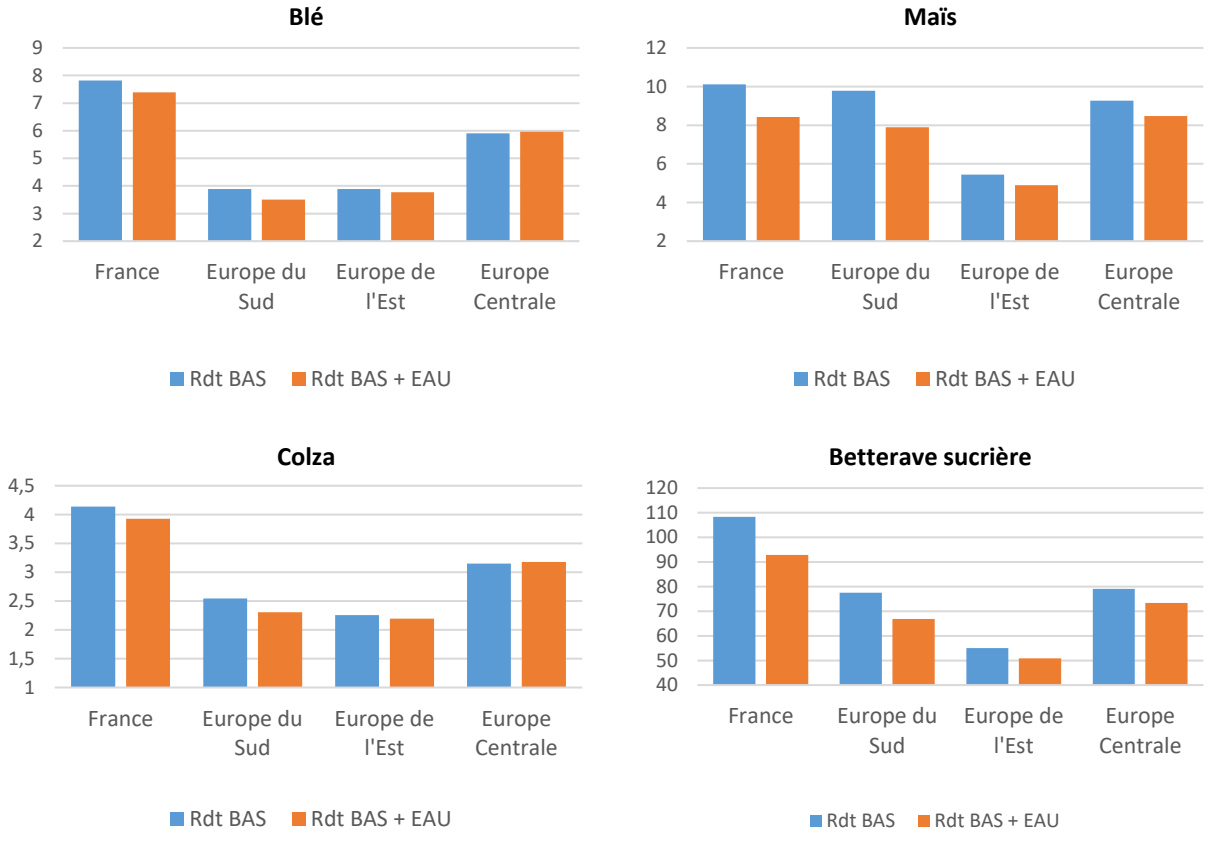
[144] Soit toutes les cultures pour lesquelles nous disposons d'un rendement pluvial pour « 2010 ». Il s'agit de pratiquement toutes les cultures, à de rares exceptions près (par exemple, le riz en Europe de l'Est et les fibres en Europe du sud, qui sont donc 100 % irrigués).

3. Enfin, les parts des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales en 2050 ont été révisées dans les quatre régions concernées par rapport aux scénarios de référence. Dans ces derniers, on suppose que ces parts restent inchangées entre « 2010 » et 2050 dans les huit régions européennes[145]. Dans l'analyse de sensibilité de ce chapitre, nous faisons l'hypothèse alternative que ces parts diminuent de moitié entre « 2010 » et 2050 dans les quatre régions contraintes.

Un renforcement de la contrainte en eau porterait préjudice à l'expression « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2, notamment pour les plantes en C3 (*cf.* Section 2.2). Ce résultat conduit à ne simuler les conséquences de l'analyse de sensibilité que pour les scénarios qui ne valorisent pas l'effet de fertilisation du CO_2, soit les deux scénarios de référence des rendements « bas » qui diffèrent selon que les régimes alimentaires évoluent de façon tendancielle ou favorable à la santé.

La Figure 7-4 compare les rendements moyens en 2050 de quatre cultures majeures (blé, maïs, colza et betterave sucrière) dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité, (i) utilisés dans les scénarios de référence (barre bleue dans chaque graphique) et (ii) sous hypothèse d'un effet accentué du stress hydrique subi par les cultures pendant la période de croissance (barre orange). Ces rendements moyens en 2050 sont calculés comme les moyennes des rendements irrigués et pluviaux pondérées par les poids respectifs des cultures irriguées et pluviales dans la surface totale de la culture considérée. Les rendements moyens de l'analyse de sensibilité intègrent donc à la fois la diminution de la part des surfaces irriguées et la baisse des rendements des cultures pluviales, estimées selon la méthodologie décrite ci-dessus.

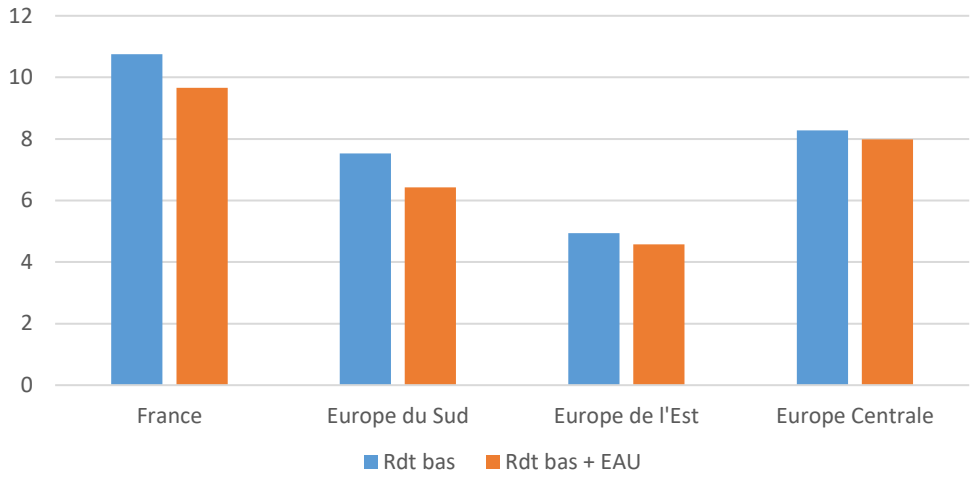
Figure 7-4. Rendements moyens du blé, du maïs, du colza et de la betterave sucrière en 2050 sans et avec effet accentué du stress hydrique en période de croissance dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (tonne/ha)



[145] Les parts actuelles (« 2010 ») des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales varient fortement selon les régions européennes. Dans les quatre régions concernées par l'analyse de sensibilité, ces parts sont égales à 7 % en France, à 18 % dans l'Europe du Sud, à 6 % dans l'Europe de l'Est et à 2 % en Europe centrale. Au total, en Europe, 8 % des surfaces cultivées sont irriguées en « 2010 » (Tableau F.6 en Annexe F). Notons que la FAO (2018) suppose que la part des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales augmentera de +22 % à l'horizon 2050 dans les pays à haut revenu, dont fait partie l'Europe. Nous n'avons pas retenu cette hypothèse qui nous semble très optimiste au regard des tensions croissantes sur la ressource en eau.

La Figure 7-5 fournit la même information cette fois pour l'ensemble des cultures (y compris fourrages cultivés) considéré comme un seul agrégat : l'ajustement à la baisse (rendement « corrigé » en 2050 relativement au rendement « bas » de référence en 2050) serait particulièrement prononcé en **Europe du Sud** (-15 %) ; puis viendraient la **France** (-10 %), l'**Europe de l'Est** (-7 %) et l'**Europe centrale** (-4 %).

Figure 7-5. Rendements moyens pour l'ensemble des cultures en 2050 sans et avec effet accentué du stress hydrique en période de croissance dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (tonne/ha)



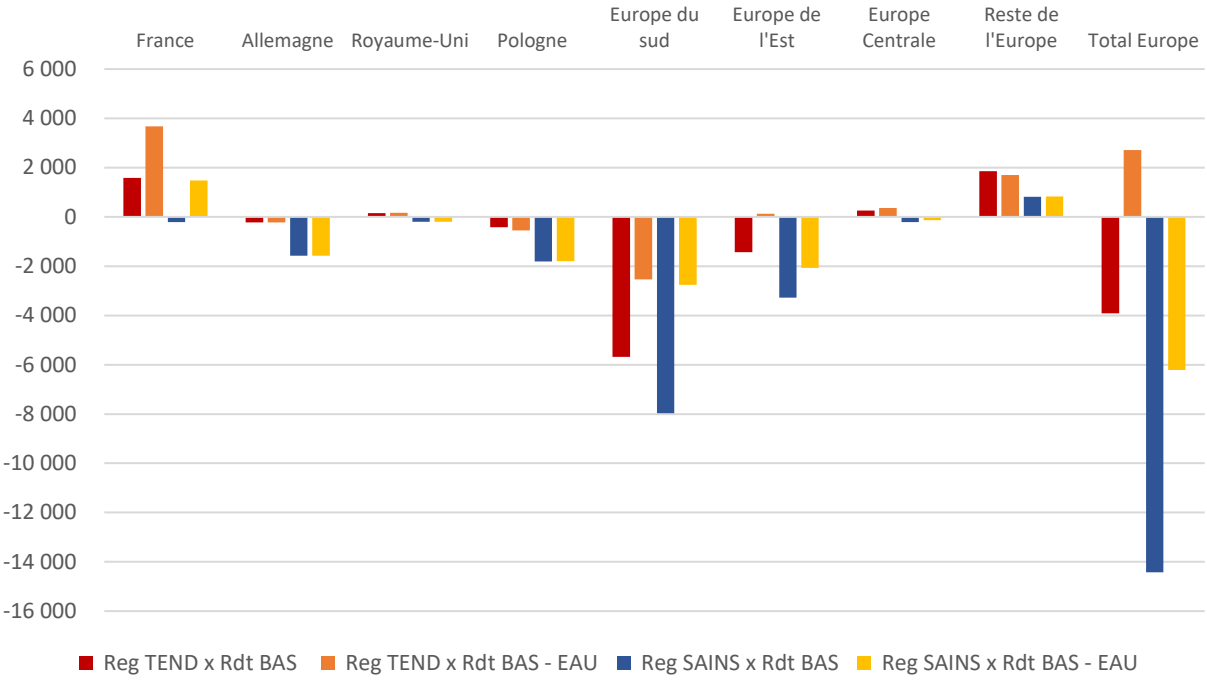
7.2.2. Effets sur les agricultures européennes d'une accentuation des impacts liés à la limitation de la ressource en eau

Sous hypothèse d'évolution tendancielle des régimes alimentaires, la nouvelle simulation induit un accroissement des surfaces cultivées **européennes**[146] de +2,7 millions d'hectares (Mha) en 2050 relativement à « 2010 » dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas », alors que ces surfaces diminuaient de -3,9 Mha dans le scénario de référence équivalent (soit un besoin additionnel en terres cultivées de +6,6 Mha). L'accroissement des terres cultivées aurait pu être plus grand encore si l'**Europe du Sud** ne venait pas « buter » sur sa contrainte de terres cultivables, ce qui limite l'expansion de ses terres cultivées à « seulement » +3,1 Mha par rapport à la superficie qu'elles atteignaient dans le scénario de référence équivalent (cette région serait même obligée de réduire légèrement ses exportations agricoles pour satisfaire sa demande intérieure). En **France**, l'expansion des surfaces cultivées serait plus que doublée, passant de +1,6 Mha à +3,7 Mha. L'effet serait de même ampleur en **Europe de l'Est** (de -1,4 Mha à +0,1 Mha). Il serait nettement plus faible en **Europe centrale** (de 0,3 à 0,4 Mha)[147]. Il serait marginal dans les autres régions européennes non directement concernées par une accentuation de l'effet négatif des contraintes hydriques (Figure 7-6 et Tableau F.7 de l'Annexe F).

[146] Le passage des surfaces cultivées aux surfaces récoltées se fait en utilisant les coefficients des intensités culturales (*cf.* Section 3.4). Ces coefficients sont ici supposés constants dans les quatre scénarios de référence. Compte tenu des hypothèses adoptées pour construire l'analyse de sensibilité, on a considéré qu'il n'y avait pas lieu de modifier les évolutions à 2050 de ces coefficients pour les cultures irriguées (pas de modification de l'efficience de l'irrigation même si elle est mise en œuvre sur de moindres surfaces). L'absence d'informations fiables et argumentées nous conduit à adopter la même hypothèse de constance de ces coefficients pour les cultures pluviales.

[147] En Europe centrale, les rendements moyens sont moins impactés par l'ajustement à la baisse du rendement pluvial pour deux raisons : i) parce que la variation des précipitations d'hiver est légèrement positive dans cette région alors qu'elle est négative dans les trois autres régions (*cf.* Tableau 7-1) et ii) parce que la part des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales est faible (2 % en « 2010 »), nettement moins élevée que dans les trois autres régions.

Figure 7-6. Variations des surfaces cultivées en 2050 relativement à « 2010 » (1 000 ha) sans et avec effet accentué du stress hydrique en période de croissance, pour les deux scénarios considérés dans l'analyse (« régimes tendanciels X rendements bas » ; « régimes sains X rendements bas »)



L'ajustement des rendements à la baisse étant quasi-entièrement transmis aux surfaces cultivées (qui s'étendent), les autres variables des bilans agricoles européens emplois-ressources seraient très peu affectées. Les exportations agricoles de l'**ensemble de la zone européenne** diminueraient très légèrement (-1 %) du fait de l'Europe du Sud qui « buterait » sur sa contrainte de surfaces cultivables. Dans cette région, les exportations agricoles totales diminueraient de -14 %. Cette baisse est fortement diluée quand on considère la somme des exportations agricoles des huit régions européennes, reflétant le poids modeste de l'Europe du Sud dans ces exportations agricoles totales. Dans le **reste du monde**, les surfaces cultivées augmenteraient de +4 Mha supplémentaires par rapport à l'extension des surfaces cultivées mondiales estimée en 2050 dans le scénario « régimes tendanciels X rendements bas ». Ce résultat est la conséquence directe de la substitution des exportations agricoles européennes ajustées à la baisse par des exportations de pays tiers non européens.

Le sens des effets est le même lorsque l'on réalise cette analyse pour le scénario combinant « régimes sains X rendements bas ». La différence majeure réside dans la réaction de l'**Europe du Sud** : dans les scénarios de référence, l'adoption de régimes « sains » (et la diminution de la demande domestique en produits agricoles qui en résulte) induisait une moindre extension des surfaces cultivées en 2050 que la poursuite tendancielle des consommations alimentaires. Cette plus grande différence entre surface cultivée et surface cultivable en 2050 sous hypothèse de régimes « sains », laisse davantage de marge de manœuvre à cette région pour étendre ses surfaces cultivées en compensation de l'abattement des rendements (dû à un effet accentué du stress hydrique en période de croissance). De ce fait, l'extension des surfaces cultivées en Europe du Sud en 2050 (de +5,2 Mha par rapport à la superficie qu'elles atteindraient dans le scénario de référence équivalent) serait plus importante que sous hypothèse de régimes « tendanciels » (*cf. supra*) sans toutefois que l'Europe du Sud vienne « buter » sur sa contrainte de terres.

Dans les trois autres régions européennes concernées par une accentuation de l'effet du stress hydrique en période de croissance, les effets sont du même ordre de grandeur quelle que soit l'hypothèse d'évolution des régimes. Au total, la réduction des surfaces cultivées dans l'**ensemble de l'Europe** serait limitée à -6,2 Mha en 2050 relativement à « 2010 » *versus* -14,4 Mha dans le scénario de référence correspondant, soit un besoin additionnel en terres cultivées de 8,2 Mha.

Le Tableau 7-2 présente les surfaces irriguées des huit régions européennes dans la situation initiale de « 2010 » et en 2050 pour chacun des deux scénarios considérés dans la présente analyse.

Tableau 7-2. Surfaces irriguées (en 1000 ha) dans les huit régions européennes en « 2010 » et en 2050 sans et avec effet accentué du stress hydrique en période de croissance, pour les deux scénarios considérés dans l'analyse (« régimes tendanciels X rendements bas » ; « régimes sains X rendements bas »)

	Surfaces irriguées "2010"	Surfaces irriguées 2050			
		Rég. TEND x Rdt. BAS	Rég. TEND x Rdt. BAS + effet accentué de la contrainte EAU	Rég. SAINS x Rdt. BAS	Rég. SAINS x Rdt BAS + effet accentué de la contrainte EAU
France	1 382	1 494	871	1 308	754
Europe du Sud	6 609	5 548	3 435	5 427	3 576
Europe de l'Est	1 135	939	532	977	548
Europe centrale	134	132	70	149	80
Allemagne	*529*	*476*	*482*	*424*	*424*
Royaume-Uni	*63*	*53*	*53*	*48*	*48*
Pologne	*93*	*126*	*122*	*89*	*89*
Reste de l'Europe	*657*	*659*	*661*	*724*	*724*
Total Europe	10 603	9 425	6 224	9 146	6 243

En gras : les quatre régions concernées dans la présente analyse par une accentuation de l'effet négatif sur les rendements du stress hydrique pendant la période de croissance (abattement des rendements et diminution de la part des surfaces irriguées par rapport aux scénarios de référence équivalents).

En italique : les régions non concernées (rendements et part des surfaces irriguées inchangés par rapport aux scénarios de référence équivalents).

Les surfaces irriguées en 2050 passeraient de 9,4 à 6,2 Mha (-34 %) si les régimes évoluaient de façon tendancielle, et de 9,1 à 6,2 Mha (-32 %) si les régimes évoluaient de façon plus favorable à la santé. La diminution de ces surfaces serait naturellement essentiellement localisée dans les quatre régions européennes directement concernées par l'analyse de sensibilité, soit, par ordre décroissant en hectares, l'**Europe du Sud** (-2,1 Mha sous hypothèse de régimes « tendanciels »), la **France** (-0,6 Mha), l'**Europe de l'Est** (-0,4 Mha) et l'**Europe centrale** (-0,1 Mha). L'ordre des baisses et leur ampleur sont identiques dans l'hypothèse de régimes « sains ». Les variations des surfaces irriguées dans les quatre autres régions européennes sont marginales, avec des régimes « tendanciels », nulles avec des régimes « sains » à l'horizon 2050[148].

7.3. Synthèse partielle

Si l'Europe décidait d'utiliser son surplus de terres dégagé dans les scénarios de référence pour évoluer vers des systèmes de production moins intensifs en intrants de synthèse et en eau, sa mise en culture permettrait de diminuer les rendements « bas » de -2 % en 2050, sous hypothèse de régimes « tendanciels », et de -6 % sous hypothèse de régimes « sains ». La hausse des rendements moyens par rapport à ce qu'ils sont aujourd'hui (« 2010 ») serait alors limitée à environ +12 % ou +13%, sachant que les évolutions des rendements européens envisagées dans cette étude sont à l'horizon 2050 déjà très limitées dans l'hypothèse basse de nos évolutions de rendements. Ces données moyennes masquent de **fortes disparités selon les régions européennes**, les baisses des rendements ainsi permises étant d'autant plus élevées que la région dispose de surplus de terres importants : elles seraient donc plus marquées en Europe de l'Est et en Pologne (respectivement, -7 % et -4 % si les régimes sont « tendanciels » et -16% et -15% si les régimes sont « sains »). **Ce relâchement de la pression sur les rendements européens permis par l'exploitation des surplus de terres de certaines régions pourrait également être réparti entre les régions européennes, mais au prix d'une accentuation de certains échanges intra-européens.**

[148] Les surfaces des autres régions européennes s'ajustent de manière très marginale sous l'effet des ajustements qui s'opèrent sur le marché mondial dans le scénario « Régimes tendanciels x rendements bas » ; la diminution des exportations de l'Europe du Sud sous l'effet de la contrainte de surface induit un ajustement des exportations et par conséquent des productions des autres régions du monde, ces variations de production induisent à leur tour un ajustement des importations, puis de nouveau des exportations, jusqu'à trouver un équilibre.

Si l'Europe semble disposer d'une marge de manœuvre concernant la hausse de ses rendements végétaux à l'horizon 2050, c'est sans compter l'incertitude qui entoure l'amplitude des effets de la diminution de la disponibilité en eau qui affectera en particulier la France, l'Europe du Sud, l'Europe de l'Est et l'Europe centrale, à l'horizon 2050. **En considérant une possible accentuation du stress hydrique pendant la période de plus forte croissance des cultures, ces effets dépressifs sur le rendement pourraient être plus importants que ceux pris en compte dans les projections initiales** (qui n'intègrent pas les effets liés aux variations intra-annuelles de la pluviométrie). Ainsi, des rendements « bas » ajustés à la baisse pour tenir compte à la fois de la baisse des rendements des cultures pluviales et de la diminution de la part des surfaces irriguées, imposeraient une extension des surfaces cultivées dans les quatre régions concernées, notamment en Europe du Sud qui atteindrait sa contrainte de surface sous hypothèse de régimes « tendanciels ». **À l'échelle européenne, ces extensions se traduiraient par une annulation du surplus de terres européen sous hypothèse de régimes « tendanciels », et à sa forte réduction sous hypothèse de régimes « sains » (limité à 6 Mha contre 14 Mha dans le scénario de référence correspondant).**

Chapitre 8. Conclusion générale : apports méthodologiques, enseignements, incertitudes et besoins de recherches

Au terme de cette étude, nous commencerons par en résumer les principaux apports méthodologiques et enseignements (Section 8.1). Nous présenterons ensuite des facteurs majeurs d'incertitudes qui n'ont pas pu être pris en compte de façon explicite dans les scénarios et par suite, dans les résultats des simulations (Section 8.2). De cette double analyse résultera l'identification de besoins prioritaires de recherches (Section 8.3).

8.1. Principaux apports méthodologiques et enseignements de l'étude

L'étude a permis d'améliorer la base de connaissances nécessaire à tout exercice visant à estimer les importances absolues (demandes, surfaces, productions et échanges) et relatives (poids dans les échanges internationaux) des agricultures européennes à l'horizon 2050 dans un contexte de changement climatique. Ces apports méthodologiques sont présentés dans un premier temps. Nous résumons ensuite les principaux enseignements de l'étude.

8.1.1. Principaux apports méthodologiques

Un premier apport de l'étude réside dans la modélisation explicite des impacts du changement climatique sur les rendements des cultures. Ceci a été fait *via* l'établissement de relations statistiques liant les variations des rendements à celles des trois variables climatiques agissant sur les productions végétales, soit i) la température, la pluviométrie et la concentration atmosphérique en CO_2, sur la base d'une synthèse quantitative des travaux existants (Makowski *et al., in press*). Ceci a pu être fait à la fois pour les plantes en C3 et pour celles en C4, avec néanmoins des limites directement liées à la base de données qui a pu être constituée à partir d'une revue de la littérature scientifique internationale : ainsi, le modèle statistique des plantes en C4 est estimé uniquement à partir de données relatives au maïs ; par suite, les extrapolations aux autres cultures en C4 sont sujettes à caution car conditionnées à l'hypothèse que le modèle statistique établi pour le maïs s'applique aussi aux autres plantes en C4. Les modèles statistiques estimés sont cohérents avec la revue de littérature[149] relative aux mécanismes *via* lesquels les paramètres du changement climatique jouent sur les plantes avec, par exemple, un effet plus fort de l'effet théorique de fertilisation du CO_2 (ci-après désigné « effet CO_2 ») pour les plantes en C3 que pour les plantes en C4. La dépendance de l'expression réelle au champ (dans les exploitations agricoles) de cet effet CO_2 aux conditions nutritives (azote), thermiques et hydriques des cultures, ainsi qu'à leur génétique (variétés) nous a conduit à poser deux hypothèses contrastées, l'une correspondant à une absence de valorisation de cet effet (dans la conjoncture des rendements dits « bas »), l'autre à sa pleine valorisation (dans la conjoncture de rendements dits « hauts »).

Un deuxième apport porte sur l'explicitation des déterminants des évolutions des rendements des cultures à l'horizon 2050, plus spécifiquement sur la distinction entre les effets liés au changement climatique et ceux des évolutions techniques. Ces dernières incluent à la fois le progrès technique (augmentation des rendements sans apport supplémentaire d'intrants) et le recours augmenté aux intrants (accroissement des rendements sans amélioration des techniques)[150]. En pratique, la distinction entre les effets du changement climatique et ceux des évolutions techniques a été réalisée en mobilisant conjointement deux rapports de la FAO. Le rapport de 2012 (Alexandratos et Bruinsma, 2012) suppose explicitement que les conditions climatiques en 2050 seraient les mêmes qu'aujourd'hui. Cette hypothèse, certes peu

[149] Cette revue de littérature comme l'analyse statistique ont été spécifiquement développées dans le cadre de l'étude. Elles sont présentées en détail dans le Rapport du volet d'analyse bibliographique de notre étude qui accompagne ce Rapport de synthèse.

[150] La fonction de production des rendements peut être représentée par une fonction croissante logarithmique liant les intrants (sur l'axe des abscisses) au rendement (sur l'axe des ordonnées). Un déplacement vertical (vers le haut) de cette fonction correspond à un progrès technique puisqu'il permet d'obtenir un rendement plus élevé pour un même niveau d'utilisation des intrants. Ce progrès technique peut être de différentes natures, par exemple un progrès génétique ou une utilisation plus efficace des intrants. Un déplacement vers la droite sur la fonction correspond à un usage augmenté des intrants pour un progrès technique inchangé.

réaliste, impliquait une évolution des rendements à 2050 sous le jeu des évolutions techniques (et, implicitement, d'effets du changement climatique tels qu'ils avaient pu jouer sur les décennies 1990 et 2000). Par contraste, le rapport de 2018 (FAO, 2018) prend explicitement en compte un changement climatique à l'horizon 2050 et donc, une évolution des rendements sous le double jeu du changement climatique et des évolutions techniques, les effets de ces dernières sur les rendements étant, de façon générale, moins optimistes que celles établies par Alexandratos et Bruinsma (2012). Ce travail d'analyse comparée des deux rapports de la FAO, complété par une analyse spécifique des évolutions passées des rendements des différentes cultures dans les différentes régions du monde sur les deux dernières décennies 1995-2015 et l'analyse quantitative des effets du changement climatique sur les rendements (voir *supra*), nous a conduit à considérer une fourchette d'évolution des rendements à l'horizon 2050, et ce pour chaque culture (y compris les fourrages) dans chaque région du monde : le bas de la fourchette (dite des rendements « bas ») suppose des évolutions techniques modérées en phase avec le rapport de la FAO de 2018, associées à la non-valorisation de l'effet CO_2 par les cultures ; le haut de la fourchette (dite des rendements « hauts ») suppose des évolutions techniques plus soutenues en accord avec le rapport de la FAO de 2012, associées à une (pleine) valorisation de l'effet CO_2.

Un des apports de ce travail réside dans l'explicitation et la transparence des hypothèses relatives aux effets du changement climatique et des évolutions techniques sur les rendements, ce qui n'est malheureusement pas le cas dans tous les travaux prospectifs sur la sécurité alimentaire mondiale ou relatifs aux effets du changement climatique sur les rendements : trop souvent, ces travaux ne précisent pas si l'effet CO_2 est inclus ou non, si les effets du changement technique sur les rendements sont mesurés relativement à la situation présente ou à une situation projetée et dans ce cas sous quelles hypothèses d'évolutions techniques, etc.

Au-delà des effets sur les niveaux des rendements, les évolutions techniques peuvent également avoir des effets indésirables sur l'environnement et la santé humaine. C'est notamment le cas lorsqu'elles consistent en une hausse de l'utilisation d'intrants qui, si elle est excessive, peut engendrer des fuites vers l'environnement ou des effets néfastes sur celui-ci (engrais, pesticides, antibiotiques, etc.) et/ou exercer une pression sur les ressources naturelles (énergie, sol, eau, etc.) et sur la biodiversité. Ceci peut aussi être le cas si ces évolutions techniques résultent d'un progrès technique induisant, par exemple, une simplification des paysages agricoles, permettant certes d'augmenter la taille des parcelles et de réaliser des économies d'échelle mais au prix d'une perte de la biodiversité cultivée et sauvage (Benton *et al.*, 2003). La caractérisation et la quantification des impacts environnementaux et sanitaires des évolutions techniques à l'horizon 2050 (à l'aide, par exemple, d'indicateurs de biodiversité, d'émissions de GES, etc.) est une question cruciale dès lors que l'on veut mettre en perspective les évolutions des systèmes agricoles et alimentaires dans un contexte de pressions négatives croissantes sur les écosystèmes. Une telle estimation nécessite de formuler des hypothèses sur i) les poids relatifs de chacun des facteurs qui sous-tendent les évolutions techniques et ii) la nature des évolutions propres à chacun de ces facteurs (ceci parce que certains facteurs de production peuvent, par exemple, être remplacés par d'autres moins dommageables pour l'environnement et/ou la santé humaine). En dépit de l'intérêt évident de cette évaluation environnementale et sanitaire des évolutions techniques, un tel travail n'a pas été réalisé dans le cadre de cette étude, et ce pour deux raisons principales : en premier lieu, parce que le modèle GlobAgri-AE2050 n'est pas couplé à des modules permettant d'évaluer ces effets ; en second lieu, parce que nous n'avons pas été en mesure de formuler des hypothèses documentées et étayées sur les déterminants sous-jacents des évolutions techniques, notamment sur la part qui est liée à une utilisation accrue des facteurs de production *versus* celle liée au progrès technique. En outre, prédire ce que seront demain les impacts des facteurs de production sur l'environnement et la santé humaine est particulièrement difficile dans le double contexte où l'efficience de ces facteurs de production pourrait augmenter et que les plus dommageables d'entre eux pourraient être remplacés par d'autres solutions plus vertueuses vis-à-vis de ces deux enjeux. Dans cette perspective, la Section 8.2 propose une brève discussion sur ce que pourrait être le progrès génétique et les enjeux de la sélection de demain, ceci parce que tout affaiblissement du rythme du progrès génétique, plus généralement du progrès technique, peut avoir pour corollaire un usage plus intensif des facteurs de production avec des conséquences négatives possiblement aggravées pour l'environnement et la santé humaine, pour de mêmes objectifs de niveaux de rendements en 2050.

Un troisième apport de l'étude a trait aux efficiences animales. Rappelons que les (coefficients des) efficiences animales mesurent les quantités des différents aliments (aliments concentrés et fourrages) nécessaires pour produire une unité de chaque production animale (viande de volaille, viande de porc, viande bovine, lait, etc.). Le travail réalisé a permis, pour les différentes productions animales dans les différentes régions distinguées dans le modèle, de rendre la base des efficiences animales de l'année de référence « 2010 » et de l'horizon de simulation 2050 plus cohérente entre espèces au sein d'une même région, et entre régions pour une même espèce.

Un quatrième apport a trait à la possibilité d'analyses dites « pas-à-pas » avec le modèle GlobAgri-AE2050, analyses qui permettent d'apprécier simplement et rapidement les contributions respectives des différentes variables d'entrée (démographie, régimes alimentaires par tête, intensités culturales, rendements des cultures) et paramètres (efficiences animales) du modèle sur les surfaces cultivées (besoins en terres cultivées) et *in fine* sur les productions et les échanges agricoles de chaque région. Rappelons que le modèle GlobAgri-AE2050 est un modèle dit de « bilan matière » qui cherche à égaliser, pour chaque produit dans chaque région (i) les ressources (production et importations) et (ii) les différents usages auxquels sont ajoutés les exportations. Ce modèle présente des limites importantes, notamment l'absence de prix qui empêche de relier explicitement les évolutions des différentes variables de l'équation alimentaire mondiale aux comportements des acteurs (et empêche également toute analyse en valeur). Sa relative simplicité présente néanmoins l'avantage ici souligné de permettre l'analyse pas-à-pas décrite ci-dessus.

8.1.2. Principaux enseignements

Les évolutions des besoins en terres cultivées à l'horizon 2050 sont résumées ci-après en se situant tout d'abord au niveau de l'ensemble de la planète, ensuite à l'échelle des différentes régions du monde, enfin à celle des différentes régions européennes. Rappelons que les terres cultivées mondiales représentent environ 1,5 milliard d'hectares en « 2010 ».

Besoins en terres cultivées à l'horizon 2050 à l'échelle de l'ensemble du monde

À l'échelle mondiale, **dans l'hypothèse où les évolutions techniques seraient nulles** à l'horizon 2050 et où les rendements des cultures, fourrages cultivés inclus, n'évolueraient que sous le seul jeu d'un changement climatique tendanciel[151], les besoins en terres cultivées seraient très importants : ils seraient en effet de +763 millions d'hectares (Mha) en 2050 relativement à « 2010 » dans la situation la moins favorable d'une évolution tendancielle des régimes alimentaires combinée à une absence de valorisation de l'effet CO_2 ; l'adoption de régimes sains dans l'ensemble des régimes du monde et la pleine expression de l'effet CO_2 permettraient conjointement de réduire ces besoins en terres qui resteraient néanmoins très élevés, +601 Mha en 2050 relativement à « 2010 » (*cf.* Section 5.4 et Tableau D.2 en Annexe D).

Cette hypothèse d'évolution des rendements sans évolution technique laisse clairement apparaître le rôle clef des évolutions des techniques sur les besoins en terres cultivées à l'horizon 2050. Ce rôle peut être précisé en considérant une mise en œuvre « pas-à-pas » du **scénario de référence** correspondant aux **deux hypothèses combinées d'une évolution tendancielle des régimes et d'une évolution modérée des rendements** (évolutions techniques modérées et pas d'expression de l'effet CO_2). Dans ce premier scénario de référence, les besoins mondiaux en terres cultivées induits essentiellement par la démographie et les évolutions des consommations alimentaires par tête seraient fortement atténués par la progression des rendements des cultures (ainsi que, mais dans une moindre mesure, par les accroissements des intensités culturales annuelles) de sorte que les besoins mondiaux en terres cultivées ne seraient plus que de +220 Mha à l'horizon 2050 relativement à « 2010 ». L'adoption généralisée, à l'échelle de la planète, de régimes sains permettrait de réduire un peu plus encore ces besoins, et des rendements « hauts » (valorisation de l'effet CO_2 et évolutions techniques soutenues) les annuleraient de sorte que la combinaison de ces deux hypothèses alternatives (scénario des régimes sains et des rendements « hauts ») transformerait les besoins additionnels mondiaux en terres cultivées en une « libération » de terres cultivées de 51 Mha en 2050 relativement à « 2010 » (*cf.* Chapitre 5).

Besoins en terres cultivées à l'horizon 2050 dans les différentes régions du monde

Les chiffres à l'échelle agrégée de l'ensemble de la planète masquent des disparités régionales qu'il est possible d'illustrer sur la base du **scénario de référence des régimes sains et des rendements « hauts »**.

Dans ce scénario, en 2050, l'Europe dans son ensemble verrait son besoin total en terres cultivées diminuer à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 », dégageant ce que nous désignons ci-après comme un « surplus » potentiel de terres de 17 Mha – avec de fortes disparités selon les régions européennes (*cf. infra*) –. Les deux régions Canada-USA et ex-URSS dégageraient des « surplus » plus importants, respectivement, 44 et 83 Mha. Dans ces trois zones où les augmentations de la population à l'horizon 2050 seraient faibles selon les prévisions démographiques médianes de l'ONU, et où la transition vers des régimes

[151] Suivant une trajectoire d'émissions de GES de type RCP6.0.

sains diminuerait les consommations alimentaires par individu (notamment en Europe et au Canada-USA), l'effet de l'augmentation des rendements des cultures dominerait largement.

Par contraste et toujours dans ce scénario de régimes sains et de rendements « hauts », plusieurs autres régions du monde auraient besoin de mettre en culture de nouvelles terres, du moins là où une telle extension est possible. Ce serait notamment le cas dans les deux régions de l'Afrique subsaharienne distinguées dans le modèle, soit l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud où les terres cultivées augmenteraient de, respectivement, +60 et +62 Mha en 2050 relativement à « 2010 » sous le double jeu d'une forte croissance démographique et du nécessaire rattrapage nutritionnel que la prolongation des tendances passées ne suffit pas à combler (et qui impose donc une évolution prononcée des régimes alimentaires pour un objectif de sécurité alimentaire)[152]. Les augmentations des terres cultivées en 2050 relativement à « 2010 » seraient également élevées en Inde, dans le reste de l'Asie (hors Chine), dans la région Argentine-Brésil ainsi que dans la région du Reste de l'Amérique, mais dans une moindre ampleur que dans les régions de l'Afrique subsaharienne. La situation de l'Afrique du Nord et du Proche et Moyen-Orient se distingue, non pas parce que les besoins alimentaires en 2050 ne sont pas importants, mais parce que cette région exploite déjà aujourd'hui, en « 2010 », plus de terres que les seules terres considérées comme cultivables (selon la définition de celles-ci adoptée dans cette étude), même dans le cas considéré jusqu'à présent où la contrainte sur les terres cultivables est définie en supposant qu'il est possible de gagner des terres cultivées sur les surfaces naturelles, forestières ou toujours en herbe : de façon à satisfaire sa demande alimentaire domestique à la hausse en 2050 portée par une forte démographie, cette région augmenterait fortement ses importations de produits agricoles alors que sa dépendance à ces importations est déjà élevée en « 2010 ».

La Chine mérite une attention spécifique. Selon les résultats simulés du scénario combinant des régimes sains et des rendements « hauts », la Chine serait en capacité de réduire la superficie de ses terres cultivées de 36 Mha en 2050 relativement à « 2010 », alors qu'elle continuerait à recourir de façon importante aux importations mondiales pour satisfaire sa demande intérieure (demande d'aliments du bétail incluse). Il est possible, si ce n'est probable pour peu que le contexte des prix des produits et des coûts de production soit tel que cette option soit économiquement rentable, que la Chine opte pour maintenir l'extension de ses terres cultivées au moins au niveau de « 2010 ». Pour cette raison, nous n'avons pas inclus la Chine dans le sous-ensemble des régions dégageant un « surplus » potentiel de terres en 2050 relativement à « 2010 » dans les analyses complémentaires résumées ci-après.

De façon générale, de par la nature du modèle (modèle de bilan sans prix) et la représentation des échanges[153], nos résultats peuvent conduire à surestimer les amplitudes des évolutions des terres cultivées, à la hausse comme à la baisse, relativement à ceux qui seraient issus d'un modèle incorporant des prix qui s'ajustent pour assurer les équilibres entre l'offre et la demande[154]. En pratique, nos résultats sont essentiellement illustratifs des situations contrastées des différentes régions du monde et de leurs besoins respectifs en terres cultivées à l'horizon 2050.

Besoins en terres cultivées à l'horizon 2050 dans les différentes régions européennes

Ce qui est vrai à l'échelle des différentes régions du monde, soit des besoins en terres contrastés selon les régions, l'est aussi à l'échelle des différentes régions européennes, mais bien sûr dans une moindre ampleur compte tenu de la relative modestie des terres cultivables et de la faiblesse de la démographie en Europe**.** En se situant à nouveau dans le scénario de référence des régimes sains et des rendements « hauts », toutes les régions européennes pourraient ainsi réduire

[152] Relativement aux besoins à 2050 de ces deux régions de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud, dans l'hypothèse d'évolution tendancielle des régimes (toujours combinée avec des rendements « hauts »), l'hypothèse des régimes alimentaires sains (combinée avec des rendements « hauts ») accroît les besoins en terres cultivées de, respectivement, +18 et +30 Mha. Dans ces deux régions, les augmentations des terres cultivées à l'horizon 2050 relativement à « 2010 » sont plus élevées dans l'hypothèse des rendements « bas » que dans l'hypothèse des rendements « hauts », la relative modestie de la progression des rendements dans l'hypothèse basse devant, en quelque sorte, être compensée par une progression plus forte des surfaces cultivées, ceci de façon d'autant importante que les régimes sont sains. La « compensation » requiert aussi une augmentation des importations, à nouveau d'autant plus élevée que les régimes sont sains.

[153] Participation aux échanges, importations et exportations, de chaque région du monde selon une logique tendancielle en maintenant aux niveaux de l'année de référence « 2010 » la part des importations de la région dans les utilisations totales domestiques et la part des exportations régionales dans l'ensemble des exportations mondiales, ceci tant que la région considérée ne bute pas sur sa contrainte de terres cultivables : si tel est le cas, elle commence par réduire ses exportations et, si cela n'est pas suffisant pour équilibrer son bilan ressources - emplois et le même bilan à l'échelle agrégée de l'ensemble de la planète, elle augmente ses importations.

[154] Tout en rappelant que les modèles de prix posent aussi de redoutables problèmes de modélisation des mécanismes de marché, influencés par les politiques publiques, pour les marchés des produits comme pour ceux des facteurs de production et notamment ceux des facteurs primaires que sont le travail, la terre et le capital bâtiments et matériels.

leurs surfaces cultivées en 2050 relativement à « 2010 ». Les réductions seraient importantes en Europe de l'Est et en Pologne (respectivement, -8 et de -4 Mha) sous le double jeu de la baisse de leur population et d'un potentiel élevé d'augmentation des rendements des cultures. L'Allemagne et l'Europe Centrale seraient également en capacité de réduire leurs surfaces cultivées en 2050 (respectivement, -3 et -1,3 Mha), dans une moindre mesure cependant du fait d'une évolution démographique moins défavorable. Les diminutions des surfaces cultivées seraient plus modérées en France (- 700 000 hectares), au Royaume-Uni (-300 000 hectares) et dans le Reste de l'Europe (-50 000 hectares).

Dans ces sept régions européennes, une augmentation plus modeste des rendements des cultures (comparaison des scénarios des rendements « hauts » *versus* « bas ») ou une évolution tendancielle des régimes (comparaison des scénarios des régimes sains *versus* tendanciels) augmenterait les besoins en terres cultivées et diminuerait les « surplus » potentiels de terres, possiblement en faisant passer certaines régions en « surplus » à une situation d'expansion des terres cultivées en 2050 relativement à « 2010 ».

Le cas spécifique de l'Europe du Sud dans l'ensemble des régions européennes s'apparente à celui de la Chine au sein des différentes régions du monde (*cf. supra*). Cette région européenne serait en effet en capacité de dégager un « surplus » théorique important de terres (12 Mha) en 2050 relativement à « 2010 » dans le scénario des régimes sains et des rendements « hauts », alors que sa dépendance aux importations agricoles resterait élevée, bien qu'à la baisse relativement à « 2010 » (34% à cette date *versus* 21 % en 2050). Le même raisonnement que celui qui a été développé pour la Chine nous conduit, dans les analyses complémentaires qui suivent les simulations des scénarios de référence (*cf. infra*), à ne pas inclure l'Europe du Sud dans le sous-ensemble des régions européennes qui pourraient dégager un « surplus » potentiel de terres en 2050 relativement à « 2010 ». Un argument additionnel lié aux ressources hydriques de cette région en 2050 sous l'influence du changement climatique vient conforter cette décision. Les résultats des quatre scénarios de référence qui combinent régimes tendanciels ou sains et rendements « bas » ou « hauts » incluent, au titre de l'un des trois paramètres du changement climatique, l'effet de la pluviométrie sur les rendements, effet qui serait négatif en Europe du Sud. Une analyse de sensibilité a été conduite en testant l'hypothèse selon laquelle l'effet de la pluviométrie dans cette région serait plus marqué que celui intégré dans les scénarios de référence, ceci parce qu'à l'effet négatif annuel moyen s'ajouterait un effet également dépressif de la baisse de la pluviométrie pendant les mois de plus forte croissance des cultures (mars à juin pour les cultures d'hiver, mai à août pour les cultures d'été). Dans cette analyse de sensibilité simulée en supposant que les régimes sont tendanciels et les rendements sont « bas », l'Europe du Sud exploiterait toute la surface cultivable disponible en 2050 et serait même amenée à diminuer la part qu'elle occupe sur les marchés européens et mondiaux à l'exportation de façon à mieux satisfaire sa demande intérieure.

Des besoins en terres cultivées aux échanges agricoles

Aux évolutions des surfaces cultivées entre « 2010 » et 2050 correspondent des évolutions des productions des différentes cultures, y compris des fourrages cultivés. Les coefficients des efficiences animales en 2050 permettent ensuite d'évaluer, à partir des niveaux des productions animales à cette date, les utilisations des différentes cultures et des fourrages pour l'alimentation du bétail (ainsi que les surfaces mobilisées par les différents fourrages, en particulier les terres en prairies permanentes), et les équations de modélisation des échanges de définir, dans le cadre du bouclage du modèle, les importations et les exportations de chaque produit agricole dans chaque région[155]. **Les enseignements principaux de l'analyse relative aux échanges agricoles sont résumés ci-après en considérant les échanges nets (exportations - importations) de l'ensemble des produits agrégés en utilisant l'unité d'agrégation de la kilocalorie (kcal).**

Un scénario hypothétique dans lequel les surfaces cultivables des différentes régions du monde en 2050 sont limitées aux surfaces cultivées en « 2010 » annulerait, par construction, les possibilités d'expansion des terres cultivées alors que, on l'a vu (*cf. supra*), plusieurs régions du monde mobiliseraient ce levier (à côté des leviers des rendements et des intensités culturales ainsi que les échanges) pour satisfaire leurs besoins intérieurs en produits agricoles. Dans un tel scénario simulé en supposant une évolution tendancielle des régimes alimentaires et une évolution forte des rendements (hypothèse des rendements « hauts »), les échanges mondiaux de produits agricoles à l'horizon 2050 augmenteraient de façon très importante en accentuant la distinction actuelle entre, d'une part, les pays exportateurs agricoles nets qui verraient leurs exportations fortement augmenter (ex-URSS, Canada-USA, Argentine-Brésil, Océanie, plusieurs régions européennes), et, d'autre part, les pays importateurs nets agricoles qui verraient leurs importations fortement augmenter (ensemble des

[155] En pratique, toutes ces variables endogènes (surfaces, productions et échanges) sont déterminées simultanément comme sorties des simulations des scénarios.

régions africaines et asiatiques, ainsi que le Reste de l'Amérique). Au sein des régions exportatrices, les exportations nettes augmenteraient de façon spectaculaire dans l'ex-URSS (+688 milliards de kcal entre « 2010 » et 2050) et de façon également importante dans d'autres régions, par ordre décroissant d'importance, de +575 milliards de kcal au Canada-USA, de +445 milliards de kcal dans l'ensemble des régions européennes[156] et de +222 milliards de kcal en Argentine-Brésil (*cf.* Sous-Section 5.4.2). Au sein des régions importatrices, les augmentations des importations nettes seraient très élevées en Inde, dans les trois régions africaines et au Proche et Moyen-Orient, plus modérées en Chine, encore plus modérées dans le Reste de l'Amérique et dans le Reste de l'Asie. Il est enfin intéressant de noter que ce scénario hypothétique ne parvient à satisfaire les besoins alimentaires mondiaux en 2050 que si les régimes sont tendanciels et les rendements « hauts ». Les trois autres combinaisons aboutissent à une infaisabilité : quand les rendements sont « bas », les échanges mondiaux ne permettent pas d'équilibrer ressources et emplois dans un contexte d'excès de demande relativement à l'offre, que les régimes soient tendanciels ou sains ; il en est de même quand les rendements sont « hauts » et les régimes sains, résultat *a priori* paradoxal qui peut s'expliquer par le fait que l'hypothèse des régimes sains implique, relativement à l'alternative des régimes tendanciels, une hausse des besoins caloriques dans les deux régions de l'Afrique subsaharienne trop élevée pour équilibrer leurs ressources, importations incluses, et leurs besoins.

Productions domestiques et échanges internationaux doivent donc être mobilisés conjointement pour équilibrer l'équation alimentaire à l'horizon 2050. Partant du scénario hypothétique résumé ci-dessus, les possibilités d'expansion des surfaces cultivées en 2050 dans le scénario de référence des régimes tendanciels et des rendements « hauts » simulé en supposant que la contrainte sur les terres cultivables autorise la mise en culture de terres aujourd'hui naturelles, forestières ou toujours en herbe ont pour conséquence de réduire les importations des régions importatrices nettes et les exportations des régions exportatrices nettes, les échanges mondiaux étant néanmoins toujours nettement plus élevés que ceux de l'année de base « 2010 ». En pratique, dans les quatre scénarios de référence combinant régimes tendanciels *versus* sains et rendements « bas » *versus* « hauts », **les échanges mondiaux en 2050 augmenteraient relativement à « 2010 », renforçant les positions à l'exportation des régions déjà exportatrices nettes en « 2010 » et, en sens inverse, la dépendance aux importations des régions déjà importatrices nettes en « 2010 ».** L'accentuation des situations respectives d'exportateurs nets et d'importateurs nets est légèrement plus marquée si les rendements en 2050 sont « bas » *versus* « hauts » (pour une même hypothèse d'évolution des régimes alimentaires), plus nettement marquée si les régimes en 2050 sont tendanciels *versus* sains[157] (pour une même hypothèse d'évolution des rendements). Au sein de la zone Europe, toutes les régions amélioreraient leur position à l'échange en 2050 relativement à « 2010 » : les positions d'exportateurs nets seraient renforcées (France, Europe de l'Est et Europe centrale) ; les positions d'importateurs nets seraient atténuées (Europe du Sud, Reste de l'Europe, Royaume-Uni) ; l'Allemagne et la Pologne passeraient d'un statut d'importateur net en « 2010 » à un statut d'exportateur net en 2050 dans certains scénarios, notamment dans le scénario des régimes sains et des rendements « hauts ».

Augmenter la production d'oléo-protéagineux en Europe

Plusieurs régions européennes disposeraient ainsi de « surplus » potentiels de terres en 2050 par rapport à « 2010 » : l'Europe de l'Est, la Pologne, l'Allemagne et, dans une moindre mesure, l'Europe centrale et parfois la France. **Ces « surplus » pourraient être mobilisés pour développer la culture d'oléo-protéagineux** dans le double objectif de réduire la dépendance européenne aux importations de tourteaux de soja argentins et brésiliens et de limiter l'expansion des surfaces cultivées de soja dans la région Argentine-Brésil, expansion qui s'opère le plus souvent au détriment des prairies permanentes et des forêts. Sur l'exemple de la culture du soja, les régions européennes listées ci-dessus seraient en mesure de produire sur ces terres en « surplus » entre 4 millions de tonnes de tourteaux de soja (dans le scénario des régimes tendanciels et des rendements « bas ») et 44 millions de tonnes de tourteaux de soja (dans le scénario des régimes sains et des rendements « hauts ») : passer de régimes tendanciels à des régimes sains n'a qu'un effet marginal sur cette production, alors que passer des rendements « bas » à des rendements « hauts » a un effet majeur. Au sein de la zone européenne, et dans le scénario le plus favorable des régimes sains et des rendements « hauts », c'est d'abord en Europe de l'Est qu'il serait possible d'étendre la culture de soja pour une production de tourteaux de soja de +19 millions de tonnes ; puis viennent la Pologne (+12 millions de tonnes), l'Allemagne (+9 millions de tonnes), l'Europe centrale (+3,1 millions de tonnes) et la France (+1,6 million de tonnes). Cette production additionnelle permettrait de réduire à zéro les importations européennes de tourteaux oléo-protéagineux de pays tiers non européens, tout en laissant près de 55 % des « surplus » de terres (soit

[156] Le chiffre relatif aux régions européennes inclut les exportations nettes intra- et extra-communautaires.

[157] À l'exception des régions suivantes : France, Allemagne et Europe centrale en Europe, ex-URSS et Océanie dans le reste du monde.

9 Mha sur les 17 Mha de « surplus » hors Europe du Sud)[158] encore « libres » pour d'autres usages. En diversifiant les cultures oléo-protéagineuses (soja, colza, tournesol, pois protéagineux, etc.) sur les terres européennes en « surplus », on peut espérer des effets environnementaux positifs additionnels et éviter le retour trop fréquent des mêmes cultures dont on connaît les effets néfastes en termes de rendements et de recours aux intrants de synthèse.

Des marges de manœuvre pour développer des pratiques plus agro-écologiques en Europe

Dans la lignée de cette dernière observation, une autre « utilisation » des terres en « surplus » dans les régions européennes susmentionnés a été envisagée. Dans un contexte où il n'a pas été possible (dans cette étude) de distinguer les contributions respectives du progrès technique et des évolutions techniques à la croissance des rendements en 2050, celle-ci pourrait principalement résulter d'un usage accru des intrants chimiques aux effets possiblement négatifs sur l'environnement et la santé humaine. **La mise en culture des « surplus » de terres pourrait permettre de substituer le levier « rendement » par le levier « surface »**, tout en maintenant les niveaux des productions et des échanges en 2050 estimés dans les scénarios de référence. Cette stratégie d'utilisation des « surplus » des surfaces européennes permettrait donc de relâcher une éventuelle pression à la hausse sur les rendements au titre de considérations environnementales, et d'évoluer vers des systèmes européens de production moins intensifs en intrants, soit, de façon générale, des systèmes (plus) agro-écologiques. Cette marge de manœuvre est estimée relativement aux niveaux des rendements les plus bas déjà intégrés dans les scénarios de référence[159]. Dans l'hypothèse des régimes tendanciels, la mise en culture des « surplus » de terres permettrait de limiter la hausse du rendement moyen toutes cultures confondues à +13 % en 2050 relativement à « 2010 » (versus +15% dans le scénario de référence correspondant). Dans l'hypothèse des régimes sains, il serait possible de limiter la hausse du rendement moyen toutes cultures confondues à +12 % en 2050 relativement à « 2010 » (versus +19 % dans le scénario de référence correspondant). Ces chiffres moyens masquent de fortes disparités selon les régions européennes, les baisses potentielles des rendements ainsi permises étant d'autant plus élevées que la région dispose de « surplus » de terres importants : les baisses seraient donc plus marquées en Europe de l'Est et en Pologne (respectivement, -7 % et -4 % en 2050 si les régimes sont tendanciels, et -16 et -15% si les régimes sont sains).

8.2. Des facteurs d'incertitude non explicitement pris en compte

Plusieurs facteurs d'incertitude n'ont pas pu être pris en compte de façon explicite dans l'analyse quantitative. Ils concernent en premier lieu des facteurs sous-jacents d'évolution des rendements à l'horizon 2050, plus spécifiquement les adaptations au changement climatique et à ses effets : ces adaptations peuvent être appréciées à l'aune, d'une part, des changements de pratiques voire des systèmes agricoles, et, d'autre part, du progrès génétique. Dans un deuxième temps, sont considérés trois autres sources majeures d'incertitude, soit (i) les évènements climatiques extrêmes, (ii) les bioagresseurs des cultures et les maladies des animaux d'élevage, et (iii) la qualité des produits agricoles sous l'influence du changement climatique.

8.2.1. Adaptations au changement climatique

Les rendements en 2050 de notre étude résultent à la fois des effets du changement climatique et des évolutions techniques, ces dernières incluant le recours augmenté aux intrants et le progrès technique *per se* (*cf. supra*). Ce dernier ne distingue pas si les hausses des rendements sont liées à l'amélioration variétale (matériels végétaux adaptés aux nouvelles conditions climatiques et agronomiques) ou à l'amélioration des techniques culturales, à la mise au point de systèmes de culture mieux adaptés et/ou à une utilisation généralisée des technologies d'aide à la décision en agriculture de précision. Les données statistiques d'évolution des rendements régionaux, nationaux ou à l'échelle d'un ensemble de pays telles qu'utilisées dans cette étude confondent les deux sources de progression des rendements. Il existe néanmoins des travaux permettant cette

[158] Ceci signifie que dans le scénario des régimes sains et des rendements « hauts », l'Europe n'utiliserait que 45% des « surplus » potentiels de terres en 2050 (8 Mha sur 17) pour réduire à zéro en 2050 ses importations de tourteaux d'oléo-protéagineux de pays tiers non européens.

[159] On raisonne ici en rendements moyens toutes cultures.

distinction, mais pas pour l'ensemble des cultures, fourrages inclus, dans toutes les régions distinguées dans l'étude[160] : ces travaux restent au mieux limités à certaines cultures et/ou certaines zones géographiques.

Concrètement, nous avons implicitement supposé dans l'étude une évolution future des rendements dans une perspective de poursuite des dynamiques d'adaptation déjà enclenchées spontanément par les agriculteurs en réponse au changement climatique graduel qu'ils perçoivent (par exemple, en avançant les dates de semis, en modifiant les densités de semis, etc.). D'autres adaptations plus en rupture seront certainement nécessaires pour faire face à l'augmentation de la contrainte climatique.

Quelles adaptations des systèmes de culture pour quels impacts sur les rendements ?

C'est la capacité adaptative des exploitations agricoles qui leur permet de s'ajuster au changement climatique, y compris, au-delà des moyennes, dans ses manifestations en variance, à savoir la variabilité inter-annuelle et les évènements extrêmes (Bindi et Olesen, 2011). Le GIEC distingue trois types d'adaptation au changement climatique selon le niveau de transformation opéré par rapport aux systèmes agricoles en place (Porter *et al.*, 2014) :

1. **L'adaptation incrémentale** traduit une ou plusieurs modifications isolées des pratiques agricoles, par exemple des changements de dates de semis, de variétés, de régimes de fertilisation ou d'irrigation. Il s'agit de décisions tactiques que l'agriculteur peut rapidement mettre en œuvre sans modification profonde de son système pour faire face, par lui-même, au changement climatique dont il perçoit les manifestations. Ces adaptations sont assez facilement quantifiables *via* l'expérimentation ou le recours à des modèles de simulation (Challinor *et al.*, 2014 ; Donatelli *et al.*, 2015).
2. **L'adaptation systémique**, mise en œuvre à l'échelle de la succession de cultures et de l'exploitation, est de nature plus stratégique. Elle peut être motivée par la recherche d'une plus grande résilience face au climat se traduisant par une diversification des rotations, la pratique de cultures associées, l'introduction de l'agroforesterie et de l'agriculture de conservation des sols. Elle peut se traduire, soit par une baisse des utilisations d'intrants de synthèse, voire leur interdiction en agriculture biologique, soit par une augmentation de ces utilisations pour valoriser les opportunités permises par l'élévation de la température dans les zones plus froides et l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2. Les impacts sur les rendements de ces adaptations systémiques sont plus difficiles à modéliser, notamment dès lors qu'il s'agit d'introduire des pratiques agroécologiques.
3. **L'adaptation transformationnelle** s'exprime le plus souvent à l'échelle régionale pour caractériser le changement des paysages agricoles résultant des adaptations systémiques à plus petite échelle. En théorie, les potentialités de production pour de nouvelles cultures dans des régions jusqu'alors jugées non propices (par exemple, sous l'effet de la migration des cultures thermophiles vers les zones plus septentrionales de l'Europe) sont accessibles par la modélisation agronomique. Adaptations systémiques et transformationnelles requièrent le plus souvent une implication des filières de commercialisation et de distribution (pour valoriser les produits) et des incitations publiques positives (subventions).

Dans notre étude, les adaptations incrémentales sont prises en compte dans les projections des rendements à l'horizon 2050 *via* les effets des évolutions techniques tels que projetés par la FAO[161]. Les deux autres types d'adaptations, soit les adaptations systémiques et les adaptations transformationnelles, ne sont pas incluses, pas plus au niveau des projections des rendements à l'horizon 2050 que dans les différents scénarios simulés, ceci du fait de la très grande difficulté à les apprécier, les qualifier et en mesurer les conséquences.

Quels progrès génétiques dans un contexte de changement climatique ?

Parmi les différentes facettes du progrès technique telles que rapidement évoquées dans le Chapitre 3 sous forme d'innovations technologiques et d'évolution des pratiques agricoles, le **progrès génétique** revêt une importance particulière. Il se définit comme l'augmentation du rendement en grains des cultures par unité de temps (le plus souvent l'année) sous conditions pédoclimatiques et pratiques agronomiques optimisées. Il est calculé pour les différentes variétés

[160] Ainsi, des travaux appliqués sur le blé en Australie considèrent que la hausse des rendements résulte à parts sensiblement égales des progrès génétiques et agronomiques (Robertson *et al.*, 2016).

[161] La FAO appuie ses projections sur le prolongement des tendances passées. Ces dernières incluent, par construction, les effets des adaptations incrémentales. Leur prolongement, même ajusté comme c'est le cas dans cette étude (*cf.* Chapitre 3), revient à supposer la poursuite des adaptations incrémentales à un même rythme et dans une même ampleur d'ici 2050 que par le passé.

disponibles à partir de régressions linéaires qui lient le rendement à l'année d'inscription au catalogue, et est exprimé soit en quintaux par hectare et par an (q ha^{-1} an^{-1}), soit en pourcent par an (% an^{-1}). Les données mobilisées à cette fin proviennent soit d'essais qui comparent des variétés cultivées dans les mêmes environnements mais issues de périodes de sélection différentes, soit d'essais variétaux réalisés à différentes périodes de temps et connectés grâce à des variétés communes. Cette seconde option conduit généralement à des estimations du progrès génétique légèrement supérieures à la première, en partie probablement par sous-estimation de l'effet année (MacKay *et al.*, 2011).

Les deux méthodes ont été utilisées dans de nombreux travaux pour chiffrer le progrès génétique des quatre cultures principales à l'échelle mondiale : le blé, le maïs, le riz et le soja. À l'échelle européenne, l'attention est centrée sur le blé et le maïs. Il existe néanmoins des travaux récents sur le riz (par exemple, Zhu *et al.*, 2016) et le soja (par exemple, Koestler *et al.*, 2014). De façon générale, des travaux comparatifs du progrès génétique pour différentes cultures et différentes régions seraient plus que bienvenus, par exemple en étendant à plusieurs régions le travail de comparaison du progrès génétique réalisé par Laidig *et al.* (2014) pour 12 cultures en Allemagne.

Dans le cas du blé, le progrès génétique moyen estimé à l'échelle mondiale sur 50 ans est égal à 0,42 q ha^{-1} an^{-1} (pour un rendement aux normes à 15 % d'humidité du grain), 50 % des valeurs se situant entre 0,19 et 0,59 q ha^{-1} an^{-1} (75 études). Ce gain annuel en quintaux correspond à un gain relatif de 0,72 % an^{-1} (par rapport au rendement moyen des variétés), 50 % des valeurs se situant entre 0,45 et 0,91 % an^{-1}. Les estimations du progrès génétique varient selon les régions du monde, en fonction des niveaux des rendements atteints, eux-mêmes liés aux environnements et aux modes de conduite des cultures des essais. Ces estimations sont d'autant plus élevées, (en q ha^{-1} an^{-1}) que l'environnement de culture est productif, notamment que les disponibilités en eau et en éléments nutritifs sont optimales (Sadras et Lawson, 2011). Sur la base d'études réalisées sur des séries variétales longues de 50 ans, il est possible de chiffrer le progrès génétique sur blé en Europe entre 0,3 et 0,4 q ha^{-1} an^{-1} (Cormier *et al.*, 2013 ; Ahrends *et al.*, 2018)[162]. Ce progrès génétique a été plus faible en Amérique du Nord, en Amérique du Sud et en Australie, de 0,1 à 0,2 q ha^{-1} an^{-1} (Sadras et Lawson, 2011 ; Beche *et al.*, 2014 ; Rife *et al.*, 2019), et plus élevé en Chine, 0,6 q ha^{-1} an^{-1} (Wu *et al.*, 2014). L'absence d'études spécifiques empêche son estimation pour la Russie et les pays de la Mer Noire.

Plusieurs études mentionnent, dans certains environnements, un ralentissement du progrès génétique sur blé, voire son absence, à partir des années 1990 : en Argentine (Lo Valvo *et al.*, 2018), au Brésil (Beche *et al.*, 2014), en Espagne (Acreche *et al.*, 2008), aux États-Unis (Graybosch et Peterson, 2012), en Australie (Flohr *et al.*, 2018) ou encore en Turquie (Gummadov *et al.*, 2015). Pour autant, il est difficile de conclure à un effet marqué négatif du changement climatique sur l'évolution du progrès génétique en blé, une étude récente montrant par exemple un progrès génétique même dans le cas d'un scénario de sécheresse considérée comme forte pour l'Europe du nord (Touzy *et al.*, 2019). En pratique, une hypothèse proposée pour expliquer cette stagnation du progrès génétique sur blé est que la sélection s'est davantage concentrée sur de nouvelles cibles de sélection comme la qualité du grain et la résistance aux maladies foliaires au détriment d'un objectif de gain de rendement (Flohr *et al.*, 2018).

Dans le cas du maïs, les études les plus récentes basées sur 50 années d'inscription variétale concluent à un progrès génétique en Europe et en Amérique du Sud d'environ 1,0 à 1,1 q ha^{-1} an^{-1} (Di Matteo *et al.*, 2016 ; Abdala *et al.*, 2018), et en Amérique du Nord de 0,94 q ha^{-1} an^{-1} en conditions irriguées et de 0,63 q ha^{-1} an^{-1} en conditions non irriguées (Smith *et al.*, 2014 ; Chen *et al.*, 2016). À notre connaissance, contrairement au cas du blé, il n'existe pas de travaux faisant état d'un ralentissement du progrès génétique sur maïs sur les années les plus récentes.

Il ne semble pas déraisonnable de supposer que la progression des rendements puisse se poursuivre à l'avenir *via* l'innovation variétale, avec, dans le cas du blé, un gain de 0,4 q ha^{-1} an^{-1} (0,7 % an^{-1}) sur la base des estimations recensées ci-dessus. La qualité du grain et la résistance aux maladies resteront des cibles importantes des programmes de sélection. Une concentration atmosphérique en CO_2 plus élevée, des températures plus élevées et des épisodes de sécheresse plus fréquents devront être pris en compte dans les essais multi-locaux et pluriannuels. La modélisation écophysiologique pourra également contribuer à concevoir des idéotypes (mieux) adaptés à ces nouvelles conditions climatiques. Il sera néanmoins très difficile pour la sélection de prendre en compte des événements extrêmes et rares (à l'image de l'année 2016 en France), ceci parce que les interactions génotype x environnement sont encore mal comprises et peu valorisées et que des génotypes mieux adaptés à des conditions extrêmes ne sont sans doute pas ceux qui s'exprimeront le mieux en conditions moyennes (ils ne seront donc pas la priorité des

[162] En France, sur la base de 10 études réalisés en conditions optimales, le gain aurait été plus élevé, soit 0,62 q ha^{-1} an^{-1} avec une forte variabilité selon les études s'échelonnant entre 0,30 et 1,37 q ha^{-1} an^{-1}.

sélectionneurs et même sous l'hypothèse de leur disponibilité, ils ne seront que peu choisis par les agriculteurs sauf à supposer que les évènements extrêmes sont la « nouvelle » norme et donc définissent les conditions moyennes).

Le progrès génétique futur bénéficiera aussi des avancées des méthodes de sélection. Ces avancées portent aussi bien sur les variétés hybrides en blé, *a priori* plus stables que les variétés classiques (Muhleisen *et al.,* 2014), que sur les méthodes de sélection assistées par marqueurs moléculaires (ou méthodes assimilées) qui permettent d'accélérer le progrès génétique (Meuwissen *et al.,* 2001). On peut attendre un effet positif de ces méthodes à partir du moment où des équations de sélection robustes auront été développées, que les interactions génotype x environnement auront été mieux prises en compte et que la sélection multi-traits aura été intégrée. Des questions demeurent pour les méthodes de transformation, notamment l'édition de gènes, pour lesquelles il existe déjà des preuves de concept sur des cibles telles que la résistance aux maladies, la tolérance aux herbicides ou encore la composition des produits récoltés. Ces méthodes posent les questions liées du statut réglementaire des plantes ainsi obtenues, statut encore ambigu aujourd'hui, de leur perception et leur acceptabilité par les consommateurs et les citoyens, ainsi que de leur adoption (vitesse et ampleur) par les agriculteurs. En outre, et peut-être surtout dans le cadre de cette étude, leur apport possible au progrès génétique reste difficile à chiffrer ; les limites, en amont, concernent notamment la connaissance de l'effet des gènes et des allèles concernés. Des projets importants de recherche portent sur l'amélioration de l'efficacité de la photosynthèse et le transfert de la fixation symbiotique de l'azote des légumineuses vers les céréales (Dent et Coking, 2017) : il est néanmoins peu probable que ces recherches se traduisent à moyen terme dans les variétés. Des travaux du Cimmyt[163] suggèrent néanmoins une amélioration de la tolérance des variétés aux stress abiotiques, en particulier à la sécheresse et aux températures élevées. En France, des projets récents ayant comme cibles la sécheresse (programme BreedWheat, ANR-10-BTBR-03[164]) ou les fortes températures (FSOV 2014L HeatWheat[165]) montrent qu'il existe une variabilité génétique exploitable en blé.

En maïs, l'étude de Parent *et al.* (2018) suggère que l'adaptation variétale (dates de floraison et de semis) mobilisant la variabilité génétique actuelle de cette espèce permettra de répondre aux enjeux du changement climatique en Europe à l'horizon 2050. En Europe du Nord, le maïs, espèce semée au printemps, pourrait ainsi profiter d'un réchauffement qui permettrait d'avancer les dates de semis et donc de mieux intercepter le rayonnement lumineux maximal au mois de juin, sous réserve néanmoins d'une disponibilité en eau satisfaisante (ni trop peu pour permettre l'implantation de la culture, ni trop pour permettre l'accès aux parcelles). Bien que disposant aussi d'une large variabilité génétique sur la date de floraison, il est peu probable que les espèces semées en hiver comme le blé puissent profiter de cette adaptation. Dans le cas du blé, Gouache *et al.* (2012) montrent qu'au sein des différentes stratégies d'adaptation aux fortes températures, l'avancée des dates de semis serait peu efficace, la culture de variétés plus précoces partiellement efficace et la sélection de variétés tolérantes la plus efficace.

En résumé, en tenant compte des évolutions récentes du progrès génétique, de l'exploration accrue des ressources génétiques, des nouvelles méthodes de sélection (incluant le recours à la modélisation des traits) et de l'orientation de la sélection vers des cibles en lien avec les évolutions du climat (tolérance à la sécheresse et aux hautes températures), on peut raisonnablement faire l'hypothèse d'un maintien d'un progrès génétique dans les 30 années qui viennent.

8.2.2. D'autres facteurs d'incertitude non explicitement pris en compte

Bioagresseurs

Les résultats des simulations présentées dans l'étude supposent implicitement que les pertes de récolte dues aux bioagresseurs ne sont pas modifiées par le changement climatique. Plus spécifiquement, les projections des rendements à l'horizon 2050 intègrent les pertes de récolte dues aux bioagresseurs non contrôlés en supposant que celles-ci seront de même ampleur à l'avenir que sur les deux dernières décennies.

Il s'agit là d'une incertitude majeure, malheureusement très difficile, si ce n'est impossible, à réduire compte tenu de la diversité des bioagresseurs, de leurs coévolutions avec les perturbations climatiques et les modifications des pratiques culturales et des paysages agricoles, et les possibles émergences de maladies épidémiques dans telle ou telle région (*cf.*

[163] Centre international d'amélioration du maïs et du blé (de l'espagnol *Centro internacional de mejoramiento de maiz y trigo*) - https://www.cimmyt.org/

[164] https://anr.fr/ProjetIA-10-BTBR-0003

[165] https://www.fsov.org/heatwheat-analyse-de-la-diversite-genetique-de-la-reponse-au-strss-thermique-via-phenotypage-fin-et-genetique-d-association

Sous-Section 2.2.5). Dans ce contexte, quantifier les impacts sur les rendements des modifications des facteurs biotiques induits par le changement climatique sur la base de relations statistiques, à l'instar de ce qui a pu être réalisé pour les paramètres abiotiques (concentration en CO_2, température, pluviométrie), est une tâche impossible sur la base des études aujourd'hui disponibles ; en d'autres termes, déduire d'une méta-analyse des relations statistiques permettant de prédire comment les bioagresseurs influencés par le changement climatique joueront demain sur les rendements n'est pas possible, ce qui ne veut pas qu'une telle méta-analyse ne serait pas utile en soi pour faire un état des lieux des connaissances actuelles.

Dans ce contexte, une voie qu'il serait intéressant de développer est la construction de scénarios d'évolution des bioagresseurs, du moins pour les cultures majeures et leurs principaux ennemis, en lien avec les évolutions des pratiques agricoles, notamment les moyens de protection des cultures[166]. Dans de nombreux pays et en particulier dans les pays européens, les pouvoirs publics cherchent à limiter les utilisations de pesticides de synthèse au fur et à mesure que leurs effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine sont de mieux en mieux documentés. La pression de la société pousse aussi à la transition vers des formes d'agricultures moins dépendantes de la chimie de synthèse, en un mot des agricultures relevant des principes et des méthodes de l'agroécologie utilisant en particulier des méthodes de lutte contre les bioagresseurs ne reposant pas sur la chimie de synthèse ; ces méthodes alternatives sont certes souvent à effet partiel, mais il est attendu que leur combinaison assure une protection suffisante des cultures. Il est néanmoins légitime de se demander si les nouveaux équilibres biologiques que l'on cherche ainsi à favoriser et développer seront (toujours) suffisants, et à quel horizon, pour maintenir les pertes de récolte à des niveaux acceptables, *i.e.* aux niveaux antérieurs qui sont implicitement ceux qui sont pris en compte dans nos projections des rendements à l'horizon 2050. D'un autre côté, il n'est pas déraisonnable de supposer que le progrès génétique permettra de mettre au point des variétés plus résistantes aux pathogènes et que le développement du biocontrôle permettra demain de faire face à des problèmes aujourd'hui non résolus par des méthodes prophylactiques. Pour autant, il n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de prédire si la substitution progressive des pesticides de synthèse par l'ensemble des méthodes alternatives se traduira par des pertes de récolte liées aux bioagresseurs d'ampleur égale ou supérieure aux pertes actuelles. Il est en particulier impossible d'apprécier de façon robuste si les conditions futures seront, dans une région donnée, par exemple en France, plus favorables ou, au contraire, plus défavorables au développement des ennemis des cultures. En effet, ces conditions futures dépendront à la fois du changement climatique, du progrès technique, des évolutions des pratiques et des systèmes agricoles, etc., selon des modalités qui peuvent être favorables (dans le cas du changement climatique, des hivers plus doux et plus humides) ou défavorables (dans le cas du changement climatique, des printemps et des étés plus secs). Il en est de même pour les maladies émergentes.

Dans le monde animal, plusieurs travaux montrent que l'aggravation du changement climatique pourrait accroître les effets des maladies du bétail en élargissant les biotopes des agents pathogènes et en favorisant les épidémies par des conditions climatiques (températures, humidité, rayonnement ultraviolet) plus propices (Fox *et al.*, 2011 ; Fox *et al.*, 2015). La diversité des agents pathogènes et des systèmes d'élevage de par le monde et, de façon liée, l'incomplétude des modèles mobilisables pour étudier ces processus font qu'il n'est également pas possible de construire des hypothèses robustes quant au développement des maladies du bétail et de leurs effets, d'autant plus quand on se situe à l'échelle de l'ensemble du monde.

Qualité des produits récoltés

Une nouvelle préoccupation a récemment émergé. Elle a trait à la composition nutritionnelle des productions végétales qui pourrait se dégrader à l'avenir sous l'influence du changement climatique, et plus spécifiquement de l'élévation de la concentration de l'atmosphère en CO_2. Des travaux de recherche menés en chambre de culture ou au champ avec enrichissement de la teneur en CO_2 ont en effet montré que la teneur en protéines[167] de la fraction récoltée des cultures (grains, tubercules) était alors significativement plus faible, dans une fourchette de -7 à -15 %, que celle du témoin sans enrichissement de la teneur en CO_2. La baisse de la teneur en protéines serait nettement plus élevée pour les céréales en C3 (blé, orge, riz) et les pommes de terre que pour les légumineuses en C3 et les plantes en C4 (Myers *et al.*, 2015). Les résultats relatifs aux cultures légumières sont hétérogènes et ne permettent pas de conclure à un effet négatif systématique

[166] A l'instar de ce qui a été fait dans l'étude de Roux *et al.* (2017), il serait possible d'utiliser ces scénarios d'évolution des bioagresseurs et des dégâts que leur prolifération serait susceptible d'occasionner pour simuler des scénarios de crise majeure et examiner leurs effets sur les équilibres emplois-ressources analysées précédemment.

[167] Dans cette perspective, il serait particulièrement intéressant de prolonger le travail d'équilibre en ressources et emplois exprimé en kilocalories de cette étude par un même travail d'équilibre exprimé en grammes de protéines, y compris en tenant compte de l'impact du changement climat sur la teneur en protéines des produits.

(Scheelbeek *et al.,* 2018). Selon Medek *et al.* (2017), la baisse de la teneur en protéines pourrait conduire à ce que 200 millions de nouvelles personnes passent, à terme, en dessous des apports protéiques journaliers recommandés et à ce que les carences protéiques des populations déjà en dessous de ces recommandations soient aggravées.

Cette baisse de la teneur en protéines a également pu être démontrée pour les fourrages (Dumont *et al.,* 2015 ; Dellar *et al.,* 2018). Comme pour les céréales en C3, l'élévation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 augmente la quantité de biomasse mais au prix d'une baisse de la teneur en azote des fourrages récoltés. Cette baisse est atténuée dans le cas des prairies plurispécifiques à base de légumineuses fixatrices d'azote.

D'autres micronutriments essentiels pourraient également être affectés négativement par une augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère à 550 ppm, avec une baisse de la teneur en zinc et en fer de -3 à -11% dans les graines de céréales et de légumineuses (Myers *et al.,* 2015 ; Asseng *et al.,* 2019). Les baisses seraient étendues au phosphore, au potassium, au calcium, au soufre, au fer, au zinc, au cuivre et au magnésium pour une large gamme de cultures soumises à une concentration atmosphérique en CO_2 extrême de 690 ppm, ce qui conduirait, par exemple, à exposer de 150 à 200 millions de nouvelles personnes à une déficience en zinc et à renforcer cette dernière pour plus d'un milliard d'individus (Myers *et al.,* 2015). Les risques d'anémie chez les jeunes enfants et les femmes enceintes seraient également aggravés par des régimes alimentaires appauvris en fer. Dans le cas du riz, Zhu *et al.* (2018) montrent que le changement climatique pourrait induire une baisse des teneurs en vitamines B1, B2, B5 et B9, de -13 à -30 %, alors que la teneur en vitamine E augmenterait, ce qui affecterait les régimes alimentaires à base de riz d'environ 600 millions de personnes en Asie. Par contraste, Hummel *et al*. (2018) suggèrent que la moindre pluviométrie (sécheresse) pourrait augmenter la teneur en zinc chez le haricot.

La diminution de la teneur en protéines peut être attribuée, au moins pour partie, à une absorption de l'azote par la culture qui ne suit pas l'assimilation du carbone (effet dit de dilution). D'autres processus physiologiques sont aussi en jeu, par exemple une inhibition de la transformation du nitrate en protéines dans les feuilles (Bahrami *et al.,* 2017). Il est clair que des recherches physiologiques approfondies sont requises pour mieux comprendre les mécanismes par lesquels le changement climatique peut influencer les teneurs en nutriments, en micronutriments et en vitamines des végétaux et, le cas échéant, proposer des solutions correctrices.

Il est envisageable d'essayer de compenser la baisse de la qualité nutritionnelle des végétaux *via* la sélection végétale dans la mesure où il semble exister une variabilité génétique suffisante de réponse des teneurs en protéines et micronutriments à l'élévation de la concentration de l'atmosphère en CO_2 (Myers *et al.,* 2015). Il est également possible de répondre à cette baisse *via* une fertilisation plus efficace et mieux positionnée relativement aux besoins des cultures en s'appuyant sur une utilisation systématique d'outils d'aide à décision, sur l'agriculture de précision ou encore sur les nouvelles générations d'agroéquipements. Il est néanmoins impossible d'estimer l'ampleur correctrice que permettraient d'atteindre ces stratégies.

Évènements climatiques extrêmes

Au-delà des effets des paramètres climatiques en moyenne (moyennes des températures et des pluies), le changement climatique se manifestera aussi par des événements extrêmes plus nombreux avec des intensités plus fortes (sécheresses intenses, tempêtes, inondations). Les conséquences de ces accroissements en nombre et intensité des évènements extrêmes sur le système alimentaire mondial en 2050 n'ont pas été analysées dans le cadre de cette étude, le modèle GlobAgri-AE2050 n'étant pas adapté à une telle analyse.

Le recours à des hypothèses hautes et basses d'évolution des rendements peut cependant donner une première idée des effets que pourraient avoir des variations interannuelles des capacités d'expression des évolutions techniques. De telles variations peuvent donc également être vues comme le résultat d'aléas climatiques et par suite, comme des plages de variabilité interannuelle des rendements (à la réserve près, néanmoins, que dans la présente étude ces écarts à la moyenne interviennent, par construction, simultanément dans toutes les régions du monde). Il est envisageable d'utiliser ces mêmes jeux de rendements végétaux, et les contrastes qu'ils intègrent, pour simuler des chocs de rendements en certaines parties du globe, censés représentés les effets d'événements climatiques « plus » localisés. Il faudrait néanmoins s'assurer que la plage de variation représentée ici est suffisante pour prendre en compte les effets des événements extrêmes que l'on veut simuler ou s'il est nécessaire de les contraster encore plus nettement en vue d'une meilleure représentation des phénomènes à décrire.

Cette façon de procéder, pour intéressante qu'elle soit, n'est toutefois pas en mesure de rendre compte des effets cumulés que pourrait avoir une augmentation de la fréquence des événements extrêmes, comme semblent l'envisager les projections

climatiques établies par le GIEC, y compris à un horizon aussi rapproché que 2050, voire avant. De tels chocs répétés auraient des conséquences non seulement sur les conditions agricoles per se, mais également sur les formes d'agricultures et les comportements des agriculteurs. Certains d'entre eux pourraient voir leur pérennité dans l'activité agricole très directement menacée. Ils réagiraient, s'ils choisissent de rester dans l'activité agricole, en adoptant des pratiques et des systèmes agricoles d'abord orientés sur un objectif de résilience. Dans la mesure où il est encore difficile de préciser les effets de ces comportements dans les différentes régions du monde et même au sein des différentes régions européennes, il est délicat d'envisager d'intégrer de telles incertitudes dans un exercice tel que celui-ci.

8.3. De nombreux besoins de recherches

À l'issue d'un travail comme celui-ci, de son volet d'analyse de la littérature scientifique internationale comme de celui ayant trait à la modélisation, apparaissent naturellement de nombreux besoins de recherches. Nous présentons ici ces besoins en reprenant le cadre d'analyse utilisé pour conduire les simulations, soit en définissant les besoins de travaux additionnels relatifs aux variables d'entrée du modèle et à leurs projections à l'horizon 2050, aux facteurs d'incertitude qu'il n'a pas été possible de prendre en compte explicitement et au modèle *per se* et notamment à sa spécification et à son paramétrage. De façon générale, les recherches à développer doivent contribuer à réduire les incertitudes, de façon absolue (robustesse accrue des simulations) et de façon relative en mieux reliant les évolutions à leurs déterminants.

Améliorer la quantification des variables d'entrée des équations de bilan ressources-emplois

Même s'il s'agit là d'une évidence, déjà maintes fois mise en avant, on commencera par souligner la nécessité d'améliorer **les bases de données** relatives aux différentes variables des équations de bilans équilibrant les ressources et les emplois des différents produits agricoles dans les différentes régions du monde. Des efforts très importants ont été faits dans ce sens, notamment pour assurer une plus grande cohérence des données relatives aux offres et aux demandes (dans le cas, par exemple, des productions animales et des différents fourrages utilisés par les animaux). On a, dans le cadre de cette étude, essayé d'améliorer la cohérence des données mondiales en matière d'efficiences animales sans toutefois être encore en capacité de mesurer les gains qu'ont permis ces améliorations en termes de robustesse des résultats. Au-delà de l'analyse de sensibilité de ceux-ci à ces évolutions relatives aux données, d'importants efforts de production et de coordination doivent être poursuivis et intensifiés par la communauté scientifique internationale. Dans cette perspective, il nous semble que l'attention doit prioritairement être portée (i) aux intensités culturales annuelles, (ii) aux fourrages (surfaces et rendements) et en particulier aux ressources fourragères des terres toujours en herbe et, de façon liée, (iii) aux utilisations des cultures et des fourrages par les animaux (*i.e.*, dans notre modèle, les coefficients des efficiences animales). Dans les trois cas, les incertitudes concernent l'année de base des simulations, ce qui conditionne la robustesse des projections qu'il est possible de faire pour 2050, et au-delà.

Dans de nombreux exercices portant sur les questions de sécurité alimentaire dans un contexte de changement climatique, la distinction entre les surfaces cultivées et les surfaces récoltées n'est au mieux qu'implicite. **Les intensités culturales annuelles** permettent de rendre cette distinction explicite, mais les déterminants de ces coefficients et leurs évolutions doivent pouvoir être précisés afin de comprendre notamment ce qui les rend inférieurs à 1 (surfaces récoltées inférieures aux surfaces cultivées) ou supérieurs à 1 (au-delà de la possibilité de mener annuellement plusieurs récoltes sur une même parcelle). Leurs évolutions à l'horizon 2050 sont en effet un déterminant majeur des besoins futurs en terres agricoles qui diminueront (en cas d'évolution à la hausse des coefficients) ou, au contraire, augmenteront (en cas d'évolution à la baisse des coefficients), toutes choses égales par ailleurs. Il est malheureusement très difficile d'avoir une image claire de ces coefficients aujourd'hui et de bien comprendre pourquoi ils diffèrent tant, même pour deux pays ou régions qui ont des conditions pédoclimatiques voisines. L'enjeu est crucial, tant les résultats des travaux menés sur la sécurité alimentaire mondiale sont implicitement très dépendants des hypothèses faites sur les évolutions de ces coefficients. Le contexte, propice, notamment en Europe, au développement de cultures intermédiaires (dont certaines peuvent être récoltées à des fins de production d'énergie ou pour l'alimentation des animaux), invite également à une vigilance accrue sur les bases sur lesquelles sont construites les hypothèses d'évolution des intensités culturales.

Les connaissances portant sur **les fourrages**, en termes à la fois de surfaces consacrées, de rendements et d'utilisations par les différentes espèces animales, restent imparfaites et partielles, à nouveau en dépit des efforts de la communauté scientifique internationale pour améliorer la base de connaissances sur ce point. L'effort doit plus particulièrement porter sur

les prairies permanentes (surfaces toujours en herbe) et leurs rendements en herbe dans les différentes régions du globe, ceci dans un contexte où l'attention est souvent biaisée en faveur des « seules » terres cultivées alors que les besoins futurs de terres pour un usage agricole porteront aussi sur les prairies permanentes, de façon différenciée selon les régions du monde en fonction des rendements de ces dernières et des évolutions des régimes alimentaires.

De façon liée, le travail réalisé dans le cadre de cette étude a montré qu'il existait, dans plusieurs régions, des incohérences entre les niveaux des productions animales, les utilisations de produits agricoles pour l'alimentation du bétail et les surfaces requises à cette fin, notamment en termes de fourrages et plus spécifiquement encore de fourrages issus de surfaces toujours en herbe ; c'est le cas, par exemple, en Chine. Nous avons essayé de faire en sorte que les bilans ressources - emplois des différents fourrages soient cohérents, au prix d'hypothèses qu'il serait important de conforter par des études spécifiques.

Affiner la caractérisation des différents déterminants qui sous-tendent les évolutions des rendements

Les projections des rendements des cultures, y compris donc des fourrages cultivés, à l'horizon 2050, évoluent sous la double influence du changement climatique et des évolutions techniques, ces dernières elles-mêmes sous le jeu à la fois du progrès technique et du recours accru aux intrants.

Modèles mécanistes et approches ensemblistes[168] permettent de mesurer **les effets sur les rendements des cultures du changement climatique**, plus spécifiquement les effets des trois paramètres climatiques principaux que sont la concentration de l'atmosphère en CO_2, la température et la pluviométrie ; ils peinent à bien capturer et bien représenter les interactions entre ces trois paramètres. C'est sur la base d'une analyse quantitative de ces travaux que nous avons pu développer des modèles statistiques permettant de relier variations de rendements et variations des températures, des précipitations et de la concentration de l'atmosphère en CO_2. Ceci a pu être fait en distinguant les cultures en C3 *versus* en C4. Les informations disponibles font que l'équation statistique des cultures en C3 repose sur des travaux portant sur le blé (de façon plus importante en nombre de travaux), le riz et le soja, et que l'équation statistique des cultures en C4 repose exclusivement sur des travaux relatifs au maïs. Il s'agit là d'une limite importante, notamment quand ces équations sont utilisées pour estimer les effets du changement climatique sur les rendements à 2050 de cultures en C3 autres que le blé, le riz ou le soja, et des cultures en C4 autres que le maïs. Il s'agit d'une priorité de recherche pour, notamment, s'assurer de la robustesse de cette généralisation (extrapolation). Une priorité de recherche tout aussi essentielle a trait à l'expression au champ (*i.e.* dans la vie réelle) de l'effet CO_2, dans un contexte où, on l'a vu, la pleine valorisation de cet effet requiert des conditions de culture adaptées, notamment des apports en eau et en azote non limitants.

Concernant **les évolutions techniques**, il n'a pas été possible, dans le cadre de cette étude, de distinguer **les contributions respectives du progrès technique et du recours aux intrants**. Ceci est dommageable à deux titres au moins. En premier lieu, parce que les impacts des évolutions techniques sur l'environnement et la santé humaine ne seront pas identiques selon qu'elles résultent d'un progrès technique fort *versus* d'un recours augmenté aux intrants, en particulier quand ceux-ci sont des intrants chimiques. Ainsi, il est sans doute imprudent, voire trompeur, de prédire les impacts de ces évolutions techniques sur les émissions agricoles de gaz à effet de serre si les sources de ces évolutions ne sont pas précisées ; en d'autres termes, il est imprudent de se baser sur des coefficients d'émissions d'aujourd'hui extrapolés à 2050 (voire à 2100) sans tenir compte des évolutions des pratiques et des systèmes agricoles. En deuxième lieu, parce que les évolutions de ces pratiques et systèmes devraient être significatives à l'horizon 2050 au fur et à mesure que les progrès de la recherche, relayés par l'opinion publique, feront que les effets négatifs de la chimie sur la santé humaine et l'environnement seront de mieux en mieux connus et documentés ; au fur et à mesure aussi que les agriculteurs adapteront leurs pratiques et leurs systèmes au changement climatique et à ses effets. Il serait intéressant de poursuivre le travail ici présenté en développant de nouvelles simulations à l'horizon 2050 basées sur des jeux alternatifs de rendements se différenciant, non seulement par des hypothèses alternatives quant aux ampleurs des évolutions techniques, mais également en fonction des contributions relatives du progrès technique et du recours aux intrants (et à quels intrants et sous quelles modalités) à ces évolutions techniques de sorte qu'il soit aussi possible d'en évaluer les conséquences sur l'environnement et la santé humaine.

Quantifier l'ensemble des performances des systèmes de culture agro-écologiques

Les modèles de culture peuvent prendre en charge des adaptations incrémentales simples, par exemple des changements des dates ou des densités de semis, des modifications des pratiques d'irrigation ou de fertilisation, etc. Par contraste, ces

[168] Approches recourant à l'utilisation conjointe de plus modèles de façon à réduire les incertitudes.

modèles, même quand ils fonctionnement à l'échelle d'une succession de cultures, restent limités dans leurs capacités à prédire les rendements dans des systèmes à bas niveaux d'intrants chimiques (par exemple, sans ou avec peu de pesticides de synthèse), à travail du sol réduit ou encore à forte diversité intra- ou interspécifique (*via*, par exemple, la mise en place de cultures associées ou de mélanges variétaux). Par suite, c'est essentiellement par le biais de comparaisons et de méta-analyses que les chercheurs essayent d'apprécier les performances agronomiques, environnementales et économiques, de systèmes agricoles se différenciant par leurs modes de production. Il est difficile, sur la base des connaissances actuelles, de prédire ce que seront ces performances à l'horizon 2050, non seulement en moyenne mais aussi en termes de résilience, c'est-à-dire de capacité à faire face aux variations, y compris des variations extrêmes, des paramètres climatiques. Il s'agit là d'une priorité de recherche dans le contexte où la transition agro-écologique des agricultures européennes et mondiales est une nécessité (sur la base de points de départ très différents selon les régions du monde) et dans la perspective où il s'agit de transformer les promesses de cette transition en réalité. Il n'est pas avéré que cette transition soit systématiquement gagnante dans toutes les dimensions du développement durable (environnement, économie, social, santé). Le besoin de recherche se situe ici aussi bien en amont des modèles, notamment en termes de connaissances des processus (biologiques, physiques, etc.) à l'œuvre dans les systèmes agro-écologiques, que dans la traduction de ces résultats d'amont dans les modèles (ajout de modules permettant d'analyser l'ensemble des performances, calibrage des paramètres, etc.). Le besoin de recherche se situe également dans le champ des sciences économiques et sociales, priorité devant ici être donnée à identifier les freins à la transition (plus spécifiquement à les quantifier et à les hiérarchiser dans un contexte où leurs importances respectives varient selon les productions, les régions et les agriculteurs) et à la mise en œuvre de politiques publiques efficaces permettant de desserrer ces freins.

Acquérir des connaissances sur les autres sources d'incertitude

Les besoins prioritaires de recherche couvrent naturellement les autres sources majeures d'incertitude qui n'ont pas pu être prises en compte dans l'analyse et qui ont été détaillées dans la Sous-Section 8.2.2., en particulier (i) **les bioagresseurs** en termes de développement et d'impacts sur les récoltes (pertes) et (ii) **la qualité nutritionnelle des produits récoltés** et l'impact du changement climatique sur celle-ci.

La difficulté à prendre en compte les **stress biotiques** a été soulignée dans la littérature. Des cadres théoriques d'analyse ont été proposés (Donatelli *et al.*, 2017). Leur opérationnalité à large échelle, pour l'ensemble des cultures dans l'ensemble des régions, est un défi. Il est plus que probable qu'il ne soit pas possible d'utiliser des approches statistiques comme cela a pu être fait pour les stress abiotiques et, par suite, que la solution passe par le développement de modèles associant différentes situations biotiques de production à des profils de dégâts et de dommages. Il s'agit là d'un champ entier de recherches uniquement en émergence.

Il en est de même des travaux visant à apprécier les impacts du changement climatique sur la **qualité nutritionnelle des produits**. Il s'agit ici de mieux comprendre les mécanismes écophysiologiques par lesquels les différents paramètres du changement climatique et leurs interactions peuvent influencer la qualité des produits récoltés (teneurs en nutriments, micronutriments, vitamines, etc.) en allant au-delà de l'effet de dilution lié à l'augmentation des rendements du fait d'une augmentation de la concentration de l'atmosphère en CO_2. Il s'agit aussi d'analyser dans quelle mesure l'exploitation de la diversité génétique intra- et interspécifique et/ou le recours à des pratiques agricoles correctrices permettraient de pallier, et à quelle hauteur, la possible baisse de la qualité des produits agricoles, y compris les fourrages cultivés et ceux issus des prairies permanentes. On comprend aisément l'acuité de la question, ceci parce que satisfaire les besoins alimentaires des populations en 2050 et au-delà nécessiterait d'autant plus de surfaces et de disponibilités que la qualité nutritionnelle des produits agricoles diminuerait sous l'effet du changement climatique, toutes choses égales par ailleurs.

Les disponibilités en eau à l'horizon 2050 conditionneront les rendements qu'il sera possible d'atteindre à cette date, rendements des cultures pluviales et rendements des cultures irriguées *via* l'efficience de l'irrigation. Ces disponibilités conditionneront aussi les surfaces qu'il sera possible d'irriguer dans les différentes régions du monde, question qui requiert de prendre en compte les autres usages de l'eau que le seul usage agricole. Dans un modèle de bilan comme celui utilisé dans cette étude, il serait intéressant (sous réserve de disposer des données permettant de le faire) d'élargir à d'autres régions du monde que les seules régions européennes l'analyse de sensibilité développée dans le Chapitre 7 relative à un impact possiblement plus fort des stress hydriques pendant les phases de plus forte croissance des plantes.

Terminons cette liste (déjà longue) des recherches qu'il serait nécessaire de développer par quelques mots sur **le cadre de modélisation** lui-même. Il est tentant de conclure qu'il serait nécessaire d'inclure explicitement les comportements des acteurs, vis-à-vis de l'offre (agriculteurs) comme de la demande (les différents usagers, y compris les éleveurs), et la variable

principale qui détermine ces comportements, à savoir les prix potentiellement influencés par les politiques publiques jouant non seulement sur les offres et les demandes, mais aussi sur les échanges. En pratique, les modèles de bilan et les modèles économiques ont tous deux des avantages et des inconvénients et par suite, ils apportent des éclairages complémentaires pour mieux appréhender ce que pourrait être l'équation alimentaire mondiale, différenciée régionalement, à l'horizon 2050 et au-delà dans un contexte de changement climatique. Dans les deux cas, les pistes de recherche proposées ci-dessus doivent aider à mieux définir les relations entre variables, à mieux calibrer les paramètres définissant ces relations et à mieux justifier les hypothèses sous-tendant les différents scénarios analysés.

Références citées dans le rapport de synthèse

Abdala L.J., Vitantonio-Mazzini L.N., Gerde J.A., Ribes F.M., Murtagh G., Borras L. (2018). Dry milling grain quality changes in Argentinean maize genotypes released from 1965 to 2016. Field Crops Res. 226: 74-82.

Acreche MM, Briceno-Felix G, Sanchez JAM, Slafer GA (2008) Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. Eur J Agron 28:162-170

Ahrends H.E., Eugster W., Gaiser T., Rueda-Ayala V., Huging H., Ewert F., Siebert S. (2018). Genetic yield gains of winter wheat in Germany over more than 100 years (1895-2007) under contrasting fertilizer applications. Environ. Res. Lett. 13, 104003.

Alexandratos N., Bruinsma J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome: FAO.

Allen M.R., Dube O.P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K. (2018). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Allen L.H, Kimball B.A., Bunce J.A., Yoshimoto M., Harazono Y., Baker J.T., Boote K.J., White J.W. (2020). Fluctuations of CO2 in Free-Air CO2 Enrichment (FACE) depress plant photosynthesis, growth, and yield. Agricultural and Forest Meteorology. 284, 107899.

Asseng S., Ewert F., Rosenzweig C., Jones J. W., Hatfield J. L., Ruane A. C., Boote K. J., Thorburn P. J., Rötter R. P., Cammarano D., Brisson N., Basso B., Martre P., Aggarwal P. K., Angulo C., Bertuzzi P., Biernath C., Challinor A. J., Doltra J., Gayler S., Goldberg R., Grant R., Heng L., Hooker J., Hunt L. A., Ingwersen J., Izaurralde R. C., Kersebaum K. C., Müller C., Naresh Kumar S., Nendel C., O'Leary G., Olesen J. E., Osborne T. M., Palosuo T., Priesack E., Ripoche D., Semenov M. A., Shcherbak I., Steduto P., Stöckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F., Travasso M., Waha K., Wallach D., White J. W., Williams J. R., J. Wolf (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change, 3(9), pp.827–832.

Asseng S, Martre P, Maiorano A, Rötter RP, O'Leary GJ, Fitzgerald GJ, Girousse C, Motzo R, Giunta F, Babar MA, Reynolds MP, Kheir AMS, Thorburn PJ, Waha K, Ruane AC, Aggarwal PK, Ahmed M, Balkovič J, Basso B, Biernath C, Bindi M, Cammarano D, Challinor AJ, De Sanctis G, Dumont B, Eyshi Rezaei E, Fereres E, Garcia-Vila M, Gayler S, Gao Y, Horan H, Hoogenboom G, Izaurralde RC, Jabloun M, Jones CD, Kassie BT, Kersebaum KC, Klein C, Koehler AK, Liu B, Minoli S, Montesino San Martin M, Müller C, Naresh Kumar S, Nendel C, Olesen JE, Palosuo T, Porter JR, Priesack E, Ripoche D, Semenov MA, Stöckle C, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Van der Velde M, Wallach D, Wang E, Webber H, Wolf J, Xiao L, Zhang Z, Zhao Z, Zhu Y, Ewert F (2018). Climate change impact and adaptation for wheat protein. Global Change Biology 25: 155-173.

Bahrami H., De Kok L.J., Armstrong R., Fitzgerald G.J., Bourgault M., Henty S., Tausz M., Tausz-Posch S. (2017). The proportion of nitrate in leaf nitrogen, but not changes in root growth, are associated with decreased grain protein in wheat under elevated [CO2]. J. Plant Physiol. 3216: 44–51.

Barrett P.D., Laidlaw A.S., Mayne C.S. (2005). GrazeGro: a European herbage growth model to predict pasture production in perennial ryegrass swards for decision support. European Journal of Agronomy, 23 (1), 37-56.

Bassu S. Brisson N, Durand JL, Boote K, Lizaso J, Jones JW, Rosenzweig C, Ruane AC, Adam M, Baron C, Basso B, Biernath C, Boogaard H, Conijn S, Corbeels M, Deryng D, De Sanctis G, Gayler S, Grassini P, Hatfield J, Hoek S, Izaurralde C, Jongschaap R, Kemanian AR, Kersebaum KC, Kim SH, Kumar NS, Makowski D, Müller C, Nendel C, Priesack E, Pravia MV, Sau F, Shcherbak I, Tao F, Teixeira E, Timlin D, Waha K. (2014). How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? Global Change Biology, 20(7), pp.2301–2320.

Beche E., Benin G., da Silva C.L., Munaro L.B., Marchese J.A. (2014). Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. Eur. J. Agron. 61: 49-59.

Beets W.C. (1982). Multiple cropping and tropical farming systems. Aldershot, UK: Gower.

Ben-Ari T., Boé J., Ciais P., Lecerf R., Van der Velde M., Makowski D. (2018). Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. Nat Comm.

Benton T.G., Vickery J.A., Wilson J.D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? Trends in Ecology and Evolution 18, 182-188.

Bindi M., Olesen J.E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. Reg. Environ. Chang. 11: 151–158.

Bishop K.A., Betzelberger A.M., Long S.P., Ainsworth E.A. (2015). Is There Potential to Adapt Soybean (Glycine Max Merr.) to Future [CO2]? An Analysis of the Yield Response of 18 Genotypes in Free-Air CO2 Enrichment. Plant, Cell & Environment, 38, 1765-1774.

Bouwman A.F., Van der Hoek K.W., Eickhout B., Soenario I. (2005). Exploring changes in world ruminant production systems. Agricultural Systems, 84(2):121.

Bradford M.A., Wieder W.R., Bonan G.B., Fierer N., Raymond P.A. (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to Climate Change. Nature Climate Change 6: 751-758.

Bren d'Amour C., Reitsma F., Baiocchi G., Barthel S., Güneralp B., Erb K-H, Haberl H., Creutzig F., Seto K.C. (2017). Future urban land expansion and implications for global croplands. PNAS 114 (34) 8939–8944.

Challinor A., Watson J., Lobell D., Howden M., Smith D., Chhetri N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nat. Clim. Chang. 4: 287–291.

Chen K., Camberato J.J., Tuinstra M.R., Kumudini S.V., Tollenaar M., Vyn T.J. (2016). Genetic improvement in density and nitrogen stress tolerance traits over 38 years of commercial maize hybrid release. Field Crops Res. 196: 438-451

Cormier F., Faure S., Dubreuil P., Heumez E., Beauchêne K., Lafarge S., Praud S., Le Gouis J. (2013). A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (Triticum aestivum L.). Theor. Appl. Genet. 126: 3035-3048.

Deinum B., Van Es A.J.H., van Soest P.J. (1968). Climate, nitrogen and grass. 2. The influence of light intensity, temperature and nitrogen on vivo digestibility of grass and the prediction of these effects from some chemical procedures. Netherlands Journal of Agricultural Science, 16, 217-223.

Dellar M., Topp C.F.E., Banos G., Wall E. (2018). A meta-analysis on the effects of climate change on the yield and quality of European pastures. Agriculture, Ecosystems & Environment 1 October 2018: 413-420.

Dent D., Cocking E. (2017). Establishing symbiotic nitrogen fixation in cereals and other non-legume crops: The Greener Nitrogen Revolution. Agriculture & Food Security 6, 7.

Di Matteo J.A., Ferreyra, J.M., Cerrudo A.A., Echarte L., Andrade F.H. (2016). Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. Field Crops Res. 197: 107-116.

Donatelli M., Srivastava A.K., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. Environ. Res. Lett. 10, 075005.

Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willocquet L., Whish J.P.M., Savary, S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. Agricultural Systems 155, 213–224

Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

Dumont B., Andueza D., Nikerdon V., Lüscher A., Porqueddu C., Picon-Cochard C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. Grass Forage Science 70: 239-254.

Durand JL, Delusca K, Boote K, Lizaso J, Manderscheid R, Weigel HJ, Ruane AC, Rosenzweig C, Jones J, Ahuja L, Anapalli S, Basso B, Baron C, Bertuzzi P, Biernath C, Deryng D, Ewert F, Gaiser T, Gayler S, Heinlein F, Kersebaum KC, Kim SH, Muller C, Nendel C, Olioso A, Priesack E, Villegas JR, Ripoche D, Rotter RP, Seidel EI, Srivastava A, Tao F, Timlin D, Twine T, Wang E, Webber H, Zhao Z (2018). How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO2 concentration levels with limited water supply on water use and yield? European Journal of Agronomy 100, 65-75.

Dury S., Bendjebbar P., Hainzelin E., Giordano T., Bricas N. (eds), (2019). Food Systems at risk: new trends and challenges. Rome, Montpellier, Brussels, FAO, CIRAD and European Commission

European Commission (2013). The impact of EU consumption on deforestation: comprehensive analysis of the impact of EU consumption on deforestation. Technical Report - 2013 – 063. Brussels: European Commission.

European Commission (2017). EU agricultural outlook for markets and income, 2017-2030. European Commission, DG Agriculture and Rural Development, Brussels.

European Commission (2018). Agri-Food trade in 2017: another record year for EU-agri-food trade, Monitoring Agri-Trade Policy, MAP 2018-1.

European Commission (2019a). Statistics Explained "Extra-EU trade in agricultural goods", mars 2019.

European Commission (2019b). Intra-EU trade in goods - main features. Data from September 2019. Statistics explained. European Commission 2019. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Intra-EU_trade_in_goods_-_main_features

European Environment Agency (2017a). Food in a green light – A systems approach to sustainable food, EEA Report No 16/2017, European Environment Agency.

European Environment Agency (2017b). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 419 p.

European Environment Agency (2019). Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 108 p.

FAO (1996). Agro-ecological zoning: Guidelines. Soil Resources, n° 73, FAO, Roma, Italy, 81 pages.

FAO (2011). Global food losses and food waste – extent, causes and prevention. FAO, Rome

FAO (2018). The Future of Food and Agriculture. Alternative Pathways to 2050. FAO: Rome, 224 p.

FAO/IIASA (2011-2012). Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0). FAO, Rome, Italy and IIASA, Luxemburg, Austria, 196 p. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gaez/docs/GAEZ_Model_Documentation.pdf

Féménia F., Gouel C. (2016). Volatilité des cours des commodités agricoles et politiques de stabilisation. Inra Sciences Sociales, 2016 :1-2, 5 p.

Fischer G., Shah M.M., Van Velthuizen H.T. (2002). Climate change and agricultural vulnerability. IIASA, Laxenburg, Austria, 162 pages.

Fischer G, Hizsnyik E, Prieler S, Wiberg D. (2010). Scarcity and abundance of land resources: competing uses and the shrinking land resource base. SOLAW Background Thematic Report. TR02 - FAO. 58p.

Fischer G., Hizsnyik E., Prieler S., van Velthuizen H., Wiberg, D. (2012). Scarcity and abundance of land resources: competing uses and the shrinking land resource base. In: Worlds Within Reach: From Science To Policy - IIASA 40th Anniversary Conference, 24-26 October 2012, Hofburg Congress Center, Vienna and IIASA, Laxenburg, Austria.

Flohr BM, Hunt JR, Kirkegaard JA, Evans JR, Swan A, Rheinheimer B (2018). Genetic gains in NSW wheat cultivars from 1901 to 2014 as revealed from synchronous flowering during the optimum period. Eur J Agron 98:1-13

Fox NJ, White PCL, McClean CJ, Marion G, Evans A, Hutchings MR (2011). Predicting Impacts of Climate Change on Fasciola hepatica Risk. Plos One 6(1): e16126.

Fox N.J., Marion G., Davidson R.S., White P.C.L., Hutchings M.R. (2015). Climate-driven tipping-points could lead to sudden, high-intensity parasite outbreaks. Roy. Soc. Open Sci. 2(5): 140296.

GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Gouache D., Le Bris X., Bogard M., Deudon O., Page C., Gate P. (2012). Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. Eur. J. Agron. 39: 62-70

Graybosch R.A., Peterson C.J. (2012) Specific adaptation and genetic progress for grain yield in Great Plains hard winter wheats from 1987 to 2010. Crop Sci. 52: 631-643.

Gummadov N, Keser M, Akin B, Cakmak M, Mert Z, Taner S, Ozturk I, Topal A, Yazar S, Morgounov A (2015). Genetic gains in wheat in Turkey: Winter wheat for irrigated conditions. Crop Journal 3:507-516

Hasegawa T., Li T., Yin X. Y., Zhu Y., Boote K., Baker J., Bregaglio S., Buis S., Confalonieri R., Fugice J., Fumoto T., Gaydon D., Kumar S.N, Lafarge T., Marcaida M., Masutomi Y., Nakagawa H., Oriol P., Ruget F., Singh U., Tang L., Tao F., Wakatsuki H., Wallach D., Wang Y., Wilson L.T., Yang L., Yang Y., Yoshida H., Zhang Z., Zhu J. (2017). Causes of variation among rice models in yield response to CO2 examined with Free-Air CO2 Enrichment and growth chamber experiments. Scientific Reports 7, 13.

Hasagawa T, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Wakatsuki H, Katayanagi N, Matsunami T, Kaneta Y, Sato T, Takakai F, Sameshima R, Okada M, Mae T, Makino A. (2013). Rice cultivar responses to elevated CO2 at two free-air enrichment sites in Japan. Funct Plant Biol, 40:148-159.

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, PNAS 110 (52) 20888-20893

Hulme P.E. (2017). Climate change and biological invasions: evidence, expectations, and response options Biol. Rev. 92, pp. 1297–1313

Hummel M., Hallahan B.F., Brychkova G., Ramirez-Villegas J., Guwela V., Chataika B., Curley E., McKeown P.C., Morrison L., Talsma E.F., Beebe S., Jarvis A., Chirwa R., Spillane C. (2018). Reduction in nutritional quality and growing area suitability of common bean under climate change induced drought stress in Africa. Sci. Rep. 8: 16187.

IFIP (2018). GTE : Evolution des résultats moyens nationaux - naisseurs-engraisseurs. https://www.ifip.asso.fr/fr/resultats-economiques-gttt-graphique.html

INRA-DEPE, 2018. Principes et conduite des expertises et des études scientifiques collectives menées pour éclairer les politiques et le débat public. Paris : INRA, Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Études, 49 p.

International Energy Agency (2016). World Energy outlook 2016. OECD/IEA, 2016. www.worldenergyoutlook.org.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, forestry and other land use; Emissions for livestock and manure management, 4, Chap. 10, 87 pp.

IPCC (2019). Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

ITAVI (2017a). Performances techniques et coûts de production en volailles de chair, Résultats 2016, Octobre 2017.

ITAVI (2017b). Performances techniques et coûts de production en poulettes et poules pondeuses, Résultats 2016, Octobre 2017.

Iizumi, T., Shiogama H., Imada Y., Hanasaki N., Takikawa H., Nishimori M. (2018). Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels. Int. J. Climatol., doi:10.1002/joc.5818.

Jia, G., E. Shevliakova, P. Artaxo, N. De Noblet-Ducoudré, R. Houghton, J. House, K. Kitajima, C. Lennard, A. Popp, A. Sirin, R. Sukumar, L. Verchot (2019). Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

Kenyon F, Sargison ND, Skuce PJ, Jackson F (2009). Sheep helminth parasitic disease in south eastern Scotland arising as a possible consequence of climate change. Veterinary Parasitology 163, 293-297.

Key N, Sneeringer S (2014). Potential Effects of Climate Change on the Productivity of U.S. Dairies. American Journal of Agricultural Economics 96, 1136-1156.

Kimball B. A. (2016). Crop responses to elevated CO2 and interactions with H2O, N, and temperature. Current opinion in plant biology, 31, 36-43.

King M., Altdorff D., Li P., Galagedara L., Holden J., Unc A. (2018). Northward shift of the agricultural 21th-century global climate change. Scientific Reports 8:7904.

Koester R.P., Skoneczka J.A., Cary T.R, Diers B.W., Ainsworth E.A. (2014). Historical gains in soybean (Glycine max Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. J. Exp. Bot. 65: 3311–3321.

Lacetera N. (2019). Impact of climate change on animal health and welfare. Animal Frontiers, 9(1): 26-31.

Lacroix D., Mora O., Menthière N. de, Béthinger A. (2019). La montée du niveau de la mer : conséquences et anticipations d'ici 2100, l'éclairage de la prospective. Rapport du GT Prospective au Conseil d'AllEnvi, 167 p. disponible sur www.allenvi.fr

Laidig F., Piepho H.-P., Drobek T., Meyer U. (2014). Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. Theor. Appl. Genet. 127: 2599-2617.

Le Mouël 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 Mouël C., de Lattre-Gasquet M., Mora O. (eds) (2018). Land Use and Food Security in 2050: A Narrow Road. Agrimonde-Terra. Versailles (France) : Editions Quae. 398 p. (Matière à Débattre et Décider).

Le Mouël C., Schmitt B. (eds) (2018). Food Dependency in the Middle East & North Africa Region. Retrospective Analysis and Projections to 2050. Quae-Springer, 123 p.

Li FY, Newton PCD, Lieffering M (2014). Testing simulations of intra- and inter-annual variation in the plant production response to elevated CO2 against measurements from an 11-year FACE experiment on grazed pasture. Global Change Biology 20:228-239.

Lipinski B., Hanson G., Lomax J., Kitinoja L., Waite R., Searchinger T. (2013). Reducing Food Loss and Waste. Working Paper, Installment 2 of Creating a Sustainable Food Future, World Resources Institute, Washington D.C., 40 p. Available online at http://www.worldresourcesreport.org

Lorenz K., Lal R. (2016). Soil Organic Carbon – An Appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework? (S. M. Starke & K. Ehlers, Eds.). Retrieved from http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

Lo Valvo P.J., Miralles D.J., Serrago R.A. (2018). Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: changes in physiological and numerical yield components. Field Crops Res. 221: 314-321.

Mackay I, Horwell A, Garner J, White J, McKee J, Philpott H (2011). Reanalyses of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. Theoretical and Applied Genetics 122:225-238

Makowski D., Marajo-Petitzon E., Durand J-L., Ben-Ari T. (*in press*). Quantitative synthesis of temperature, CO2, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. European Journal of Agronomy.

Mbow C., C. Rosenzweig, L.G. Barioni, T.G. Benton, M. Herrero, M. Krishnapillai, E. Liwenga, P. Pradhan, M.G. Rivera-Ferre, T. Sapkota, F.N. Tubiello, Y. Xu (2019). Food Security. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. *In press*.

Medek D.E., Schwartz J., Myers S.S. (2017). Estimated effects of future atmospheric CO2 concentrations on protein intake and the risk of protein deficiency by country and region. Environ. Health Perspect. 125: 087002.

Meuwissen T.H.E., Hayes B.J., Goddard M.E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. Genetics 157: 1819-1829.

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, GB1022.

Mora O. (2018). Dietary Changes, Nutrition Transition and the Future of Global Diets. In: Le Mouël C., de Lattre-Gasquet M., Mora P. (eds), Land Use and Food Security in 2050: A Narrow Road. Agrimonde-Terra. Versailles: Editions Quae, pp. 113-137.

Morgan JA, LeCain DR, Pendall E, Blumenthal DM, Kimball BA, Carrillo Y, Williams DG, Heisler-White J, Dijkstra FA, West M. (2011). C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. Nature, 476: 202-206. 35.

Mühleisen J., Piepho H., Maurer H., Longin C., Reif J. (2014). Yield stability of hybrids versus lines in wheat, barley and triticale. Theor. Appl. Genet. 127: 309-316.

Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J., Carlisle E., Dietterich L.H., Fitzgerald G., Hasegawa T., Holbrook N.M., Nelson R.L., Ottman M.J., Raboy V., Sakai H., Sartor K.A., Schwartz J., Seneweera S., Tausz M., Usui Y. (2014). Increasing CO2 threatens human nutrition. Nature, 510:139-142.

Myers S.S., Wessells K.R., Kloog I., Zanobetti A., Schwartz J. (2015). Effect of increased concentrations of atmospheric carbon dioxide on the global threat of zinc deficiency: a modelling study. Lancet Glob. Health 3: e639–45.

Newberry F., Qi A., Fitt B. D. (2016). Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. Current Opinion in Plant Biology 32, 101-109.

OCDE/FAO (2018). OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, Éditions OCDE, Paris/FAO, Rome, https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en

O'Leary G.J., Christy B., Nuttall J., Huth N., Cammarano D., Stöckle C., Basso B., Shcherbak I., Fitzgerald G., Luo Q.Y., Farre-Codina I., Palta J., Asseng S. (2015). Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO2 under a Free-Air CO2 Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. Global Change Biology 21, 2670-2686.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision. https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/

Parent B., Leclere M., Lacube S., Semenov M.A., Welcker C., Martre P., Tardieu F. (2018). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. Proc. Natl. Acad. Sci. 115: 10642-10647.

Popp A., Calvin K., Fujimori S., Havlik P., Humpenöder F., Stehfest E., Bordirky B.L., Dietrich J.P., Doelmann J.C., Gusti M., Hasegawa T., Kyle P., Obersteiner M., Tabeau A., Takahashi K., Valin H., Waldhoff S., Weindl I., Wise M., Kriegler E., Lotze-Campen H., Fricko O., Riahi K., van Vuuren D.P. (2017). Land-use futures in the shared socio-economic pathways. Global Environmental Change, 42: 331–345.

Porter J.R., Xie L., Challinor A.J., Cochrane K., Howden S.M., Iqbal M.M., Lobell D.B., Travasso M.I. (2014). Food security and food production systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 485-533.

Puissant J., Mills R.T.E., Robroek B.J.M., Gavazov K., Perrette Y., De Danieli S., Spiegelberger T., Buttler A., Brun J-J., Cécillon L. (2017). Climate change effects on the stability and chemistry of soil organic carbon pools in a subalpine grassland. Biogeochemistry, 132 (1-2). 123-139.

Purse BV, Mellor PS, Rogers DJ, Samuel AR, Mertens PP, Baylis M. (2005). Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. Nature Reviews Microbiology 3, 171-181.

Ramankutty N, Foley JA, Norman J, Mcsweeney K (2002). The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. Global Ecology & Biogeography 11, 377– 392

Ray D.K., Foley J.A. (2013). Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. Environmental Research Letters 8 044041.

Raymundo R., Asseng S., Robertson R., Petsakos A., Hoogenboom G., Quiroz R.,Hareau G., Wolf J. (2018). Climate change impact on global potato production. European Journal of Agronomy, 100, 87-98.

Reilly M., Willenbockel D. (2010). Managing uncertainty: a review of food system scenario analysis and modelling. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences 365: 3049–3063.

Renaudeau D, Gourdine JL, St-Pierre NR (2011). A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs. Journal of Animal Science 89, 2220-2230.

Rife T.W., Graybosch R.A., Poland J.A. (2019). A field-based analysis of genetic improvement for grain yield in winter wheat cultivars developed in the US Central Plains from 1992 to 2014. Crop Sci. 59: 905-910.

Robertson M., Kirkegaard J., Rebetzke G., LLewellyn R., Wark T. (2016). Prospects for yield improvement in the Australian wheat industry: a perspective. Food and Energy Security 5: 107–122

Rojas M., Lambert F., Ramirez-Villegas J., Challinor A. (2019). Emergence of robust precipitation changes across crop production areas in the 21st century. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 116:6673-6678.

Rose H, Wang T, van Dijk J, Morgan ER (2015). GLOWORM-FL: A simulation model of the effects of climate and climate change on the free-living stages of gastro-intestinal nematode parasites of ruminants. Ecological Modelling 297, 232-245.

Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), 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.

Sadras V.O., Lawson C. (2011). Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. Crop Past. Sci. 62: 533-549.

Scasta JD, Talley JL, Engle DM, Debinski DM. (2017). Climate Extremes, Vegetation Change, and Decoupling of Interactive Fire-Grazing Processes Exacerbate Fly Parasitism of Cattle. Environmental Entomology 46, 191-200.

Scheelbeek P.F.D., Bird F.A., Tuomisto H.L., Gree R., Harris F.B., Joy E.J.M., Chalabi Z., Allen E., Haines A., Dangour A.D. (2018). Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. Proc. Natl. Acad. Sci. 115: 6804-6809.

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. World Resource Institute (WRI), Synthesis Report, 96 p.

Steduto P., Hisao T.C., Fereres E., Raes D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Rome, FAO

Smith S., Cooper M., Gogerty J., Loffler C., Borcherding D., Wright K. (2014). Maize. In S. Smith, B. Diers, J. Specht, & B. Carver (Eds.), Yield gains in major U.S. field crops: CSSA Special Publication 33 (Chapter 6, pp. 125-172). Madison, WI: Crop Science Society of America (CSSA)

St-Pierre NR, Cobanov B, Schnitkey G (2003). Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries. Journal of Dairy Science 86, E52-E77.

Tibi A., Therond O. (2018). Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles. Évaluer et caractériser. Versailles (France) : Editions Quae. 133 p. (Matière à Débattre et Décider).

Touzy G, Rincent R, Bogard M, Lafarge S, Dubreuil P, Mini A, Deswarte J-C, Beauchene K, Le Gouis J, Praud S (2019). Identifying drought tolerance specific QTLs in bread wheat (T. aestivum L.) using environmental clustering. Theoretical and Applied Genetics 132:2859-2880

West, J.S., J.A. Townsend, M. Stevens, B.D.L Fitt. (2012). Comparative biology of different plant pathogens to estimate effects of climate change on crop diseases in Europe. European Journal of Plant Pathology 133, 315-331.

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.

Wilbois KP, Schmidt JE (2019). Reframing the debate surrounding the yield gap between organic and conventional farming. Agronomy 2019, 9, 82.

Wilson A, Mellor P (2008). Bluetongue in Europe: vectors, epidemiology and climate change. Parasitology Research 103, S69-S77.

Wolf J, Van Oijen M (2003). Model simulation of effects of changes in climate and atmospheric CO2 and O3 on tuber yield potential of potato (cv. Bintje) in the European Union. Agriculture, Ecosystems and Environment 94:141-157.

Wu W., Li C.J., Ma B.L., Shah F., Liu Y., Liao Y.C. (2014). Genetic progress in wheat yield and associated traits in China since 1945 and future prospects. Euphyt. 196: 155-168.

Wu W., You L., Chen K.Z. (2015). Cropping intensity gaps: the potential for expanded harvested area. IFPRI Discussion Papers, n° 01459, Washington D.C.

Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. (2014). Global Agricultural Land Resources – A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. PLoS ONE 9(9): e107522.

Zhu G., Peng S., Huang J., Cui K., Nie L., Wang F. (2016). Genetic improvements in rice yield and concomitant increases in radiation- and nitrogen-use efficiency in middle reaches of Yangtze River. Sci. Rep. 6, 21049.

Zhu C., Kobayashi K., Loladze I., Zhu J., Jiang Q., Xu X., Liu G., Seneweera S., Ebi K.L., Drewnowski A., Fukagawa N.K., Ziska L.H. (2018). Carbon dioxide (CO2) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries. Sci. Adv. 4, eaaq1012.

Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études
147, rue de l'Université
75007, Paris
Tél. : +33(0) 1 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :

https://www.inrae.fr/collaborer/expertise-appui-aux-politiques-publiques

https://www.inrae.fr/actualites/agricultures-europeennes-horizon-2050

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Pluriagri