

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

Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale

Méthodologies de projection des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 à l'horizon 2050
Rapport technique 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, INRAE, Directeur de la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE)

Le présent document a été élaboré dans le cadre d'une Étude réalisée à la demande et grâce au soutien de l'association Pluriagri. Cette Étude 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 technique sur les méthodologies de projection des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 à l'horizon 2050

Février 2020

Auteurs principaux : Agneta Forslund, Elodie Marajo-Petitzon, Anaïs Tibi, Hervé Guyomard, Bertrand Schmitt

Co-auteurs : Jacques Agabriel, Ludovic Brossard, Jean-Yves Dourmad, Yves Dronne, Philippe Faverdin, Michel Lessire, Serge Planton, Philippe Debaeke

Pour citer ce document :

Forslund A, Marajo-Petitzon E, Tibi A, Guyomard H, Schmitt B (coordinateurs), Agabriel J, Brossard L, Dourmad J-Y, Dronne Y, Faverdin P, Lessire M, Planton S, Debaeke P (2020) Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire. Rapport technique sur les démarches adoptées pour projeter à l'horizon 2050 les variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050, Inrae (France), 218 p.

Sommaire

Introduction 4

Composition du groupe de travail 6

Chapitre 1. Cadrage méthodologique 8

1.1. Découpage géographique de l'Europe et du reste du Monde 8

1.2. Informations nécessaires à la simulation de scénarios à l'aide du modèle GlobAgri-AE2050 10

1.2.1. Le modèle GlobAgri-AE2050 en un clin d'œil 10

1.2.2 Intégration des données sur l'irrigation dans GlobAgri-AE2050 14

Chapitre 2. La croissance démographique 32

Chapitre 3. L'évolution des régimes alimentaires 36

3.1. Évolutions passées et situation actuelle 36

3.2. Une évolution tendancielle des régimes alimentaires à l'horizon 2050 : la mobilisation des projections Alexandratos et Bruinsma (2012) 37

3.3. Une évolution des régimes alimentaires dans un sens plus favorable à la santé à l'horizon 2050 : l'adaptation des hypothèses du régime « Healthy » d'Agrimonde-Terra 37

3.4. Comparaison des régimes « 2010 », 2050 « tendanciels » et 2050 « sains » 42

3.4.1. Comparaison des apports caloriques 42

3.4.2. Comparaison de la structure des régimes 43

3.5. Bilan : évolution de la demande alimentaire mondiale à l'horizon 2050 50

Chapitre 4. Usages non alimentaires des productions agricoles : intégration des biocarburants dans GlobAgri-AE2050 pour l'ensemble des régions 54

4.1. Quantification des usages de produits agricoles pour la production de biocarburants en « 2010 » 54

4.1.1. La production d'éthanol et de biodiesel par région AE2050 en « 2010 » 54

4.1.2. Les matières premières agricoles utilisées dans la production d'éthanol et de biodiesel en « 2010 » 55

4.2. Élaboration des projections des usages de matières premières pour biocarburants à 2050 55

4.2.1. Hypothèses tirées des perspectives pour l'Europe (CE, 2017) 56

4.2.2. Hypothèses tirées des perspectives pour les autres régions du monde (OCDE/FAO, 2018) 57

4.2.3. Évolution des volumes de production de biocarburants dans AE2050 57

4.2.4. Évolution de la part des matières premières impliquées dans la production de biocarburants 60

4.2.5. Remarques liées aux matières premières dites de seconde génération 62

4.3. Les hypothèses retenues pour les usages non-alimentaires hors biocarburants 63

4.3.1. Comparaison avec d'autres sources : PSD-USDA et OCDE-FAO 63

4.3.2. Proposition de correction des usages d'huiles végétales dans GlobAgri-AE2050 64

Annexes du Chapitre 4 66

Chapitre 5. Projections à 2050 des rendements moyens des cultures sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques 69

5.1. Effets du changement climatique en 2050 sur les rendements végétaux 69

5.1.1. Caractérisation du climat en 2050 sous changement climatique « tendanciel » et sous changement climatique « aggravé » dans les 21 régions de l'étude 69

5.1.2. Modèles d'effets du changement climatique sur les rendements végétaux établis par analyse quantitative dans le cadre de l'étude AE2050 (Makowski *et al.*, *in press*) 72

5.2. Effets des évolutions techniques en 2050 sur les rendements végétaux 76

5.2.1. Projection des rendements 2050 à partir du rapport Alexandratos et Bruinsma (2012) 76

5.2.2. Les évolutions des rendements végétaux dans le rapport FAO (2018) 80

5.2.3. Comparaison des différents modes de projection des effets des évolutions techniques 83

5.3. Projections de rendements en 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques : comparaison et sélection pour les scénarios de référence 88

5.4. Projections de rendements utilisées dans les analyses de sensibilité des scénarios de référence 94

5.4.1. Hypothèse alternative d'une absence d'évolutions techniques entre « 2010 » et 2050 94

5.4.2. Hypothèse alternative d'évolutions techniques soutenues dans les huit régions européennes et plus modérées dans les autres régions du monde 94

5.4.3. Hypothèse alternative d'une plus grande sensibilité des rendements européens au déficit hydrique à l'horizon 2050 96

Annexes du Chapitre 5 102

Chapitre 6. Les efficiences animales : méthode d'estimation à « 2010 » et projections à l'horizon 2050 172

6.1. Calibration des coefficients des efficiences animales en « 2010 » 173

6.1.1. Coefficients globaux des efficiences animales 173

6.1.2. Composition des rations alimentaires des animaux 176

6.2. Projections des coefficients des efficiences animales en 2050 et comparaison avec les coefficients de ''2010'' 180

Annexes du Chapitre 6 189

Chapitre 7. L'évolution des intensités culturales annuelles 203

Chapitre 8. Surfaces cultivables 205

8.1. Les surfaces potentiellement cultivables « en 2010 » et dans les scénarios « de référence » 2050 205

8.1.1. Les données retenues : Global Agro-Ecological Zone Assessment v3.0 205

8.1.2. Calcul des surfaces potentiellement cultivables et comparaison avec les surfaces cultivées en « 2010 » 207

8.1.3. Évolution des potentiels de surfaces cultivables selon GAEZ sous l'effet du changement climatique à 2050 208

8.1.4. Les surfaces potentiellement cultivables en 2050 dans les scénarios de référence 209

8.1.5. Comparaison avec les surfaces potentiellement cultivables selon la FAO (2012, 2018) 210

8.2. Surfaces potentiellement cultivables dans les analyses de sensibilité 211

8.2.1. Méthodologie d'estimation des surfaces potentiellement cultivables occupées par de la forêt en « 2010 » 212

8.2.2. Méthodologie d'estimation des surfaces potentiellement cultivables susceptibles d'être artificialisées entre « 2010 » et 2050 213

8.2.3. Bilan : surfaces potentiellement cultivables en 2050 hors surfaces boisées et nouvellement artificialisées 214

Références citées 217

Introduction

Ce rapport technique a vocation à expliciter les méthodologies mises en œuvre pour projeter à l'horizon 2050 les variables et paramètres d'entrée du modèle de bilan-matières GlobAgri-AE2050, utilisé pour simuler les scénarios élaborés dans l'étude « Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050. Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire » (AE2050). Après une description du modèle GlobAgri-AE2050 (Chapitre 1), il expose, pour chaque variable et paramètre d'entrée, (i) les hypothèses d'évolution retenues entre l'année de référence « 2010 » (moyenne des années 2009-2010-2011) et l'horizon 2050, (ii) les méthodologies de projection permettant de les quantifier en 2050 dans les 21 régions du monde définies dans cette étude et (iii) les résultats obtenus dans chacune des régions.

Les hypothèses sur la démographie, présentées dans le Chapitre 2, et, de façon plus implicite, la croissance économique, guident les évolutions des régimes alimentaires dans les différentes régions du monde dans sa double dimension d'apports énergétiques (nombre de calories totales consommées) et composition de la diète (répartition des calories par grands groupes de produits agricoles), qui déterminent région par région les niveaux de la demande alimentaire en produits agricoles, cette dernière faisant l'objet du Chapitre 3. Moyennant des hypothèses sur les usages non alimentaires des produits, y compris les pertes et gaspillages du côté de la demande avec un travail spécifique sur les demandes de produits agricoles à des fins énergétiques, exposé dans le Chapitre 4, on obtient une estimation à l'horizon 2050 des besoins à des fins alimentaires et non alimentaires des différents produits agricoles, besoins auxquels doivent répondre les offres des différents produits agricoles.

Du côté des variables d'entrée relatives à l'offre de produits agricoles, plusieurs travaux d'ampleur ont été nécessaires en amont des simulations, notamment pour prendre en compte au mieux les impacts que le changement climatique (CC) pourrait avoir sur l'offre agricole de par le monde. Ce travail a été réalisé en s'appuyant plus particulièrement sur les analyses de la littérature scientifique réunies dans le rapport du volet d'analyse bibliographique de l'étude. Les effets du CC à venir sur la production agricole à l'horizon 2050 dépendant mécaniquement de l'intensité de celui-ci, deux trajectoires de CC ont été considérées, à savoir un CC « tendanciel » (résultant du scénario RCP6.01 d'émission de gaz à effet de serre défini par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et un CC « aggravé » (résultant du RCP8.5)2, permettant de définir deux hypothèses de climat en 2050.

Si les rendements végétaux sont directement soumis aux effets du CC, il est également nécessaire d'intégrer dans leurs projections les effets que les évolutions techniques, qu'elles soient liées ou non à l'adaptation au CC, pourraient avoir sur les rendements. Le Chapitre 5 précise la part respective que ces deux composantes pourraient avoir dans les projections de rendements. Tout aussi importantes car déterminantes pour évaluer la demande en produits agricoles nécessaires à l'alimentation des animaux, les évolutions des efficiences animales ont fait l'objet d'un travail conséquent présenté dans le Chapitre 6. Celui-ci s'est tout d'abord penché sur une analyse de la cohérence des efficiences animales telles qu'elles sont déduites des données mondiales disponibles. Le constat d'une faible cohérence de ces données a amené à réélaborer un nouveau jeu de données mondiales pour l'année « 2010 », point de départ des projections à l'horizon 2050. Le Chapitre 7 expose la méthode de projection des intensités culturales, c'est-à-dire le rapport entre les surfaces récoltées et les surfaces cultivées, variable importante, bien que rarement explicitée dans les travaux projetant les équilibres emplois-ressources des matières agricoles. Enfin, les surfaces disponibles et susceptibles d'être affectées à la production agricole dans chacune des régions du monde en 2050 sont la dernière variable clé du système, susceptible en outre d'être touchée par le CC. Le Chapitre 8 expose le mode de projection retenu, permettant de prendre en compte explicitement les effets du CC. *In fine*, les effets du changement climatique ont donc pu être explicitement pris en compte dans les projections des rendements végétaux et des surfaces cultivables en 2050.

[1] RCP pour *Representative Concentration Pathway*, ; la valeur associée à la dénomination du RCP correspond au forçage radiatif projeté en 2100 (le RCP6.0 correspondant ainsi à un forçage radiatif de +6,0 W/m^2 en 2100).

[2] Les réflexions ayant conduit aux choix des scénarios RCP sur lesquels adosser les deux trajectoires de changement climatique retenues dans l'étude sont détaillées dans le Rapport du volet d'analyse bibliographique.

À l'échelle d'une région, une évolution plus faible de l'offre d'un produit par rapport à la demande domestique entraînera une augmentation des importations nettes de ce produit (si la régions est importatrice nette dans la situation initiale) ou une réduction des exportations nettes de ce produit, avec possibilité de passer à une situation d'importateur net (si la régions est exportatrice nette dans la situation initiale) : le travail permet donc d'analyser les évolutions des échanges pour chaque produit dans chaque région, et l'évolution des échanges entre la région considérée et le monde.

Composition du groupe de travail

• Équipe projet : conduite de l'étude

Marc-Antoine Caillaud, INRAE, UAR[3] 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.*

[3] 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[4].

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.

[4] 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. Cadrage méthodologique

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 impacter ces différentes agricultures.

A 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 en Europe et de par le monde. Le découpage géographique que nous utilisons dans cette étude est à la fois classique et original, classique dans le sens où le découpage de la zone hors Europe est semblable, voire le même que celui souvent utilisé dans des études similaires, original en distinguant 8 régions en Europe correspondant à un pays ou plusieurs pays, à la différence de nombreux travaux qui considère l'Europe comme un seul bloc homogène. Nous présentons le découpage retenu dans la section 1.1.

La section 1.2 de ce chapitre est consacrée à la présentation du modèle GlobAgri-AE2050, modèle de bilan de biomasse utilisé pour simuler les différents scénarios élaborés dans cette étude à l'horizon 2050. Nous y expliquons son fonctionnement et ses variables et paramètres clés (section 1.2.1) ainsi que son amélioration dans le cadre de cette étude en termes d'intégration de données sur l'irrigation dans celui-ci (section 1.2.2).

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

Il n'existe 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.

Figure 1-1. Composition des huit régions européennes



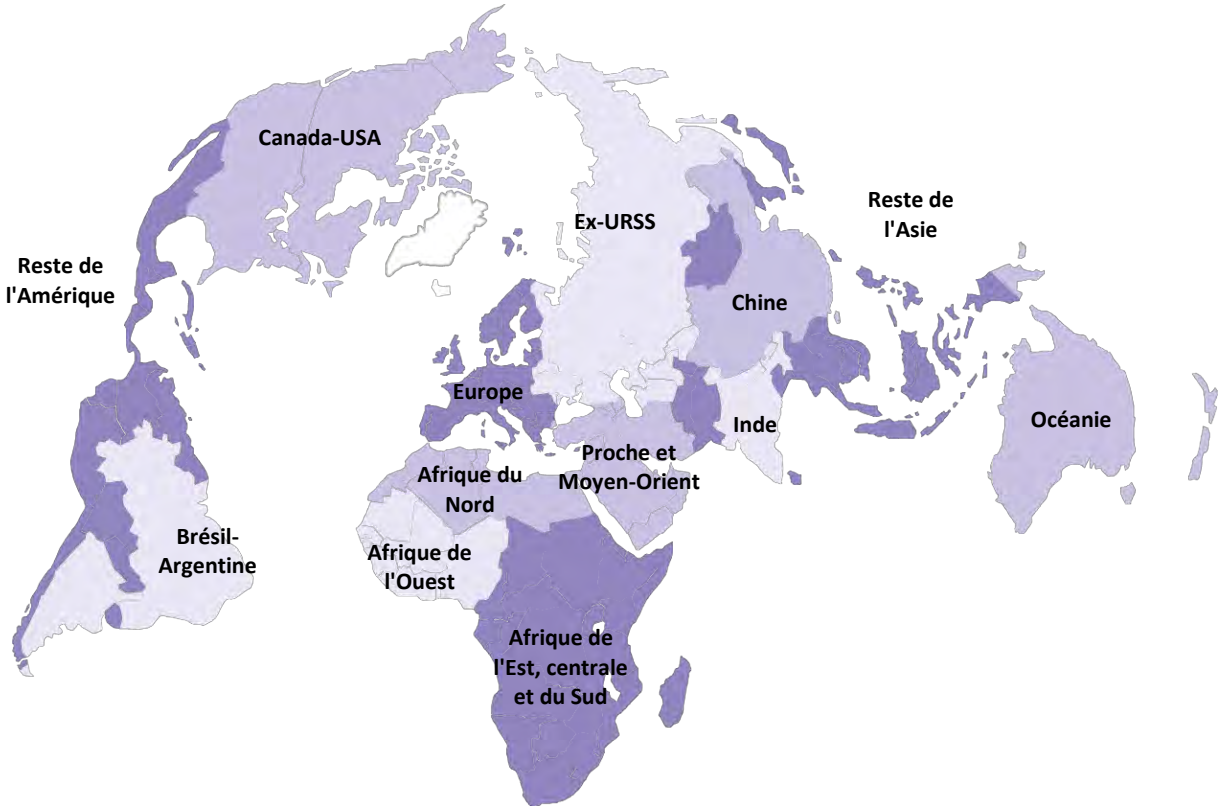
Dans ce contexte, le découpage géographique adopté essaye de concilier parcimonie, en distinguant un nombre limité de régions correspondant à un pays ou plusieurs pays, et pertinence au regard des objectifs assignés à l'étude. Ce deuxième objectif, qui vise un positionnement original de ce travail en ne considérant pas, à la différence de nombreux travaux[5], l'Europe comme un seul bloc homogène conduit à distinguer 8 régions européennes représentatives de la diversité des conditions de production agricole de cet ensemble (Figure 1-1 et Tableau 1-4). L'Europe est ici 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[6] (Figure 1-2 et Tableau 1-4) 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.

[5] 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).

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

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



Le Chapitre 1 du Rapport de synthèse AE2050 donne un aperçu de la place des différentes régions européennes dans le monde, en termes de surfaces agricoles, production et échanges dans la situation initiale de cette étude.

1.2. Informations nécessaires à la simulation de scénarios à l'aide du modèle GlobAgri-AE2050

1.2.1. Le modèle GlobAgri-AE2050 en un clin d'œil

GlobAgri est un modèle de bilan de biomasse, non économique, qui au niveau du monde assure pour chaque produit agricole considéré l'équilibre entre son offre et ses différentes utilisations.

Dans la version utilisée pour cette étude (version « GlobAgri-AE2050 »), le monde est décomposé en 21 régions (Tableau 1-4) dont 8 régions européennes (*Cf.* Section 1.1) et la production agricole en 33 produits et 5 fourrages (Tableau 1-5) agrégés pour simplifier la présentation des résultats en groupes de produits (Tableau 1-6). Dans chacune de ces 21 régions et pour chacun des 38 produits, le modèle définit un bilan 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 :

$$Q + M = \sum U + X + \Delta S + G \quad (1)^{7}$$

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.

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

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[8], 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 (1) peut alors s'écrire comme suit, pour tous les produits (équation 2) et plus spécifiquement pour les produits végétaux (équation 3) :

$$Q + CM.\sum U = \sum U + PX.MT + \Delta S + G \quad (2)$$

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

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

Les équations (2) et (3) sont vérifiées pour l'année de base « 2010 ». Elles doivent également l'être pour l'année terminale correspondant à l'horizon de simulation (2050). Expliquons alors 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 dans les deux situations initiale et finale, de même que les *variations de stocks* supposées inchangées elles 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.

Les *utilisations alimentaires* dans chacune des 21 régions du modèle évoluent selon deux grandes hypothèses correspondant à, d'une part, une évolution tendancielle des régimes alimentaires et, d'autre part, une évolution en rupture vers des régimes alimentaires sains (*Cf.* Chapitre 3). 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 prévisions démographiques médianes de l'ONU (ONU, 2017). Les projections démographiques sont les mêmes dans tous les scénarios.

Les *utilisations non alimentaires* des produits sont également une variable d'entrée du modèle. 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 (*Cf.* Chapitre 4). Les autres utilisations non alimentaires ont été maintenues, pour la plupart d'entre elles[9], à leurs niveaux de l'année de base « 2010 ».

Les évolutions de trois variables doivent aussi faire l'objet d'hypothèses du côté de l'offre agricole, soit i) les intensités culturales annuelles, ii) les rendements des végétaux, fourrages inclus et iii) les efficiences animales.

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

[9] À l'exception des usages non alimentaires des huiles végétales : pour plus de détails sur ce point, se référer au Chapitre 4 de ce rapport.

Les *intensités culturales annuelles* de l'année « 2010 » ainsi que leur évolution à 2050 ont été définies à partir de la 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 important spécifique décrit dans le Chapitre 5 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'un travail important dans cette étude qui est décrit dans le Chapitre 6 de ce rapport. 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 ajustés pour l'horizon 2050.

Une dernière variable doit également être fixée de façon exogène. Il s'agit des *surfaces cultivables* à l'horizon 2050 dans chaque région (*Cf.* Chapitre 8). Cette variable est cruciale dans la mesure où le fonctionnement du modèle varie selon que la région atteint, ou non, sa contrainte de terres cultivables dans les simulations.

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.

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)[10] 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 n'atteint en 2050 sa contrainte de terres. 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 coefficients d'intensité culturale. 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 (*Cf.* la précédente note de bas de page). Cette présentation séquentielle de la détermination des variables de sortie est néanmoins trompeuse dans la mesure où celles-ci sont déterminées simultanément comme le résultat de l'équilibre.

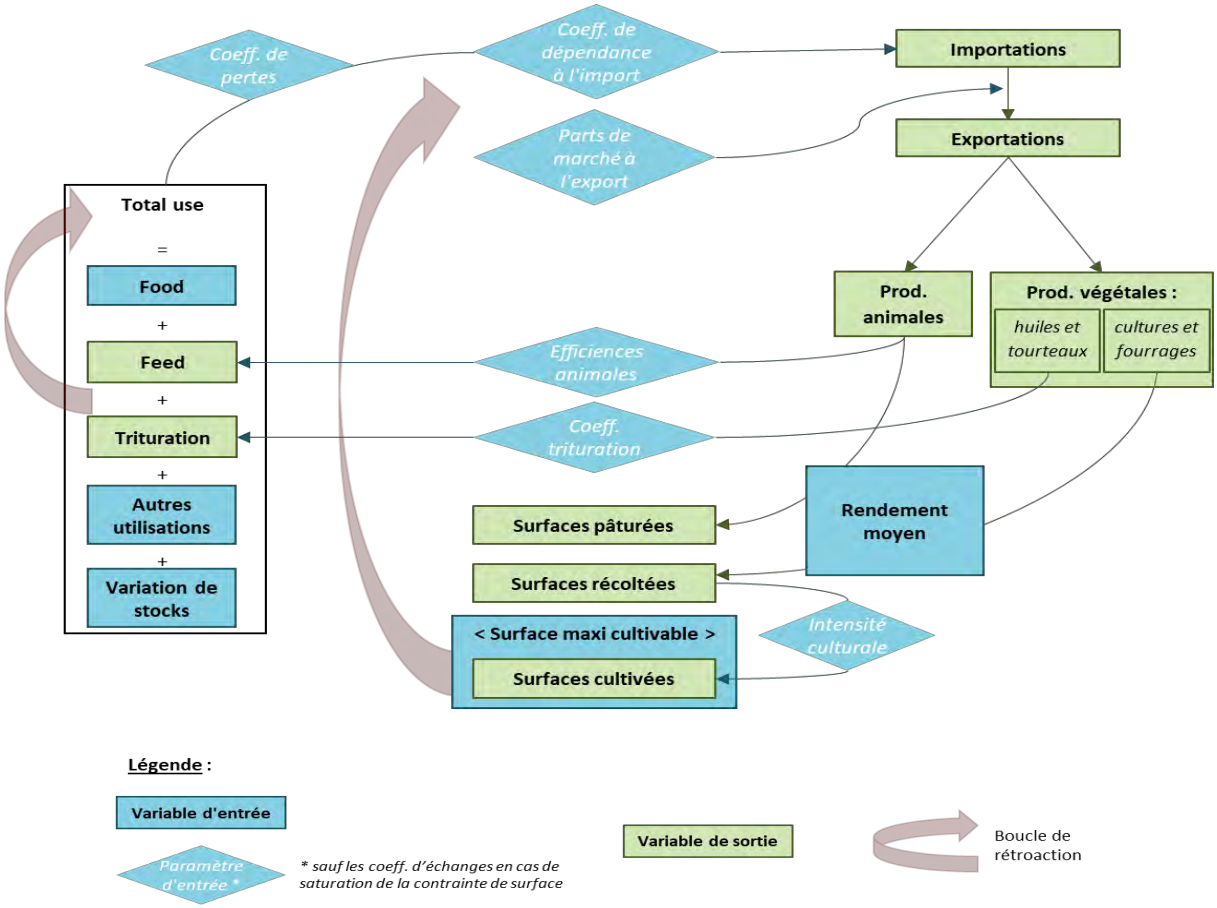
La résolution du modèle est modifiée quand une ou plusieurs régions atteignent, en 2050, leurs contraintes respectives de terres cultivables. Supposons que l'équilibre « libre », *i.e.* sans prise en compte de la contrainte sur les terres cultivables, aboutisse, dans une région A donnée, à des surfaces 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 PX_{ij}), 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 mondial[11]. 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 à ce 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. 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 (C*f.* Chapitres 6 et 7 du Rapport de synthèse de cette étude).

[10] 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 ».

[11] 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).

Figure 1-3. Représentation schématique de la mécanique du modèle GlobAgri-AE2050



1.2.2 Intégration des données sur l'irrigation dans GlobAgri-AE2050

La variable « rendement » renseignée dans GlobAgri-AE2050 provient dans la situation initiale des statistiques annuelles (FAOStat). Elle peut être interprétée comme une moyenne des rendements obtenus en systèmes irrigués et pluviaux, et peut être décomposée ainsi moyennant des informations additionnelles sur ces systèmes.

En l'absence de données historiques permettant d'élaborer des méthodes de projections spécifiques pour les rendements « irrigués » et « pluviaux » à 2050, c'est le rendement moyen « 2010 » qui est projeté en 2050 (selon les méthodes décrites en Chapitre 5). Cependant, nous avons souhaité intégrer des informations sur l'irrigation dans GlobAgri-AE2050 afin de pouvoir réaliser des analyses de sensibilité sur la disponibilité future en eau dans cette étude, le changement climatique pouvant impacter cette disponibilité relativement fortement dans certaines zones.

Ce qui suit présente la méthode de décomposition du rendement moyen (variable d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050) en « rendement irrigué » et « rendement pluvial » à la fois dans notre situation initiale (« 2010 ») et pour les rendements projetés à 2050.

Méthode de décomposition du rendement global en rendement irrigué et pluvial en « 2010 »

Nous pouvons poser l'équation suivante : le rendement global est la moyenne pondérée des rendements irrigués et pluviaux selon leur part respective dans la surface récoltée totale :

$$Rdt_AE2050_{i,r,t} = Rdt_irr_{i,r,t} * Partsurf_irr_{i,r,t} + Rdt_pluv_{i,r,t} * (1 - Partsurf_irr_{i,r,t}) \quad (4)$$

$Rdt_AE2050_{i,r,t}$ est le rendement global par culture *i*, par pays /région AE2050 *r*, pour l'année de base *t=2010* (ou pour l'horizon de projection *t=2050)*.

$Rdt_Irr_{i,r,t}$ est le rendement irrigué , $Partsurf_irr_{i,r,t}$ la part de la surface irriguée dans la surface récoltée totale par culture et $Rdt_pluv_{i,r,t}$ est le rendement pluvial de la culture.

Ayant deux variables inconnues dans l'équation (4)[12], nous utilisons le rapport entre le rendement irrigué et le rendement pluvial de chaque culture et pays/région, ce rapport étant calculé à partir de données obtenues par ailleurs (*cf.* paragraphe ci-après), soit le $Ratio_Rdt_{i,r,t}$, pour définir une deuxième équation :

$$Ratio_Rdt_{i,r,t} = \frac{Rdt_irr_{i,r,t}}{Rdt_pluv_{i,r,t}}$$

soit $Rdt_irr_{i,r,t} = Ratio_yield_{i,r,t} * Rdt_pluv_{i,r,t}$ (5)

Nous pouvons donc remplacer (5) dans (4) et résoudre les deux équations pour retrouver à la fois le $Rdt_irr_{i,r,t}$ et $Rdt_pluv_{i,r,t}$ quelle que soit l'année (t=2010 ou t=2050).

Sources des données mobilisées et calcul des rendements irrigués et pluviaux

Afin de pouvoir résoudre le système d'équation décrit ci-dessus, nous avons besoin d'information sur la part de la surface irriguée dans la surface récoltée totale et le rapport entre rendement irrigué et pluvial, par culture et par région AE2050 pour « 2010 » et pour les projections à 2050.

Pour « 2010 », nous avons utilisé principalement les données de rendements et de surfaces récoltées en système irrigué et pluvial provenant de GAEZ[13]. Ces données sont disponibles pour 49 cultures et 202 pays au travers le monde et constitue ainsi la source la plus complète à la fois en termes de cultures, de pays et de variables renseignés. Il est donc possible, à partir de ces données de recalculer la part des surfaces irriguées dans la surface récoltée totale pour chaque culture, ainsi que le rapport entre les rendements irrigués et rendements pluviaux, et ceci pour toutes les cultures et tous les pays après les avoir agrégés selon la nomenclature AE2050[14].

Pour les régions européennes, nous avons utilisé en priorité, lorsque l'information existe, les données sur les surfaces irriguées et leur part dans la surface totale par culture provenant d'EUROSTAT[15] et les données d'AGRESTE[16] (pour la France). En revanche, aucune information n'est disponible sur les rendements irrigués et pluviaux dans ces deux sources.

À partir de ces données (GAEZ, Eurostat et Agreste), ainsi que les données initiales de GlobAgri-AE2050 en termes de rendements et surfaces récoltées « globaux », nous avons recalculé les rendements irrigués et pluviaux ainsi que les surfaces irriguées et pluviales récoltées de chaque culture et région AE2050 pour notre situation initiale « 2010 ». Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 1-7.

La conversion des surfaces irriguées récoltées en surfaces irrigués *cultivées* est assurée via l'utilisation des coefficients d'intensité culturale fournis par la FAO (2018) par grande zone géographique pour leur année de base « 2012 » (Tableau 1-2). Les surfaces cultivées en pluviales sont déduites à partir des surfaces cultivées totales en « 2010 » (provenant de FAOStat) et les surfaces cultivées en irrigué ainsi calculées.

[12] Considérant que nous pouvons disposer d'informations statistiques sur les parts des surfaces irriguées et pluviales. *Cf.* le paragraphe suivant.

[13] http://www.fao.org/nr/gaez/about-data-portal/actual-yields-and-production/en/

[14] Les données de GAEZ étant disponibles uniquement pour l'année 2000, nous devons toutefois faire l'hypothèse assez forte que la part des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées totales ainsi que le rapport entre les rendements irrigués et pluviaux sont restés constants entre 2000 et 2010.

[15] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_irrigation

[16] AGRESTE, SSP –Recensement agricole 2010.

Pour 2050, les rendements en systèmes irrigués et pluviaux sont recalculés à partir des rendements moyens 2050 définis dans les différents scénarios AE2050 (voir Chapitre 5), de la part des surfaces irriguées dans la surface récoltée totale et du *ratio rendements* irrigués/pluviaux *en 2050*. Pour décomposer le rendement moyen de 2050 en rendements irrigués et pluviaux, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les paramètres suivants :

1. L'évolution des parts des surfaces irriguées dans la surface récoltée totale pour chaque couple culture-pays/région AE2050 entre « 2010 » et 2050 ;
2. L'évolution du « *ratio rendements* » entre cultures irriguées et pluviales pour chaque couple culture-pays/région AE2050 entre « 2010 » et 2050.

Pour raison de simplicité nous avons fait l'hypothèse que les parts des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées totales pour chaque couple culture-pays/région AE2050 restent constantes par rapport à « 2010 ». FAO (2018) fournit toutefois l'évolution des surfaces récoltées en systèmes irrigués et pluviaux entre 2012 et 2050 pour chacune de leur grande région[17], il est donc possible de calculer l'évolution de la part des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées totales supposée par la FAO et d'appliquer cette évolution à nos parts de surfaces irriguées en « 2010 »[18]. Cependant, dans notre étude il parait difficile de défendre une augmentation de la part des surfaces irriguées à hauteur de 20% dans les pays à hauts revenus (« *High income countries* ») dont fait partie l'Europe telle que présumée par la FAO (la part des surfaces irriguées passerait ainsi de 20 à 24% dans le scénario « BAU » dans cette zone hétérogène). En revanche, nous avons utilisé les projections de l'évolution des rapports entre rendements irrigués et pluviaux fournies par le même rapport, évolution recalculée à partir des projections des rendements irrigués et pluviaux et adaptée à notre période « 2010 » - 2050 (Tableau 1-3)[19].

Signalons ici que la décomposition du rendement moyen 2050 projetés dans les scénarios de référence AE2050 a été réalisée uniquement dans le cadre de l'analyse de sensibilité par rapport à l'impact renforcé d'une moindre disponibilité en eau à l'horizon 2050 pour certaines régions européennes[20]. Cette analyse de sensibilité a été réalisée uniquement pour les deux scénarios qui combinent l'hypothèse des « Rendements bas ». Les résultats de ces calculs sont présentés plus en détail dans le Chapitre 5, section 5.4.3 consacrée à la modélisation de la contrainte plus forte en eau et dans le Chapitre 7 du Rapport de synthèse.

La conversion en surfaces irriguées cultivées se fait comme en « 2010 » via l'application de l'évolution des coefficients d'intensité culturale des systèmes irriguées fournie par la FAO (2018) aux intensités culturales de ces mêmes systèmes en « 2010 » (Tableau 1-2). Afin de garder la cohérence avec les surfaces totales cultivées en 2050, les surfaces pluviales cultivées sont déduites, tout comme pour la situation initiale, à partir des surfaces cultivées totales en 2050 et les surfaces irriguées cultivées ainsi calculées.

[17] Table 4.10 Harvested area by production system, pages 122-123 du rapport FAO (2018).

[18] C'est d'ailleurs cela que nous avons fait pour reconstituer le rendement moyen entre cultures irriguées et pluviales projetés séparément en 2050 par la FAO (2018) uniquement sous l'effet des évolutions techniques, rendements qui ont servi de base à notre fourchette basse de rendements. Cette démarche est explicitée en détail dans le Chapitre 5 de ce rapport (Encadre 5-1).

[19] FAO (2018) fournit des informations explicites sur l'évolution des rendements des cultures irriguées et pluviales dans le tableau S 2.1 du *Supplementary Material* annexé au rapport (FAO, 2018, Annexe pp. 39-43). Ces évolutions sont décomposées en évolutions techniques, d'une part, et évolution liée au changement climatique, d'autre part, nous avons donc dû calculer l'évolution globale « évolution technique & changement climatique » avant d'en déduire l'évolution du rapport entre les rendements des deux systèmes. Le tableau S 2.1 indique les évolutions des rendements des 5 cultures principales par région FAO ainsi qu'une moyenne pondérée (la catégorie « All ») pour chaque scénario FAO (2018) entre 2012 et 2050 (en indice, 2012 = 100).

[20] Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Chapitre 7 du Rapport de synthèse.

Tableau 1-2 : Coefficients d'intensité culturale *des systèmes irrigués* en « 2010 » et leur évolution à 2050 selon la FAO (2018)

	« 2010 »	Evolution dans « BAU »*	Région FAO (2018)
Les huit régions européennes AE2050	1,03	+1 %	« High income countries »
Canada-USA	1,03	+18%	« High income countries »
Brésil-Argentine	1,28	+6%	« Latin America and Caribbean »
Reste de l'Amérique	1,28	+6%	« Latin America and Caribbean »
Ex-URSS	1,13	+20%	« Europe and central Asia »
Chine	1,79	+13%	« China »
Inde	1,33	+3%	« South Asia »
Reste de l'Asie	1,37	+3%	Moyenne «East Asia and Pacific (excl China) » & «South Asia»
Proche & Moyen Orient	1,19	+7%	«Near East and North Africa»
Afrique du Nord	1,19	+7%	«Near East and North Africa
Afrique de l'Ouest	1,13	+8%	«Sub-saharan Africa»
Afrique ECS	1,13	+8%	«Sub-saharan Africa»
Océanie	1,41	+2%	«East Asia and Pacific (excl China) »
Reste du monde	1,35	+8%	«World»

*ajusté de FAO (2018) pour correspondre à notre période de projection « 2010 » - 2050.

Tableau 1-3 : Coefficient d'évolution du ratio du rendement irrigué / pluvial entre « 2010 » et 2050 (adapté du scénario « BAU » de FAO (2018))*

Régions et produits FAO (2018)	High income countries	China	East Asia and Pacific (excl China)	South Asia	Europe and central Asia	Latin America and Caribbean	Near East and North Africa	Sub-saharan Africa	World
All	0,975	0,993	1,047	1,027	0,901	0,964	0,961	0,932	0,986
Vegetables	0,981	1,032	1,04	0,984	0,977	1,007	0,968	1,072	0,995
Maize	1,041	1,02	1,074		0,934	0,977		0,982	0,96
Wheat	0,971	1,033		1,059	0,906		1,011		0,995
Soybeans	1,037					0,897			1,002
Rice	0,837	0	1,052	1,011			0	0,945	0,936
Potatoes / Cassava / Yams		1,033		0	0,906		0,937	1,167	
Sugar cane			1,05			1,025			
Cotton				1,025					
Coffee						0,729			
Sunflower					0,925				

*Lecture des valeurs du tableau : dans les pays à hauts revenus (« High income countries »), le rapport entre rendements irrigués et rendements pluviaux toutes cultures confondues (catégorie « All ») devrait diminuer de 2,5% (1-0,975) entre « 2010 » et 2050, les rendements irrigués augmenteraient donc moins que les rendements pluviaux sur cette période ; le rapport entre rendements irrigués et pluviaux du maïs devrait augmenter de 4,1% sur la période, les rendements irrigués devraient donc augmenter plus que les rendements pluviaux pour cette culture. La même correspondance entre régions FAO et régions AE2050 que dans le Tableau 1-2 a été considérée.

Tableau 1-4. Composition des régions du modèle GlobAgri-AE2050

Régions	Pays composant la région
Régions européennes	
France	France
Allemagne	Allemagne
Royaume-Uni	Royaume-Uni
Pologne	Pologne
Europe du sud	Croatie, Espagne, Grèce, Italie, Portugal, Slovénie, Albanie, Bosnie and Herzégovine, la République de Macédoine, Monténégro, Andorre, Chypre, Malte, Monaco, San Marino, Gibraltar, Holy See.
Europe de l'Est	Serbie, Bulgarie, Hongrie, Roumanie
Europe Centrale	Suisse, Autrice, République Tchèque, Slovaquie
Reste de l'Europe	Norvège; Danemark, Suède; Finlande, Estonie, Irlande, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Pays-Bas, Belgique, Luxembourg
Régions du reste du monde	
Canada-USA	Canada, USA
Brésil-Argentine	Brésil-Argentine
Reste de l'Amérique	Antigua and Barbuda, Bahamas, Barbados, Bermuda, Bolivia (Plurinational State of), Aruba, Belize, Cayman Islands, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Dominica, Dominican Republic, Ecuador, El Salvador, Grenada, Guatemala, Guyana, Haiti, Honduras, Jamaica, Mexico, Montserrat, Netherlands Antilles, Nicaragua, Panama, Paraguay, Peru, Puerto Rico, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, Saint Vincent and the Grenadines, Suriname, Trinidad and Tobago, Turks and Caicos Islands, Uruguay, Venezuela (Bolivarian Republic of), British Virgin Islands, United States Virgin Islands, Anguilla, Falkland Islands (Malvinas), French Guiana, Guadeloupe, Martinique
Ex-URSS	Armenia, Azerbaijan, Belarus, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Russian Federation, Tajikistan, Turkmenistan, Ukraine, Uzbekistan
Chine	Chine
Inde	Inde
Reste de l'Asie	Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, British Indian Ocean Territory, Brunei Darussalam, Myanmar, Sri Lanka, Cook Islands, Indonesia, Japan, Cambodia, Democratic People's Republic of Korea, Republic of Korea, Lao People's Democratic Republic, Malaysia, Maldives, Mongolia, Nepal, Pakistan, Philippines, Timor-Leste, Singapore, Thailand, Viet Nam
Proche et Moyen Orient	Israel, Jordan, Lebanon, Syrian Arab Republic, Occupied Palestinian Territory, Bahrain, Iran (Islamic Republic of), Iraq, Kuwait, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Turkey, United Arab Emirates, Yemen, Western Sahara
Afrique du Nord	Algérie, Egypte, Libye, Maroc, Tunisie
Afrique de l'Ouest	Cabo Verde, Benin, Gambia, Guinea-Bissau, Guinea, Côte d'Ivoire, Mali, Niger, Senegal, Togo, Burkina Faso, Ghana, Liberia, Nigeria, Sierra Leone
Afrique Est, du Centre et du Sud (ECS)	Angola, Botswana, Burundi, Cameroon, Central African Republic, Chad, Comoros, Congo, Equatorial Guinea, Djibouti, Gabon, Kenya, Lesotho, Madagascar, Malawi, Mauritanie, Mauritius, Mozambique, Namibia, Eritrea, Zimbabwe, Rwanda, Saint Helena, Ascension and Tristan da Cunha, Sao Tome and Principe, Seychelles, Somalia, South Africa, Swaziland, United Republic of Tanzania, Uganda, Ethiopia, Democratic Republic of the Congo, Zambia, Mayotte, Sudan, South Sudan
Océanie	American Samoa, Australia, Solomon Islands, Christmas Island, Cocos (Keeling) Islands, Fiji, French Polynesia, Kiribati, Guam, Marshall Islands, Micronesia (Federated States of), Nauru, New Caledonia, Vanuatu, New Zealand, Niue, Norfolk Island, Northern Mariana Islands, Papua New Guinea, Pitcairn Islands, Palau, Tokelau, Tonga, Tuvalu, Wake Island, Wallis and Futuna Islands, Samoa
Reste du monde	French Southern and Antarctic Territories, Iceland, Republic of Moldova, Faroe Islands, Greenland, Saint Pierre and Miquelon, Channel Islands, Svalbard and Jan Mayen Islands, Isle of Man

Tableau 1-5. Composition des (groupes de) produits du modèle GlobAgri-AE2050

(groupes de) produits	Composition (appellations FAO pour tous les produits sauf fourrages)
Blé	Wheat
Maïs	Maize
Riz	Rice (Paddy equivalent)
Autres céréales	Barley, Rye, Oats, Millet, Sorghum, Cereals Other
Sucre et plantes sucrières	Sugar Cane, Sugar Beet (en equivalent canne à sucre ou betterave)
Fruits et légumes	Tomatoes, Onions, Vegetables Other, Oranges, Mandarines, Lemons, Limes, Grapefruit, Citrus Other, Bananas, Plantains, Apples, Pineapples, Dates, Grapes, Fruits Other
Légumineuses	Beans, Peas, Pulses Other
Racines et tubercules	Potatoes, Cassava, Sweet Potatoes, Roots Other, Yams
Fruits du palmier à huile	Oilpalm Fruit
Huile de palme et palmiste	Palm Oil, Palm Kernel Oil
Tourteaux de palmiste	Palm Kernel Cake
Graines de colza	Rape and mustardseeds
Tourteaux de colza	Rape and mustard cake
Huile de colza	Rape and mustard oil
Graines de soja	Soyabeans
Tourteaux de soja	Soyabean cake
Huile de soja	Soyabean oil
Graines de tournesol	Sunflower seeds
Tourteaux de tournesol	Sunflowerseed cake
Huile de tournesol	Sunflowerseed oil
Autres oléagineux	Groundnuts (Shelled Eq), Coconuts - Incl Copra, Sesameseed, Olives, Oilcrops Other
Tourteaux d'autres oléagineux	Cake of other oilcrops (see above)
Huile d'autres oléagineux	Oil of other oilcrops (see above)
Fibres	Jute, Jute-Like Fibres, Soft-Fibres Other, Sisal, Abaca, Hard Fibres Other, Tobacco, Rubber, Seed Cotton
Autres cultures	Nuts, Coffee, Cocoa Beans, Tea, Pepper, Pimento, Cloves, Spices, Other
Lait et produits laitiers	Milk excluding butter
Oeufs	Eggs
Viande porcine	Pork Meat
Viande de volailles	Poultry Meat
Viande bovine	Bovine Meat
Viande de petits ruminants	Mutton and Goat Meat
Produits aquatiques	Freshwater Fish, Demersal Fish, Pelagic Fish, Marine Fish Other, Crustaceans, Cephalopods, Molluscs Other, Meat Aquatic Mammals, Aquatic Animals Others
Autres produits	Meat Other, Offals Edible, Fats Animals Raw, Honey, Meat Meal, Aquatic Plants
Fourrages	
Herbe	Herbe pâturée et en ensilage des pâtures permanentes
Fourrages herbe	Prairies temporaires (herbe mixte et ray-grass)
Fourrages non herbe cultivés	Luzerne et plantes fourragères (betterave, légumes, sorgho, légumineuses, maïs, etc.)
Fourrages occasionnels	Déchets alimentaires, alimentation de parcours, etc.
Résidus de culture	Pailles, tiges

Tableau 1-6. Regroupement des (groupes de) produits AE2050 en catégories pour la présentation des résultats de simulation

Catégories de produits	**Groupes de produits AE2050 (cf. Tableau 1-5) entrant dans la composition des catégories**
Céréales	Blé
	Maïs
	Riz
	Autres céréales (orge, seigle, avoine, millet, sorgho, etc.)
Oléoprotéagineux	Graines de soja
	Graines de colza
	Graines de tournesol
	Fruits du palmier à huile
	Autres oléagineux (olives, coprah, arachide, sésame, lin, etc.)
Huiles végétales	Huile de soja
	Huile de colza
	Huile de tournesol
	Huile de palme et de palmiste
	Huile d'autres oléagineux (coprah, arachide, sésame, lin, etc.)
Tourteaux*	Tourteaux de soja
	Tourteaux de colza
	Tourteaux de tournesol
	Tourteaux de palmiste
	Tourteaux d'autres oléagineux (coprah, arachide, sésame, lin, etc.)
Plantes et produits sucriers	Sucre et plantes sucrières (Canne à sucre, betteraves à sucre, sucre en équivalent canne à sucre ou betterave)
Fruits et légumes	Fruits et légumes (tomates, oignons, autres légumes, oranges, mandarines, citrons, pamplemousse, bananes, plantains, pommes, ananas, dattes, raisins, autres fruits)
Légumineuses	Légumineuses (pois, haricots, lentilles, autres légumineuses)
Lait et produits laitiers**	Lait et produits laitiers
Viande Ruminants	Viande bovine
	Viandes de petits ruminants
Viande Monogastrique**	Viande de porc
	Viande de volailles
Produits aquatiques	Poissons et crustacés issus de la pêche et de l'aquaculture
Prairies temporaires et Fourrages de qualité	Prairies temporaires (herbe mixte et ray-grass)
	Fourrages de qualité (luzerne et plantes fourragères : betterave, légumes, sorgho, légumineuses, maïs, etc.).
Prairies permanentes	Herbe pâturée et en ensilage des pâtures permanentes
Autres	Racines et tubercules (manioc, pommes de terres, patates douces, ignames…)
	Fibres (jute, sisal, abaca, tabac, caoutchouc, coton…)
	Autres cultures (noix, café, cacao, thé, épices…)
	Autres produits (autres viandes, abats, miel, algues…)

* Les catégories « tourteaux » et « huiles » ne sont individualisée que dans la présentation des résultats de simulations en termes d'échanges.

** Les **œufs** sont inclus :
- soit dans la catégorie « laits et produits laitiers », lorsqu'il s'agit de présenter la demande alimentaire en « 2010 » et en 2050 (cf. Chapitre 3) ;
- soit dans la catégorie « viande monogastrique », lorsqu'il s'agit de présenter les résultats détaillés de simulation (niveaux de productions et d'échanges en 2050) des scénarios (cf. Annexes du rapport de synthèse).

Tableau 1-7. Rendements et surfaces irrigués et pluviaux calculés pour les 21 régions du monde pour « 2010 »

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
France								
Fibres etc.	-	1,24	1,24	-	65	65	0%	0,00
Fruits & Légumes	14,11	12,59	12,91	242	910	1 152	21%	1,12
Prairies temporaires	6,62	6,62	6,62	7	701	708	1%	1,00
Maïs	10,32	8,62	9,30	648	972	1 619	40%	1,20
Autres céréales	7,14	5,90	5,94	77	2 251	2 328	3%	1,21
Fourrages cultivés	10,35	8,33	8,48	87	1 151	1 238	7%	1,24
Autres oléagineux	-	1,48	1,48	-	93	93	0%	0,00
Autres cultures	-	1,71	1,71	-	28	28	0%	0,00
Légumineuses	5,23	3,83	3,93	22	291	313	7%	1,37
Colza	-	3,50	3,50	-	1 507	1 507	0%	0,00
Riz	-	5,66	5,66	-	22	22	0%	0,00
Racines et tubercules	52,48	40,40	45,10	62	97	158	39%	1,30
Soja	2,73	2,73	2,73	22	22	45	50%	1,00
Plantes sucrières	117,88	88,21	91,38	41	342	383	11%	1,34
Tournesol	2,79	2,41	2,43	29	690	719	4%	1,16
Blé	8,14	6,61	6,66	187	5 447	5 635	3%	1,23
Total				1 424	14 591	16 015	9%	
Allemagne								
Fibres etc.	-	2,43	2,43	-	3	3	0%	0,00
Fruits & Légumes	26,91	20,41	21,00	26	262	288	9%	1,32
Prairies temporaires	-	6,52	6,52	-	669	669	0%	0,00
Maïs	10,42	9,40	9,74	154	318	472	33%	1,11
Autres céréales	6,65	5,65	5,69	121	2 818	2 939	4%	1,18
Fourrages cultivés	-	5,10	5,10	-	1 916	1 916	0%	0,00
Autres oléagineux	-	0,86	0,86	-	10	10	0%	0,00
Autres cultures	-	2,56	2,56	-	5	5	0%	0,00
Légumineuses	3,69	2,69	2,71	2	93	95	2%	1,37
Colza	-	3,71	3,71	-	1 427	1 427	0%	0,00
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	47,32	41,96	43,28	64	195	259	25%	1,13
Soja	-	1,50	1,50	-	1	1	0%	0,00
Plantes sucrières	87,74	66,30	68,71	43	340	383	11%	1,32
Tournesol	2,44	2,07	2,09	1	24	25	4%	1,18
Blé	8,30	7,34	7,38	134	3 123	3 257	4%	1,13
Total				545	11 205	11 751	5%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Royaume-Uni								
Fibres etc.	-	1,40	1,40	-	11	11	0%	0,00
Fruits & Légumes	28,23	21,11	21,52	8	137	145	6%	1,34
Prairies temporaires	-	8,10	8,10	-	753	753	0%	0,00
Maïs	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	7,84	5,69	5,70	4	1 156	1 160	0%	1,38
Fourrages cultivés	8,35	7,27	7,28	1	186	187	1%	1,15
Autres oléagineux	-	1,82	1,82	-	36	36	0%	0,00
Autres cultures	-	-	-	-	-	-	-	-
Légumineuses	-	2,95	2,95	-	238	238	0%	0,00
Colza	-	3,60	3,60	-	639	639	0%	0,00
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	50,34	41,26	43,84	40	102	143	28%	1,22
Soja	-	-	-	-	-	-	-	-
Plantes sucrières	80,52	67,44	68,08	6	109	115	5%	1,19
Tournesol	-	-	-	-	-	-	-	-
Blé	8,69	7,78	7,78	6	1 888	1 894	0%	1,12
Total				65	5 256	5 321	1%	
Pologne								
Fibres etc.	-	2,11	2,11	-	17	17	0%	0,00
Fruits & Légumes	-	15,23	15,23	-	586	586	0%	0,00
Prairies temporaires	-	1,58	1,58	-	438	438	0%	0,00
Maïs	8,75	6,41	6,42	0	302	302	0%	1,36
Autres céréales	-	2,99	2,99	-	5 390	5 390	0%	0,00
Fourrages cultivés	-	4,97	4,97	-	713	713	0%	0,00
Autres oléagineux	-	1,15	1,15	-	25	25	0%	0,00
Autres cultures	-	0,49	0,49	-	28	28	0%	0,00
Légumineuses	-	2,16	2,16	-	149	149	0%	0,00
Colza	3,87	2,40	2,55	86	776	862	10%	1,61
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	25,68	18,92	19,06	9	457	466	2%	1,36
Soja	-	1,53	1,53	-	0	0	0%	0,00
Plantes sucrières	66,71	53,24	53,28	1	203	203	0%	1,25
Tournesol	1,97	1,71	1,72	0	3	3	3%	1,15
Blé	-	4,08	4,08	-	2 337	2 337	0%	0,00
Total				96	11 425	11 521	1%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Europe du Sud								
Fibres etc.	2,71	-	2,71	405	-	405	100%	-
Fruits & Légumes	19,90	11,38	14,95	2 175	3 012	5 187	42%	1,75
Prairies temporaires	-	4,11	4,11	-	630	630	0%	0,00
Maïs	11,44	5,93	8,55	1 050	1 154	2 204	48%	1,93
Autres céréales	3,72	2,55	2,65	398	4 335	4 732	8%	1,46
Fourrages cultivés	8,73	5,42	5,95	192	1 004	1 196	16%	1,61
Autres oléagineux	-	2,70	2,70	-	4 953	4 953	0%	0,00
Autres cultures	1,34	0,21	0,83	519	423	941	55%	6,34
Légumineuses	3,01	1,10	1,24	40	531	571	7%	2,72
Colza	-	2,18	2,18	-	79	79	0%	0,00
Riz	6,71	-	6,71	431	-	431	100%	-
Racines et tubercules	26,13	15,54	22,53	200	103	303	66%	1,68
Soja	3,50	2,06	3,19	168	46	214	78%	1,70
Plantes sucrières	76,62	50,30	65,10	83	65	148	56%	1,52
Tournesol	1,51	1,09	1,39	742	286	1 028	72%	1,39
Blé	4,01	3,30	3,36	405	4 411	4 816	8%	1,21
Total				6 807	21 031	27 838	24%	
Europe de l'Est								
Fibres etc.	2,21	1,25	1,64	17	25	43	40%	1,77
Fruits & Légumes	9,42	7,98	8,44	478	1 031	1 509	32%	1,18
Prairies temporaires	-	1,25	1,25	-	205	205	0%	0,00
Maïs	5,20	5,06	5,06	114	4 951	5 064	2%	1,03
Autres céréales	3,35	2,81	2,81	14	1 677	1 691	1%	1,19
Fourrages cultivés	4,21	2,56	2,67	41	560	601	7%	1,64
Autres oléagineux	1,34	0,92	0,94	3	53	55	5%	1,45
Autres cultures	-	1,38	1,38	-	135	135	0%	0,00
Légumineuses	2,14	1,90	1,91	5	122	127	4%	1,13
Colza	-	1,94	1,94	-	918	918	0%	0,00
Riz	5,07	-	5,07	25	-	25	100%	-
Racines et tubercules	19,00	14,39	14,92	42	324	365	11%	1,32
Soja	-	2,54	2,54	-	258	258	0%	0,00
Plantes sucrières	40,96	47,68	47,50	3	93	96	3%	0,86
Tournesol	2,33	1,86	1,94	388	1 885	2 273	17%	1,26
Blé	3,69	3,37	3,37	41	4 773	4 814	1%	1,10
Total				1 169	17 011	18 180	6%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Europe centrale								
Fibres etc.	-	3,20	3,20	-	1	1	0%	0,00
Fruits & Légumes	16,21	14,75	15,20	71	158	229	31%	1,10
Prairies temporaires	-	4,30	4,30	-	467	467	0%	0,00
Maïs	10,34	8,70	8,72	7	489	496	2%	1,19
Autres céréales	4,32	4,43	4,43	2	1 111	1 113	0%	0,97
Fourrages cultivés	9,83	6,48	6,70	18	253	271	7%	1,52
Autres oléagineux	-	0,65	0,65	-	87	87	0%	0,00
Autres cultures	-	2,82	2,82	-	8	8	0%	0,00
Légumineuses	3,21	2,30	2,31	1	66	67	1%	1,39
Colza	-	2,67	2,67	-	633	633	0%	0,00
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	35,20	28,68	29,91	14	58	72	19%	1,23
Soja	3,50	2,44	2,44	0	56	56	0%	1,43
Plantes sucrières	85,18	65,78	66,92	8	129	137	6%	1,29
Tournesol	2,68	2,25	2,29	14	127	141	10%	1,19
Blé	4,71	5,05	5,05	3	1 597	1 600	0%	0,93
Total				138	5 240	5 378	3%	
Reste de l'Europe								
Fibres etc.	-	4,05	4,05	-	14	14	0%	0,00
Fruits & Légumes	43,68	22,59	30,54	134	222	356	38%	1,93
Prairies temporaires	-	3,27	3,27	-	2 757	2 757	0%	0,00
Maïs	8,78	11,41	11,16	9	90	99	9%	0,77
Autres céréales	5,19	3,95	4,01	192	3 443	3 635	5%	1,31
Fourrages cultivés	8,95	6,05	6,37	101	815	916	11%	1,48
Autres oléagineux	-	1,03	1,03	-	36	36	0%	0,00
Autres cultures	-	1,07	1,07	-	2	2	0%	0,00
Légumineuses	3,62	2,28	2,29	1	100	101	1%	1,59
Colza	-	2,30	2,30	-	832	832	0%	0,00
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	50,55	33,26	36,38	78	356	434	18%	1,52
Soja	-	-	-	-	-	-	-	-
Plantes sucrières	79,02	66,89	67,43	11	236	246	4%	1,18
Tournesol	-	-	-	-	-	-	-	-
Blé	6,94	5,50	5,58	150	2 696	2 846	5%	1,26
Total				677	11 599	12 275	6%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Canada, USA								
Fibres etc.	2,56	2,14	2,29	1 370	2 539	3 909	35%	1,20
Fruits & Légumes	27,23	24,84	26,66	1 896	598	2 493	76%	1,10
Prairies temporaires	-	2,90	2,90	-	12 857	12 857	0%	0,00
Maïs	13,02	9,12	9,69	4 999	29 223	34 222	15%	1,43
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	4,72	3,26	3,33	400	7 228	7 628	5%	1,45
Fourrages cultivés	6,21	4,17	4,43	1 469	10 279	11 748	13%	1,49
Autres oléagineux	2,98	2,16	2,45	387	718	1 105	35%	1,38
Autres cultures	-	4,14	4,14	-	550	550	0%	0,00
Légumineuses	3,17	1,82	1,93	298	3 365	3 663	8%	1,74
Colza	2,19	1,88	1,89	39	7 540	7 579	1%	1,16
Riz	7,78	-	7,78	1 259	-	1 259	100%	-
Racines et tubercules	43,84	30,70	40,33	447	163	610	73%	1,43
Soja	3,55	2,85	2,89	1 857	30 199	32 056	6%	1,25
Plantes sucrières	74,22	57,13	64,78	376	464	840	45%	1,30
Tournesol	2,58	1,49	1,65	107	649	756	14%	1,73
Blé	4,04	2,88	2,97	2 153	25 995	28 148	8%	1,40
Total				17 056	132 366	149 423	11%	
Brésil, Argentine								
Fibres etc.	2,66	2,31	2,41	709	1 733	2 442	29%	1,15
Fruits & Légumes	33,32	14,73	17,30	494	3 072	3 566	14%	2,26
Prairies temporaires	-	4,00	4,00	-	1 157	1 157	0%	0,00
Maïs	10,40	4,39	4,56	465	15 721	16 186	3%	2,37
Fruits du palmier	-	11,64	11,64	-	106	106	0%	0,00
Autres céréales	7,11	2,45	3,16	436	2 426	2 863	15%	2,91
Fourrages cultivés	-	4,77	4,77	-	1 780	1 780	0%	0,00
Autres oléagineux	-	4,34	4,34	-	977	977	0%	0,00
Autres cultures	-	1,02	1,02	-	3 906	3 906	0%	0,00
Légumineuses	1,81	0,90	0,93	121	4 004	4 125	3%	2,01
Colza	1,49	-	1,49	67	-	67	100%	-
Riz	5,24	4,24	4,62	1 161	1 844	3 005	39%	1,23
Racines et tubercules	26,80	14,83	15,36	92	1 982	2 074	4%	1,81
Soja	-	2,72	2,72	-	40 904	40 904	0%	0,00
Plantes sucrières	105,38	72,62	78,30	1 631	7 772	9 403	17%	1,45
Tournesol	-	1,64	1,64	-	1 760	1 760	0%	0,00
Blé	-	2,99	2,99	-	6 331	6 331	0%	0,00
Total				5 176	95 474	100 650	5%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Reste de l'Amérique								
Fibres etc.	2,54	1,26	1,73	268	454	722	37%	2,02
Fruits & Légumes	19,81	10,23	14,26	2 821	3 894	6 716	42%	1,94
Prairies temporaires	-	3,14	3,14	-	3 517	3 517	0%	0,00
Maïs	4,09	2,60	2,88	2 383	10 100	12 483	19%	1,57
Fruits du palmier	15,79	15,79	15,79	104	639	743	14%	1,00
Autres céréales	4,24	2,34	2,98	1 154	2 292	3 445	33%	1,81
Fourrages cultivés	7,48	3,72	3,95	390	5 908	6 299	6%	2,01
Autres oléagineux	1,88	3,04	3,04	7	1 020	1 026	1%	0,62
Autres cultures	0,73	0,69	0,69	143	4 581	4 724	3%	1,05
Légumineuses	1,16	0,85	0,89	449	2 843	3 292	14%	1,37
Colza	1,95	-	1,95	83	-	83	100%	-
Riz	5,28	2,97	4,65	2 095	786	2 881	73%	1,78
Racines et tubercules	16,44	10,02	10,85	280	1 890	2 170	13%	1,64
Soja	-	2,22	2,22	-	4 759	4 759	0%	0,00
Plantes sucrières	83,18	56,00	68,98	1 352	1 480	2 833	48%	1,49
Tournesol	2,98	1,24	1,24	0	453	453	0%	2,41
Blé	4,84	1,88	3,61	1 409	1 000	2 410	58%	2,57
Total				12 940	45 617	58 556	22%	
Ex-URSS								
Fibres etc.	2,06	-	2,06	2 444	-	2 444	100%	#DIV/0!
Fruits & Légumes	16,78	13,22	14,44	1 286	2 468	3 754	34%	1,27
Prairies temporaires	-	1,11	1,11	-	19 621	19 621	0%	0,00
Maïs	5,74	4,62	4,92	1 208	3 312	4 520	27%	1,24
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	3,38	1,91	1,98	1 078	21 156	22 234	5%	1,77
Fourrages cultivés	6,79	2,64	2,84	249	4 926	5 175	5%	2,57
Autres oléagineux	0,91	0,51	0,85	674	121	796	85%	1,80
Autres cultures	2,61	1,94	2,07	29	117	146	20%	1,35
Légumineuses	2,28	1,58	1,62	98	1 758	1 856	5%	1,44
Colza	2,10	1,33	1,33	8	2 316	2 325	0%	1,58
Riz	4,34	-	4,34	433	-	433	100%	-
Racines et tubercules	18,70	13,82	14,57	680	3 795	4 475	15%	1,35
Soja	1,84	1,55	1,55	22	1 970	1 991	1%	1,19
Plantes sucrières	37,51	31,61	32,52	240	1 318	1 558	15%	1,19
Tournesol	1,44	1,28	1,30	1 399	10 062	11 461	12%	1,12
Blé	3,13	1,94	2,12	7 647	41 250	48 896	16%	1,62
Total				17 495	114 190	131 685	13%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Chine								
Fibres etc.	3,37	2,87	3,27	5 644	1 411	7 055	80%	1,17
Fruits & Légumes	21,85	14,75	19,04	21 358	14 043	35 400	60%	1,48
Prairies temporaires	-	1,57	1,57	-	40	40	0%	0,00
Maïs	6,30	4,95	5,49	13 167	19 260	32 427	41%	1,27
Fruits du palmier	-	13,66	13,66	-	48	48	0%	0,00
Autres céréales	3,74	2,27	2,42	341	2 900	3 240	11%	1,65
Fourrages cultivés	-	4,45	4,45	-	3 335	3 335	0%	0,00
Autres oléagineux	3,42	2,97	3,20	3 144	2 992	6 136	51%	1,15
Autres cultures	-	2,27	2,27	-	2 524	2 524	0%	0,00
Légumineuses	1,83	1,50	1,55	390	2 375	2 765	14%	1,22
Colza	2,37	1,78	1,82	489	6 866	7 356	7%	1,33
Riz	6,63	5,93	6,61	28 861	1 242	30 103	96%	1,12
Racines et tubercules	23,15	16,90	17,81	1 332	7 815	9 146	15%	1,37
Soja	2,08	1,63	1,74	2 025	6 507	8 532	24%	1,27
Plantes sucrières	69,53	61,90	64,19	575	1 347	1 922	30%	1,12
Tournesol	2,46	2,11	2,28	456	505	961	47%	1,17
Blé	5,20	3,29	4,77	18 918	5 356	24 274	78%	1,58
Total				96 698	78 567	175 266	55%	
Inde								
Fibres etc.	1,94	1,20	1,55	6 280	7 074	13 354	47%	1,62
Fruits & Légumes	24,05	10,30	12,75	2 410	11 079	13 489	18%	2,34
Prairies temporaires	-	2,40	2,40	-	4	4	0%	0,00
Maïs	3,93	1,85	2,35	2 054	6 477	8 532	24%	2,12
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	1,63	0,95	1,04	2 367	17 036	19 403	12%	1,71
Fourrages cultivés	2,83	1,46	1,80	7 406	22 238	29 644	25%	1,93
Autres oléagineux	2,20	1,69	1,76	1 725	9 774	11 499	15%	1,30
Autres cultures	1,50	1,27	1,27	1	4 834	4 835	0%	1,18
Légumineuses	0,98	0,57	0,64	4 285	21 099	25 384	17%	1,71
Colza	1,71	1,15	1,20	493	5 635	6 128	8%	1,49
Riz	4,58	1,98	3,40	23 327	19 603	42 930	54%	2,31
Racines et tubercules	26,63	17,72	21,51	938	1 268	2 206	43%	1,50
Soja	1,95	1,04	1,18	1 580	8 243	9 823	16%	1,88
Plantes sucrières	75,26	26,48	67,95	3 836	676	4 511	85%	2,84
Tournesol	-	0,64	0,64	-	1 046	1 046	0%	0,00
Blé	3,20	1,42	2,91	23 868	4 558	28 426	84%	2,26
Total				80 571	140 642	221 214	36%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Reste de l'Asie								
Fibres etc.	1,50	1,18	1,44	9 998	2 097	12 096	83%	1,27
Fruits & Légumes	31,00	8,78	12,24	1 901	10 322	12 223	16%	3,53
Prairies temporaires	-	5,73	5,73	-	922	922	0%	0,00
Maïs	4,10	3,63	3,70	1 985	10 560	12 545	16%	1,13
Fruits du palmier	-	18,63	18,63	-	10 524	10 524	0%	0,00
Autres céréales	1,62	1,07	1,11	181	2 220	2 401	8%	1,52
Fourrages cultivés	11,64	4,72	5,61	279	1 879	2 158	13%	2,47
Autres oléagineux	4,12	3,75	3,76	344	11 675	12 020	3%	1,10
Autres cultures	2,59	1,06	1,07	62	7 765	7 826	1%	2,46
Légumineuses	1,62	0,96	1,05	1 058	6 478	7 536	14%	1,69
Colza	1,11	0,77	0,91	333	482	816	41%	1,44
Riz	5,20	3,24	4,19	33 213	35 630	68 843	48%	1,60
Racines et tubercules	23,72	16,50	17,20	532	4 955	5 486	10%	1,44
Soja	1,84	1,38	1,42	178	1 607	1 785	10%	1,34
Plantes sucrières	66,37	51,07	62,00	2 596	1 038	3 633	71%	1,30
Tournesol	1,91	0,86	1,00	149	943	1 092	14%	2,23
Blé	2,69	1,64	2,46	10 267	2 916	13 183	78%	1,65
Total				63 075	112 012	175 087	36%	
Proche et Moyen-Orient								
Fibres etc.	3,52	1,03	3,47	915	19	934	98%	3,42
Fruits & Légumes	19,23	10,52	16,78	4 186	1 641	5 827	72%	1,83
Prairies temporaires	-	5,96	5,96	-	68	68	0%	0,00
Maïs	8,46	4,04	6,59	616	454	1 070	58%	2,09
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	1,87	2,07	2,03	1 466	6 227	7 693	19%	0,90
Fourrages cultivés	5,81	2,26	3,64	443	695	1 138	39%	2,57
Autres oléagineux	2,95	1,59	1,64	71	1 802	1 874	4%	1,86
Autres cultures	1,71	2,06	1,88	756	729	1 485	51%	0,83
Légumineuses	1,41	0,90	1,10	825	1 333	2 158	38%	1,56
Colza	1,72	2,39	2,29	30	170	200	15%	0,72
Riz	4,58	-	4,58	698	-	698	100%	-
Racines et tubercules	29,83	16,91	27,59	363	76	439	83%	1,76
Soja	4,01	1,44	2,64	46	52	98	47%	2,78
Plantes sucrières	59,43	23,69	53,87	418	77	495	84%	2,51
Tournesol	3,13	1,04	1,90	288	420	708	41%	3,00
Blé	3,31	1,80	2,24	5 277	12 712	17 989	29%	1,84
Total				16 398	26 476	42 873	38%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Afrique du Nord								
Fibres etc.	2,43	-	2,43	188	-	188	100%	-
Fruits & Légumes	18,21	6,14	17,47	2 874	187	3 061	94%	2,97
Prairies temporaires	-	3,60	3,60	-	99	99	0%	0,00
Maïs	8,35	0,41	6,40	878	285	1 163	75%	20,56
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	6,86	0,93	1,58	459	3 699	4 158	11%	7,37
Fourrages cultivés	8,00	1,24	4,55	306	319	624	49%	6,45
Autres oléagineux	4,01	0,95	1,08	137	3 136	3 273	4%	4,22
Autres cultures	-	0,89	0,89	-	564	564	0%	0,00
Légumineuses	2,72	0,55	1,17	201	500	702	29%	4,91
Colza	2,31	-	2,31	19	-	19	100%	-
Riz	9,50	-	9,50	549	-	549	100%	-
Racines et tubercules	25,92	-	25,92	382	-	382	100%	-
Soja	-	2,82	2,82	-	12	12	0%	0,00
Plantes sucrières	79,75	-	79,75	326	-	326	100%	-
Tournesol	2,19	0,44	1,32	35	35	70	50%	4,95
Blé	5,53	1,09	2,66	2 432	4 439	6 872	35%	5,09
Total				8 787	13 276	22 063	40%	
Afrique de l'Ouest								
Fibres etc.	3,78	1,03	1,04	4	2 297	2 301	0%	3,67
Fruits & Légumes	8,35	5,49	5,99	1 096	5 188	6 284	17%	1,52
Prairies temporaires	-	-	-	-	-	-	-	-
Maïs	1,29	1,73	1,73	1	8 975	8 976	0%	0,75
Fruits du palmier	3,29	3,29	3,29	6	4 229	4 235	0%	1,00
Autres céréales	-	0,82	0,82	-	27 665	27 665	0%	0,00
Fourrages cultivés	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres oléagineux	-	1,12	1,12	-	8 044	8 044	0%	0,00
Autres cultures	-	0,57	0,57	-	8 921	8 921	0%	0,00
Légumineuses	-	0,52	0,52	-	10 462	10 462	0%	0,00
Colza	-	-	-	-	-	-	-	-
Riz	3,45	1,70	1,96	912	5 102	6 015	15%	2,03
Racines et tubercules	14,69	9,66	9,67	5	13 258	13 263	0%	1,52
Soja	-	0,79	0,79	-	591	591	0%	0,00
Plantes sucrières	60,15	21,29	42,42	76	64	140	54%	2,83
Tournesol	-	-	-	-	-	-	-	-
Blé	1,87	0,95	1,53	62	35	97	64%	1,97
Total				2 162	94 832	96 993	2%	

Tableau 1-7. Suite

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Afrique de l'Est, centrale et du Sud								
Fibres etc.	1,31	0,69	0,74	242	2 652	2 894	8%	1,89
Fruits & Légumes	12,71	6,92	7,66	1 097	7 419	8 515	13%	1,84
Prairies temporaires	-	2,44	2,44	-	1 836	1 836	0%	0,00
Maïs	3,88	1,89	1,97	894	20 828	21 722	4%	2,05
Fruits du palmier	9,72	9,72	9,72	25	323	348	7%	1,00
Autres céréales	1,54	0,88	0,88	206	23 988	24 194	1%	1,75
Fourrages cultivés	8,79	4,08	4,55	42	378	420	10%	2,15
Autres oléagineux	0,82	0,70	0,70	20	10 764	10 784	0%	1,17
Autres cultures	1,93	0,60	0,63	68	3 901	3 969	2%	3,20
Légumineuses	1,08	0,78	0,78	37	11 116	11 152	0%	1,39
Colza	-	1,29	1,29	-	69	69	0%	0,00
Riz	3,26	1,68	2,56	1 956	1 562	3 518	56%	1,94
Racines et tubercules	31,15	8,53	8,61	45	12 334	12 379	0%	3,65
Soja	-	1,25	1,25	-	819	819	0%	0,00
Plantes sucrières	90,73	32,77	56,31	498	727	1 225	41%	2,77
Tournesol	1,31	1,05	1,05	4	1 598	1 603	0%	1,25
Blé	5,16	1,79	2,13	286	2 579	2 864	10%	2,88
Total				5 419	102 893	108 312	5%	
Océanie								
Fibres etc.	3,89	-	3,89	342	-	342	100%	-
Fruits & Légumes	55,61	9,69	15,10	88	663	751	12%	5,74
Prairies temporaires	-	2,86	2,86	-	2 132	2 132	0%	0,00
Maïs	7,91	5,85	6,73	37	49	86	43%	1,35
Fruits du palmier	-	18,36	18,36	-	145	145	0%	0,00
Autres céréales	3,84	1,91	2,00	281	5 731	6 013	5%	2,01
Fourrages cultivés	8,30	3,63	3,75	27	1 072	1 099	2%	2,28
Autres oléagineux	-	4,68	4,68	-	627	627	0%	0,00
Autres cultures	-	0,91	0,91	-	274	274	0%	0,00
Légumineuses	-	1,17	1,17	-	1 846	1 846	0%	0,00
Colza	0,83	1,16	1,13	183	1 647	1 830	10%	0,72
Riz	8,88	2,59	8,70	38	1	39	97%	3,43
Racines et tubercules	31,56	10,13	12,78	40	284	324	12%	3,11
Soja	1,77	1,92	1,86	12	18	30	40%	0,92
Plantes sucrières	79,38	46,35	74,45	360	63	423	85%	1,71
Tournesol	1,83	1,04	1,20	8	31	39	20%	1,76
Blé	3,58	1,67	1,77	716	12 937	13 653	5%	2,15
Total				2 132	27 521	29 653	7%	

Tableau 1-7. Fin

	Rendement irrigué (t/ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement (t/ha)	Surface irriguée (1000 ha)	Surface pluviale (1000 ha)	Surface récoltée totale (1000 ha)	Part de la surface irriguée dans la surface totale	Rendement irrigué/rendement pluvial
Reste de monde								
Fibres etc.	-	1,64	1,64	-	4	4	0%	0,00
Fruits & Légumes	6,52	4,65	5,03	54	215	269	20%	1,40
Prairies temporaires	-	1,18	1,18	-	122	122	0%	0,00
Maïs	3,86	3,03	3,21	87	332	419	21%	1,27
Fruits du palmier	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres céréales	2,17	1,67	1,72	14	121	135	10%	1,30
Fourrages cultivés	2,95	2,31	2,34	2	38	40	4%	1,27
Autres oléagineux	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres cultures	-	2,54	2,54	-	5	5	0%	0,00
Légumineuses	1,36	1,05	1,06	1	29	30	4%	1,30
Colza	-	1,17	1,17	-	45	45	0%	0,00
Riz	-	-	-	-	-	-	-	-
Racines et tubercules	13,55	9,96	10,69	6	23	29	20%	1,36
Soja	-	1,49	1,49	-	53	53	0%	0,00
Plantes sucrières	31,26	23,26	24,93	5	19	24	21%	1,34
Tournesol	1,92	1,41	1,46	24	225	250	10%	1,36
Blé	2,82	2,20	2,33	66	260	326	20%	1,28
Total				258	1 492	1 750	15%	

Chapitre 2. La croissance démographique

Afin de calculer la demande totale de consommation humaine à l'horizon 2050, on s'appuie sur des projections de population par pays, que nous regroupons par région AE2050. Dans tous les scénarios AE2050, nous utilisons la variante Médiane des révisions 2017 des projections démographiques de l'ONU (2017 Revision of World Population Prospects, ci-après désigné « WPP-2017 »).

Les Tableaux 2-1 et 2-2 récapitulent les projections démographiques regroupées par région AE2050 entre l'année de base « 2010 » (moyenne 2009, 2010, 2011) et l'horizon 2050, telles qu'elles ressortent des WPP-2017 et, pour comparaison, de la révision WPP de 2012 utilisée dans la prospective Agrimonde-Terra et dans l'étude sur la sécurité alimentaire de l'Afrique du Nord – Moyen-Orient (Le Mouël et Schmitt, 2018). Le Tableau 2-3 présente les valeurs retenues dans la présente étude.

Dans la variante médiane de WPP-2017, l'ONU projette la population mondiale à 9,8 milliards (Md) d'habitants en 2050, soit une augmentation de 40 % par rapport à « 2010 » (Tableau 2-1). Les régions AE2050 qui connaitront les plus fortes augmentations de leurs populations sont l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud (Afrique ECS), qui devraient voir leur population s'accroître de respectivement 163 % et 151 % par rapport à « 2010 » (soit un total de +1,37 Md d'habitants en plus dans ces deux régions). Ainsi, la population totale de la seule Afrique ECS (1,45 Md d'habitants) dépasserait celle de la Chine en 2050, la population de celle-ci se stabilisant à 1,40 Md d'habitants. La population indienne augmenterait de 35 % et l'Inde deviendrait ainsi le pays le plus peuplé de la planète (1,66 Md d'habitants).

A l'inverse, plusieurs régions européennes connaissent un recul de leur population entre 2010 et 2050 : Europe de l'Est (- 20 %), Pologne (- 15 %), Europe du sud (- 8 %) et Allemagne (- 2 %), évolutions que compenserait l'augmentation de la population dans d'autres régions européennes (Royaume-Uni : +19 % ; France : +12 %, reste de l'Europe : +12 %) et qui conduirait à une stabilisation, entre « 2010 » et 2050, de la population européenne à 535 millions d'habitants.

Les deux variantes de projection font varier cette projection médiane d'environ 1,1 Md d'habitants de plus dans le monde pour la variante « *High* » à 1 Md d'habitants de moins dans la variante « *Low* », donnant lieu à une population mondiale qui varierait entre 10,8 et 8,8 Md d'habitants en 2050.

Par rapport à la révision WPP-2012, l'augmentation de la population globale de la révision WPP-2017 est plus forte de 2 points (Tableau 2-2): elle augmenterait de + 40 % contre + 38 % prévus par la révision WPP-2012 (soit 9,6 Md habitants en 2050). En relatif, ce sont surtout l'Afrique ECS et l'Afrique du Nord qui ont connu les plus fortes révisions à la hausse de leurs projections démographiques entre WPP-2012 et WPP-2017 (respectivement + 14 et + 17 points de pourcentage entre les deux révisions). En absolu, ce sont les populations de l'Afrique ECS et du Reste de l'Asie qui connaissent les plus fortes révisions à la hausse (respectivement + 93 millions d'habitants et + 47 millions d'habitants entre les deux révisions). L'incertitude entre les deux révisions semble diminuer. En effet, les variantes « *High* » et « *Low* » de la révision WPP-2012 envisageaient respectivement une augmentation de 1,3 Md d'habitants de plus dans « *High* » (contre 1,1 Md pour WPP-2017) et une augmentation de 1,2 Md d'habitants de moins dans « *Low* » (contre 1 Md pour WPP-2017).

Tableau 2-1. Évolution démographique (en millions d'habitants) des 21 régions AE2050 selon les projection de la révision WPP-2017) de l'ONU

WPP-2017 (Mhab) / Régions AE2050	« 2010 » moy	2050 – ***Medium***	Var « 2010 »-2050	Evol %	2050 – ***High***	Var « 2010 »-2050	Evol %	2050 – ***Low***	Var « 2010 »-2050	Evol %
France	63,0	70,6	7,6	12%	77,5	14,5	23%	64,0	1,0	2%
Allemagne	80,9	79,2	-1,7	-2%	86,8	5,9	7%	72,0	-9,0	-11%
Royaume-Uni	63,3	75,4	12,1	19%	82,8	19,6	31%	68,3	5,0	8%
Pologne	38,3	32,4	-5,9	-15%	35,9	-2,4	-6%	29,1	-9,2	-24%
Europe du Sud	146,0	134,1	-11,9	-8%	146,8	0,8	1%	121,9	-24,0	-16%
Europe de l'est	46,8	37,5	-9,3	-20%	41,6	-5,2	-11%	33,7	-13,1	-28%
Europe centrale	32,2	33,8	1,6	5%	37,1	4,9	15%	30,6	-1,6	-5%
Reste de l'Europe	64,6	72,3	7,8	12%	79,5	14,9	23%	65,5	0,9	1%
Total Europe AE2050	**535,1**	**535,4**	**0,3**	**0,1%**	**587,9**	**52,9**	**10%**	**485,0**	**-50,0**	**-9%**
Canada, USA	342,8	434,5	91,8	27%	478,8	136,0	40%	392,2	49,4	14%
Brésil, Argentine	238,0	287,9	49,9	21%	322,2	84,2	35%	256,0	18,0	8%
Reste de l'Amérique	359,6	491,9	132,4	37%	551,2	191,7	53%	436,5	76,9	21%
Ex-URSS	277,8	289,3	11,5	4%	322,3	44,6	16%	258,0	-19,8	-7%
Chine	1 390,4	1 396,4	5,9	0,4%	1 541,1	150,7	11%	1 259,6	-130,9	-9%
Inde	1 230,8	1 659,0	428,1	35%	1 863,5	632,6	51%	1 468,1	237,2	19%
Reste de l'Asie	1 202,7	1 617,1	414,3	34%	1 806,3	603,6	50%	1 438,3	235,5	20%
Proche et Moyen-Orient	290,5	472,6	182,1	63%	524,3	233,8	80%	423,4	132,9	46%
Afrique du Nord	169,5	278,5	109,0	64%	310,2	140,7	83%	248,5	79,0	47%
Afrique de l'Ouest	304,2	800,7	496,5	163%	876,9	572,6	188%	727,6	423,4	139%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	575,5	1 447,3	871,8	151%	1 596,9	1 021,4	177%	1 304,3	728,8	127%
Océanie	36,6	57,1	20,5	56%	62,9	26,3	72%	51,6	15,0	41%
Reste du monde	4,8	4,1	-0,7	-14%	4,6	-0,2	-4%	3,6	-1,1	-24%
WORLD	**6 958,3**	**9 771,8**	**2 813,5**	**40%**	**10 849,1**	**3 890,8**	**56%**	**8 752,8**	**1 794,4**	**26%**

Tableau 2-2. Evolution démographique (en millions d'habitants) des 21 régions AE2050 selon les projection de la révision WPP-2012 de l'ONU

WPP-2012 (Mhab) / Régions AE2050	« 2010 » moy[21]	2050- **Medium**	Var « 2010 »- 2050	Evol %	2050 - **High**	Var « 2010 »- 2050	Evol %	2050 - **Low**	Var « 2010 »- 2050	Evol %
France	63,2	73,2	10,0	16%	82,2	19	30%	64,8	2	3%
Allemagne	83,0	72,6	-10,5	-13%	81,6	-1	-2%	64,2	-19	-23%
Royaume-Uni	62,1	73,1	11,1	18%	82,1	20	32%	64,8	3	4%
Pologne	38,2	34,1	-4,1	-11%	38,8	1	2%	29,7	-8	-22%
Europe du Sud	146,1	145,2	-0,9	-1%	162,7	17	11%	129,1	-17	-12%
Europe de l'est	48,9	38,9	-10,0	-20%	44,7	-4	-9%	33,7	-15	-31%
Europe centrale	21,7	25,3	3,7	17%	28,4	7	31%	22,4	1	4%
Reste de l'Europe	64,2	71,6	7,4	12%	80,5	16	25%	63,3	-1	-1%
Total Europe AE2050	**527,5**	**534,1**	**6,6**	**1%**	**601,1**	**74**	**14%**	**472,1**	**-55**	**-10%**
Canada, USA	346,3	446,1	99,7	29%	500,3	154	44%	395,1	49	14%
Brésil, Argentine	235,6	282,1	46,6	20%	326,2	91	38%	243,0	7	3%
Reste de l'Amérique	360,5	499,3	138,8	38%	575,8	215	60%	430,3	70	19%
Ex-URSS	277,3	264,9	-12,4	-4%	307,3	30	11%	226,8	-50	-18%
Chine	1 367,4	1 393,8	26,4	2%	1 589,4	222	16%	1 216,7	-151	-11%
Inde	1 205,6	1 620,1	414,4	34%	1 862,3	657	54%	1 398,7	193	16%
Reste de l'Asie	1 201,5	1 569,1	367,6	31%	1 799,2	598	50%	1 358,9	157	13%
Proche et Moyen-Orient	289,0	456,3	167,2	58%	517,4	228	79%	399,8	111	38%
Afrique du Nord	163,5	240,7	77,3	47%	275,4	112	68%	208,7	45	28%
Afrique de l'Ouest	282,6	764,3	481,7	170%	847,1	564	200%	686,0	403	143%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	564,9	1 343,8	778,9	138%	1 513,3	948	168%	1 185,4	620	110%
Océanie	36,6	56,9	20,2	55%	63,9	27	74%	50,3	14	37%
Reste du monde	4,2	3,3	-1,0	-23%	3,8	0	-10%	2,8	-1	-34%
World	**6 916,3**	**9 550,9**	**2 634,6**	**38%**	**10 870,0**	**3 954**	**57%**	**8 341,7**	**1 425**	**21%**

[21] La différence entre la colonne « 2010 » de la révision 2012 et celle de 2017 est due à la mise à jour historique des chiffres de population de l'ONU.

Tableau 2-3. Évolution démographique (en millions d'habitants) des 21 régions du monde entre « 2010 » et 2050

	Population "2010" (Mhab) (FAOStat)[22]	*Part de la population mondiale en 2010 (%)*	**Taux d'accroissement démographique entre "2010" et 2050 d'après WPP-2017 (%)**	**Variation de la population entre "2010" et 2050 (Mhab)**	**Population 2050 (Mhab)**	*Part de la population mondiale en 2050 (%)*
France	63,0	*0,9%*	12,0%	+7,6	70,6	*0,7%*
Allemagne	80,9	*1,2%*	-2,1%	-1,7	79,2	*0,8%*
Royaume-Uni	63,3	*0,9%*	19,1%	+12,1	75,4	*0,8%*
Pologne	38,3	*0,6%*	-15,5%	-5,9	32,4	*0,3%*
Europe Sud	145,8	*2,1%*	-8,1%	-11,8	133,9	*1,4%*
Europe Est	46,8	*0,7%*	-19,8%	-9,3	37,5	*0,4%*
Europe centrale	32,2	*0,5%*	5,0%	+1,6	33,8	*0,4%*
Reste de l'Europe	64,5	*0,9%*	12,0%	+7,8	72,3	*0,8%*
TOTAL Europe	**534,8**	***7,9%***	**0,1%**	**+0,3**	**535,2**	***5,7%***
Canada, USA	342,8	*5,0%*	26,8%	+91,8	434,5	*4,6%*
Brésil, Argentine	238,0	*3,5%*	21,0%	+49,9	287,9	*3,0%*
Reste Amér.	354,3	*5,2%*	36,8%	+130,4	484,7	*5,1%*
Ex-URSS	277,8	*4,1%*	4,1%	+11,5	289,3	*3,1%*
Chine	1 390,4	*20,4%*	0,4%	+5,9	1 396,4	*14,8%*
Inde	1 230,8	*18,1%*	34,8%	+428,1	1 659,0	*17,5%*
Reste de l'Asie	1 196,9	*17,6%*	34,4%	+412,3	1 609,2	*17,0%*
P&M-Orient	262,0	*3,8%*	62,7%	+164,2	426,3	*4,5%*
Afrique Nord	163,4	*2,4%*	64,3%	+105,1	268,4	*2,8%*
Afrique Ouest	304,2	*4,5%*	163,2%	+496,5	800,7	*8,5%*
Afrique ECS	483,0	*7,1%*	151,5%	+731,6	1 214,6	*12,8%*
Océanie	28,9	*0,4%*	56,0%	+16,2	45,1	*0,5%*
Reste du monde	4,4	*0,1%*	-14,3%	-0,6	3,8	*0,0%*
TOTAL Monde	**6 811,7**	***100,0%***	**38,8%**	**+2 643,3**	**9 455,1**	***100,0%***

[22] GlobAgri-AE2050 utilise les chiffres de population publiés par FAOStat pour « 2010 » afin d'être cohérent avec les données de bilans et de surfaces de cette même source. Le manque de données de certains pays dans FAOStat conduit à une différence entre la population FAOStat/GlobAgri-AE2050 et l'ONU dans la situation initiale « 2010 » de 2 % dans le monde et de moins de 0,06 % en Europe-AE2050. L'utilisation des taux de croissance médian de l'ONU conduit à une population de 9,46 Md de personnes dans les projections AE2050 au lieu de 9,77 dans les prévisions de l'ONU (2017).

Chapitre 3. L'évolution des régimes alimentaires

Les usages alimentaires des produits agricoles, donnée d'entrée du côté demande du modèle GlobAgri-AE2050, résultent d'une combinaison des projections démographiques (décrites en Chapitre 2) avec des projections des consommations alimentaires par habitant. Celle-ci, exprimée ici en Kcal, est caractérisée par deux composantes : (i) une évolution du niveau des apports énergétiques entre « 2010 » et 2050 et (ii) une évolution de la répartition des produits agricoles dans ces apports (structure de consommation). 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.

Pour faire écho aux débats sur la nécessité de rompre, tant pour des raisons de santé qu'environnementales, avec la transition nutritionnelle telle qu'elle s'est déroulée au cours des dernières décennies, deux trajectoires d'évolution possible des régimes alimentaires ont été considérées dans la présente étude :
- une évolution tendancielle dans l'ensemble des régions du monde, se caractérisant par la poursuite des régimes dominants et des transitions en cours. Les régimes de 2050 issus de cette trajectoire sont désignés ci-après « régimes tendanciels » ;
- la transition vers des régimes se rapprochant pour chaque région du monde des recommandations nutritionnelles de l'Organisation Mondiale de la Santé. Les régimes alimentaires de 2050 issus de cette trajectoire, désignés ci-après « régimes sains », restent cependant différents entre régions du monde.

3.1. 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, l'écart entre les apports caloriques de ces deux régions extrêmes étant de 68 %. 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 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 nutritionnelles 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

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.

3.2. Une évolution tendancielle des régimes alimentaires à l'horizon 2050 : la mobilisation des projections Alexandratos et Bruinsma (2012)

Pour projeter les consommations alimentaires par habitant à l'horizon 2050 selon une évolution tendancielle, nous avons adapté les projections d'Alexandratos et Bruinsma (2012), retravaillées pour les besoins de l'étude conduite par l'Inra sur la dépendance alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient (voir Le Mouël et Schmitt, 2018). Le travail réalisé par la FAO (Alexandratos et Bruinsma, 2012) vise à décrire la situation alimentaire mondiale à l'horizon 2050 (détaillée par pays/groupes de pays). Les auteurs appuient leurs projections des consommations alimentaires sur les tendances passées qu'ils ont analysées pour les différentes régions et qu'ils révisent régulièrement en fonction notamment de l'évolution de la sous-nutrition observée dans les grands pays en développement ou émergents. Leurs projections prolongent ainsi la transition nutritionnelle en cours, qui se traduit par une augmentation de la consommation des produits animaux, des huiles et des produits sucriers. Alexandratos et Bruinsma (2012) donnant les coefficients d'augmentation de la demande totale par région et selon leurs catégories de produits (FAO) entre 2005/2007 et 2050, ces projections ont été adaptées à la nomenclature Produit et Région de GlobAgri-AE2050.

Pour adapter ces projections à l'étude AE2050, nous avons appliqué les taux de croissance annuels moyens de la consommation par habitant (tirés de Alexandratos et Bruinsma, 2012) à la consommation par habitant par produit et par région AE2050 observée en « 2010 » (l'année de base de GlobAgri-AE2050). Nous calculons ensuite la demande alimentaire totale par produit et par région AE2050 en 2050, en utilisant les projections démographiques à l'horizon 2050 présentées en Chapitre 2. Pour les régions européennes, nous avons appliqué à chaque sous-région le taux de croissance calculé par Alexandratos et Bruinsma (2012) pour la région « UE 27 ».

3.3. Une évolution des régimes alimentaires dans un sens plus favorable à la santé à l'horizon 2050 : l'adaptation des hypothèses du régime « Healthy » d'Agrimonde-Terra

Pour quantifier cette seconde trajectoire d'évolution des consommations alimentaires, on s'est appuyé sur le travail prospectif réalisé dans Agrimonde-Terra, la prospective relative aux usages des terres et à la sécurité alimentaire dans le monde à l'horizon 2050, conduite par l'Inra et le Cirad (Le Mouël et al., 2018). Dans cette prospective, les régimes alimentaires sains (régime "healthy") se caractérisent par la mise en place de régimes alimentaires normatifs en réaction aux conséquences sur la santé des scénarios tendanciels (urbanisation et globalisation des systèmes alimentaires).

Ils se définissent par quatre évolutions majeures :

1. une baisse des apports caloriques journaliers dans les régions développées et émergentes et une augmentation de ceux-ci dans les pays en développement ;
2. une plus grande diversité dans les produits composant la diète, qui se traduit notamment par un accroissement de la part des fruits et légumes, des céréales secondaires et des légumineuses, afin d'augmenter les apports en fibres et en nutriments ;
3. une diminution de la part des produits animaux dans le régime des pays développés ;
4. une limitation stricte de la part des produits gras et sucrés.

Pour quantifier l'évolution des régimes vers un régime "sain" en 2050 et suivant en cela la démarche Agrimonde-Terra, deux types d'hypothèses ont été élaborées : des hypothèses sur l'évolution des apports caloriques par habitant et par jour (hypothèses 1) et des hypothèses sur les parts relatives de chaque groupe de produits dans le régime (hypothèses 2). Ces hypothèses reprennent largement celles établies dans le cadre d'Agrimonde-Terra pour caractériser le régime "healthy". Néanmoins, deux d'entre elles ont dû être retravaillées du fait des évolutions trop drastiques qu'elles imposaient à certaines régions du monde ou en matière de réduction de la consommation de certains produits. Ainsi, les hypothèses formulées par Agrimonde-Terra en matière de régimes sains ont été ajustées sur les deux dimensions suivantes : (i) la place des légumineuses et (ii) la place des produits sucriers.

Révision des hypothèses d'Agrimonde-Terra en matière d'apports protéiques

L'application des hypothèses d'Agrimonde-Terra relatives aux produits riches en protéines conduirait à un fort déséquilibre de l'effort à fournir pour augmenter la consommation de légumineuses en substitution aux produits animaux entre certaines régions du monde. En effet, cette part n'augmenterait qu'à hauteur de 2 % en 2050 dans les régions à pays développés et de certains pays émergents comme la Chine ou le Brésil-Argentine, avec en parallèle une diminution assez importante du volume et de la part des produits animaux, l'effort de réduction des apports caloriques quotidiens de ces régions se portant principalement sur les produits animaux. *A contrario*, les différentes régions d'Afrique et d'Asie (hors Chine) verraient la part des légumineuses dans leurs régimes augmenter très fortement et ce jusqu'à 10 % en 2050, faisant porter sur ces régions tout l'effort d'accroissement de la consommation de légumineuses, nécessaires au rééquilibrage des régimes alimentaires.

Par ailleurs, bien que classées dans la catégorie des produits « riches en nutriments et en fibres », les céréales constituent, elles aussi, une source de protéines qui, bien que moins riches, doit être prise en compte dans la nécessaire substitution des protéines animales par des protéines végétales.

En conséquence, les hypothèses relatives à la structure des apports protéiques ont été retravaillées dans le but de réduire l'écart relatif entre pays développés, émergents et en développement concernant la part des légumineuses à atteindre à l'horizon 2050, et d'impliquer plus nettement les céréales dans la substitution protéines d'origine animale – protéines d'origine végétale. Ainsi, le seuil minimal de part des légumineuses dans les régimes alimentaires « sains » a été porté dans cette étude à 5 % contre 2 % dans la prospective Agrimonde-Terra.

Sévérité de la limitation de la part des produits sucriers à 2 % des apports caloriques

La limitation à 2 % de la part des produits sucriers (hors *sweeteners*/édulcorants) pour toutes les régions et quel que soit le point de départ des consommations actuelles, telle qu'elle est envisagée dans les régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra, a été jugée trop sévère au regard de certaines recommandations nutritionnelles. En outre, la formulation de cette règle la décale quelque peu avec celle retenue pour les produits animaux et pour les huiles d'origine végétale, qui tiennent davantage compte des situations historiques des différentes régions du monde.

Dans un rapport publié en 2015, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) fait une revue de la littérature scientifique afin de proposer des recommandations scientifiquement étayées en matière de consommation de sucres dits « libres » (WHO, 2015)[23]. Cette revue amène à deux types de recommandations, qualifiées de « *strong* » ou de « *conditional* », selon le niveau de confiance que les auteurs attribuent à l'équilibre entre bénéfices et désavantages de leur application. La recommandation « *strong* », dont les effets bénéfiques de la mise en œuvre sont les mieux établis (qualité modérée des résultats scientifiques acquis), consiste en un plafonnement de l'apport en sucres libres dans le régime à 10 % de l'apport calorique total, tandis que ce seuil est abaissé à 5 % dans la recommandation « *conditional* » (pour une qualité faible des résultats actuels).

Par ailleurs, notons que les sucres libres peuvent provenir de trois groupes de matières premières : « *Sugar plant and products* » (sucres de canne et de betteraves), « *Cereals* » (sucres issus de la transformation du maïs principalement, *i.e.* sirop de glucose-fructose = *sweeteners*), « Fruits & vegetables » (qui, une fois transformés, peuvent être des jus de fruits). Ainsi,

[23] Les sucres libres, "*free sugars*", sont définis comme "*all monosaccharides and disaccharides added to foods by the manufacturer, cook, or consumer, plus sugars naturally present in honey, syrups, and fruit juices*". Ils englobent à la fois les sucres ajoutés et les sucres naturellement présents dans le miel, les sirops et les jus de fruits (qui peuvent par ailleurs contenir également des sucres ajoutés. Ainsi, un jus de fruit ne contenant pas de sucres ajoutés contient néanmoins des sucres libres.

dans un régime dans lequel les apports de « Sugar plant and products » seraient plafonnés à 5 %, les apports totaux en sucres libres sont potentiellement supérieurs à 5 %.

Considérant ces divers éléments, la catégorie « *Sugar plant and products* » a, dans cette étude, été plafonnée à 5 % des apports caloriques totaux dans le régime sain, contre 2 % dans le régime "Healthy" d'Agrimonde-Terra.

Compte tenu de ces deux ajustements, les hypothèses qui sous-tendent les régimes "sains" appliqués aux différentes régions du monde définies dans l'étude AE2050 sont les suivantes.

Hypothèses relatives aux apports caloriques journaliers (cf. Tableau 3-1)

1. Les régions dont l'apport calorique journalier est initialement supérieur à 3 000 kcal/hab/j voient cet apport ramené à 3 000 kcal/hab/j en 2050 ;
2. Les régions dont l'apport calorique journalier est initialement inférieur à 2 750 kcal/hab/j voient cet apport augmenté à 2 750 kcal/hab/j en 2050 ;
3. Les régions dont l'apport calorique journalier est initialement compris entre 2 750 kcal/hab/j et 3 000 kcal/hab/j n'enregistrent aucun changement de leur niveau d'apport calorique entre « 2010 » et 2050.

Tableau 3-1. Synthèse des hypothèses sur les apports caloriques

	« 2010 »		2050	Régions AE2050
Apport calorique total par jour par habitant (kcal/hab/j)	> 3 000	↘	3 000	Europe // Brésil-Argentine // canada-USA // Chine // Ex-URSS // Proche et Moyen Orient // Afrique du Nord // Océanie
	2 750-3 000	↔	Idem	Reste de l'Amérique
	< 2 750	↗	2 750	Inde // Reste de l'Asie // Afrique de l'Ouest // Afrique Centrale, du Sud et de l'Est // Reste du Monde

Hypothèses relatives aux parts de chaque produit dans le régime (cf. Tableau 3-2)

Groupe des produits riches en protéines :

1. Dans les régions où l'apport calorique des produits animaux est supérieur à 20 % en « 2010 » :
   - La part du groupe de produits riches en protéines (produits animaux et légumineuses) est limitée en 2050 à 25 % de l'apport calorique journalier total[24] ;
   - La part des produits animaux dans l'apport calorique journalier est abaissé à 20 % et complétée par une part de 5 % de légumineuses en 2050 [25].
2. Dans les régions où l'apport calorique des produits animaux est inférieur à 12 % en « 2010 »[26] :
   - La part du groupe de produits riches en protéines (produits animaux et légumineuses) est fixée à 20 % de l'apport calorique journalier total ;
   - La part des produits animaux dans l'apport calorique journalier est relevée à 12 %, complétée par une part de 8 % de légumineuses en 2050 [27].
3. Dans les régions intermédiaires en « 2010 » (entre 12 et 20 % d'apport calorique par produits animaux) :
   - La part du groupe de produits riches en protéines (produits animaux et légumineuses) est également fixée à 20 % de l'apport calorique journalier total ;

[24] Dans les régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra, le groupe des produits riches en protéines représente 20 % de l'apport calorique du régime de 2050 pour toutes les régions.

[25] Contre respectivement 18 % et 2 % dans les régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra, l'écart entre les deux approches visant à accroitre l'effort de substitution protéines animaux – protéines végétales dans ces régions.

[26] Contre 10 % dans les régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra.

[27] Contre 10 % des apports caloriques de ces régions dans les régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra.

- La part des produits animaux dans l'apport calorique journalier est maintenue constante par rapport à « 2010 » et complétée jusqu'à 20 % par une part de légumineuses avec un seuil minimal de 5 % [28].

Groupe de produits riches en fibres et nutriments

- Dans les régions où la part des céréales est inférieure à 45 % en « 2010 », l'apport conjoint des produits riches en protéines (produits animaux et légumineuses) et des céréales est fixé à 65 % en 2050 et dans les régions où la part des céréales est supérieure à 45 % en « 2010 », l'apport conjoint des produits riches en protéines (produits animaux et légumineuses) et des céréales est fixé à 70 % en 2050.
- Les céréales secondaires représentent un tiers de l'ensemble du groupe céréales dans les régions où elles représentent plus de 20 % du groupe en « 2010 » et un quart dans les régions où elles représentent moins de 20 % du groupe en « 2010 ».
- Les fruits et légumes représentent 12 % de l'apport calorique total dans toutes les régions.

Limitation des produits gras et sucrés

- La part des huiles est arrondie à l'entier le plus proche lorsqu'en « 2010 », elle ne dépasse pas 10 % ; elle est amenée à 10 % dans le cas contraire.
- La part des sucres est plafonnée à 5 % dans toutes les régions en 2050[29].
- Les autres produits, incluant notamment les racines et tubercules, sont résiduels.

[28] Sous ces hypothèses, seule le Reste de l'Amérique est concernée par ce rehaussement des légumineuses à 5 % (au lieu de 3 % dans Agrimonde-Terra), la substitution se faisant alors sur les céréales.

[29] Contre 2% (hors « *sweeteners* ») dans l'application des régimes « Healthy » d'Agrimonde-Terra, telle qu'initialement envisagée

Tableau 3-2. Synthèse des hypothèses sur les parts relatives de chaque groupe de produits dans le régime sain

20-25% | <15%

Produits riches en protéines		Produits riches en nutriments et en fibres			Produits à limiter	
Animal products (meat, dairy, eggs, aquatic)	Pulses	Cereals (Maize, Wheat, Rice + Other cereals)*	Fruits and Vegetables	Other products	Vegetable Oils	Sugar and sweeteners

2009-11		2050			Régions AE2050
Animal products		Animal product	Pulses	Total	
≥ 20%	↘	20%	5%	25%	Europe // Brazil, Argentina // Canada, USA // China // FSU // Oceania //RoW
12-20%	↔	12-20%	Résiduel (5-8%)	20-22%	Near and Middle East // Rest of America // Rest of Asia
≤ 12%	↗	12%	Résiduel (8%)	20%	India // North Africa // West Africa // ECS Africa

	2009-11		2050	Régions AE2050
Fruits and Vegetables	< 12%	↗	12%	Toutes
Other products			Résiduel	Toutes

	2009-11		2050	Régions AE2050
Vegeteable Oils	> 10%	↘	10%	Europe (except Poland) //Brazil, Argentina // Canada, USA // Near and Middle East// Oceania // West Africa // RoW
	< 10%	↗	N supérieur %	Poland// China // FSU // India // North Africa // ECS Africa // Rest of America // Rest of Asia
Sugars (without sweeteners)	> 5 %	↘	5%	Toutes

2009-11		2050			Régions AE2050
Céréales		Produits riches en protéines		Céréales	
< 45%	&	25%	→	40%	Europe // FSU // Canada, USA // Brazil, Argentina // Oceania // RoW
< 45%	&	22%	→	43%	Rest of America
65%					
≥ 45%	&	25%	→	45%	China
≥ 45%	&	20%	→	50%	India // Rest of Asia // North Africa // Near and Middle East // ECS Africa // West Africa
70%					

Other cereals/Total cereals			Régions AE2050
2009-11		2050	
> 20%	↗	33%	Germany // Poland // Central Europe // Rest of Europe // West Africa // ECS Africa
< 20%	↗	25%	France // UK // South Europe // East Europe // Canada, USA // Brazil, Argentina // Rest of America // FSU // China // India // Rest of Asia // Near and Middle East // North Africa // Oceania // RoW

* Le groupe des céréales comprend les sucres issus de la transformation de céréales car la base de données GlobAgri est en produits primaires.

3.4. Comparaison des régimes « 2010 », 2050 « tendanciels » et 2050 « sains »

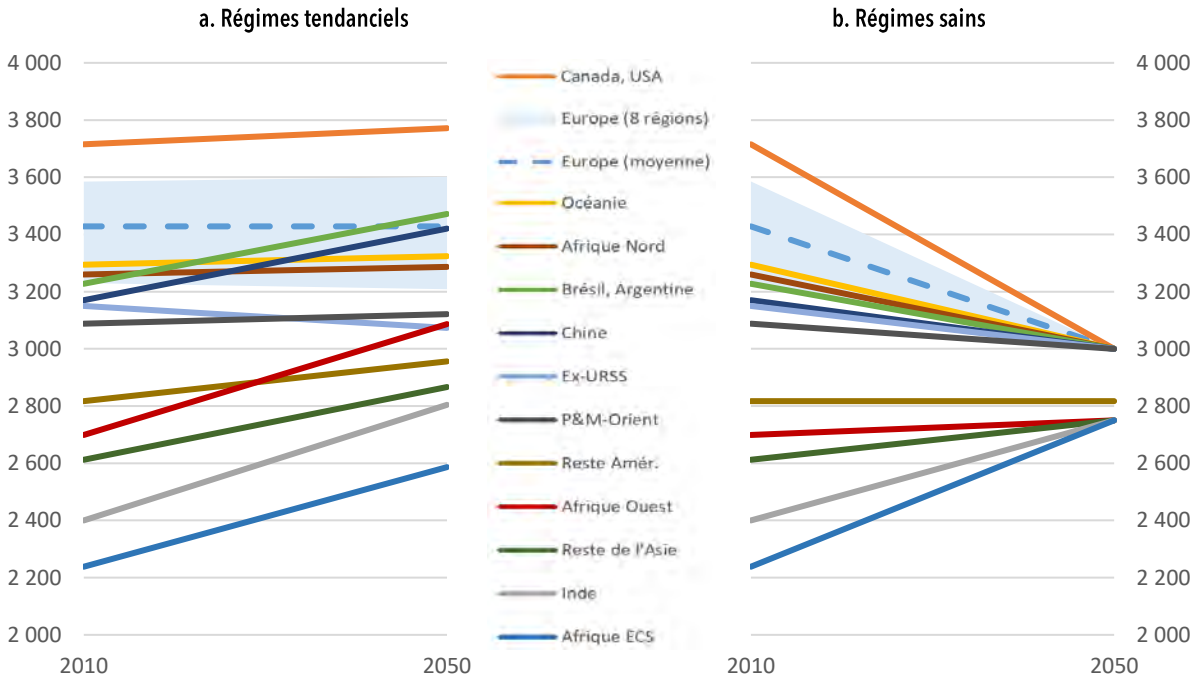
3.4.1. Comparaison des apports caloriques

Les régimes alimentaires « tendanciels », issus de l'application des projections Alexandratos & Bruisma (2012), correspondent, pour la majorité des régions, à une augmentation des apports caloriques totaux entre « 2010 » et 2050, plus ou moins marquée selon les régions. Ces évolutions, reportées dans la Figure 3-1, font tout d'abord apparaître une certaine stabilisation des apports caloriques quotidiens des régions « développées ». Ainsi, la consommation quotidienne du **Canada-USA**, des **régions européennes** et de l'**Océanie** reste élevée et atteint à l'horizon 2050 les niveaux respectifs de 3 750, 3 400 et 3 300 kcal par personne et par jour. La France et l'Allemagne restent proches des 3 600 kcal/hab/j, l'Europe de l'Est reste proche des 3 200 kcal/hab/j, tandis que les autres régions européennes avoisinent les 3 400 kcal/hab./j (cf. Tableau 3-3). Des niveaux à peine inférieurs et également stables sont projetés pour les régions **Afrique du Nord** (3 200 kcal/hab/j. en 2050) et **Proche & Moyen-Orient** (3 100 kcal/hab/j.).

D'autres régions du monde verraient également leurs apports caloriques quotidiens atteindre ou dépasser les 3 000 kcal/hab/j. Après des augmentations d'environ 7 % d'ici 2050, les apports caloriques quotidiens de la **Chine** et de la région **Brésil-Argentine** pourraient atteindre 3 400 kcal/hab/j. L'**ex-URSS**, l'**Afrique de l'Ouest** et le **Reste de l'Amérique** atteindraient, quant à eux, les 3 000 kcal/hab/j. mais en suivant des trajectoires différentes : les habitant de l'ex-URSS verraient leurs apports caloriques quotidiens se tasser et même chuter quelque peu, alors que l'augmentation seraient de 5 % pour le Reste de l'Amérique et de 14 % pour l'Afrique de l'Ouest.

En revanche et en dépit d'évolution d'ampleur également importante (respectivement + 16 %, + 14 % et + 9,4 %), les apports caloriques quotidiens des habitants de l'**Inde**, de l'**Afrique de l'Est, centrale et du Sud** (Afrique ECS) et du **Reste de l'Asie** seraient, en 2050, inférieurs à 3 000 kcal/hab/j., la région africaine (2 580 kcal/hab/j.) restant très en deçà des deux autres régions (proches de 2 800 kcal/hab/j.).

Figure 3-1. 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.)



L'hypothèse de régimes « sains » en 2050 est à l'origine, par construction, de différences d'évolution entre régions plus contrastées que l'hypothèse de régimes « tendanciels ». Pour une majorité de régions, les apports caloriques baissent entre « 2010 » et 2050, ce qui se traduit par des niveaux d'apports caloriques journaliers quasi-systématiquement moins élevés que ceux de la projection « régimes tendanciels » (Figure 3-1 et Tableau 3-3). Le décrochage attendu est spectaculaire pour des régions comme Canada-USA, la plupart des sous-régions européennes, Brésil-Argentine, Chine, Océanie, et même Afrique du Nord. Il est de moindre ampleur pour l'ex-URSS, le Reste de l'Amérique et le Proche & Moyen-Orient, tout comme pour l'Europe de l'Est. La croissance des apports caloriques entre « 2010 » et 2050 est ralentie en Inde, dans le Reste de l'Asie et en Afrique de l'Ouest. Seule la région Afrique de l'Est, centrale et du Sud présente une croissance de ses apports caloriques quotidiens plus forte selon la trajectoire « Régimes sains » que selon la trajectoire « Régimes tendanciels ».

3.4.2. Comparaison de la structure des régimes

Les Figures 3-2 et 3-3 et les Tableaux 3-3 et 3-4 présentent les évolutions de la structure des régimes dans chaque région du monde et selon les deux hypothèses d'évolution retenues.

Si les régimes évoluaient tendanciellement, la répartition des consommations selon les produits agricoles à l'horizon 2050 évoluerait peu dans les régions à « pays développés » telles que la région **Canada-USA**, l'**Océanie** et les différentes **régions d'Europe**. Le poids des produits animaux, des huiles végétales et des produits sucriers y serait encore élevé en 2050 : les produits animaux (viande, lait et œufs) représenteraient entre 25 et 30 % des kcal consommées quotidiennement, les huiles environ 16 % et les produits sucriers environ 9 %. La légère baisse des niveaux de consommation dans l'**ex-URSS** s'accompagnerait également d'une relative stabilité de la répartition selon les catégories de produits agricoles, au sein de laquelle la part des produits animaux et des huiles seraient cependant plus faibles que pour les régions précédentes (respectivement, 22 % et 9 % à l'horizon 2050).

Rejoignant des structures de consommation de même nature et poursuivant donc leur transition nutritionnelle, la **Chine**, la région **Brésil-Argentine**, le **Reste de l'Amérique** verraient surtout la part des produits animaux dans leur consommation augmenter de façon importante. Celle-ci passerait de 23 % à 27 % de la consommation alimentaire au Brésil-Argentine, de 20 % à 25 % en Chine et de 17 % à 20 % dans le Reste de l'Amérique. Le poids des huiles y évoluerait peu et resterait quelque peu en deçà des niveaux atteints dans les régions précédentes (entre 8 et 12 %). Enfin, la Chine se distingue par la faible place qu'occupent les produits sucriers dans la structure de consommation (4 % à l'horizon 2050 contre 12-13 % pour les deux autres régions).

Dans cette transition nutritionnelle, l'**Inde**, les différentes **régions d'Afrique** et, dans une moindre mesure, le **Reste de l'Asie**, font figure d'exception :

- L'Inde se distingue par le faible poids que représenterait, en 2050, la consommation de produits animaux (15 % avec notamment une très faible place de la viande, 4 %), les huiles et les produits sucriers atteignant 11 % de la consommation totale.

- La situation de l'Afrique de l'Est centrale et du Sud est marquée par une faible progression des parts de produits animaux, d'huiles et de produits sucriers, leurs projections restant à l'horizon 2050 à des niveaux faibles (10 % pour les produits animaux, 7 % pour les huiles et les produits sucriers). La dynamique est un peu la même en Afrique de l'Ouest, en Afrique du Nord et au Proche & Moyen-Orient : la part des produits animaux y resterait également faible en 2050 (aux environs de 10 % de la consommation totale) avec cependant une part des produits sucriers qui pourrait rester plus élevée (9 % en Afrique du Nord et au Proche & Moyen-Orient) ou plus faible (4 % en Afrique de l'Ouest) et une part des huiles qui pourrait s'accroître jusque 10-11 % en Afrique de l'Ouest et au Proche & Moyen-Orient.

- Le Reste de l'Asie suivrait une évolution au terme de laquelle la part des produits animaux avoisinerait les 17 % de la consommation totale, celle des huiles les 10 % et celle des produits sucriers les 9 %, mettant cet ensemble de pays en position intermédiaire entre les régions à transition nutritionnelle avancée et les régions maintenant une consommation à faible consommation de produits animaux.

En résumé, dans le cas d'une évolution tendancielle des régimes alimentaires la structure des régimes est relativement similaire entre l'année initiale « 2010 » et l'horizon 2050, suivant les projections adaptées d'Alexandratos et Bruinsma (2012), à quelques nuances près :

- Pour une très large majorité de régions, la part des céréales dans le régime baisse. Seule l'Afrique de l'Ouest garde une part de céréales constante et l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud voit sa part augmenter d'un point de pourcentage ;
- En Amérique Latine et au Proche & Moyen-Orient, la part des viandes et poissons dans le régime augmente ;
- En Asie, la part des produits animaux dans leur ensemble (c'est-à-dire produits laitiers et œufs inclus) ainsi que la part des huiles et des sucres augmentent ;
- En Afrique du Nord, la part des produits animaux dans leur ensemble augmente aussi ;
- En Afrique sub-saharienne, la part des produits classés « Autres » baisse, cela étant certainement liée à une baisse de la part des racines et tubercules, groupe relativement important dans ces régions.

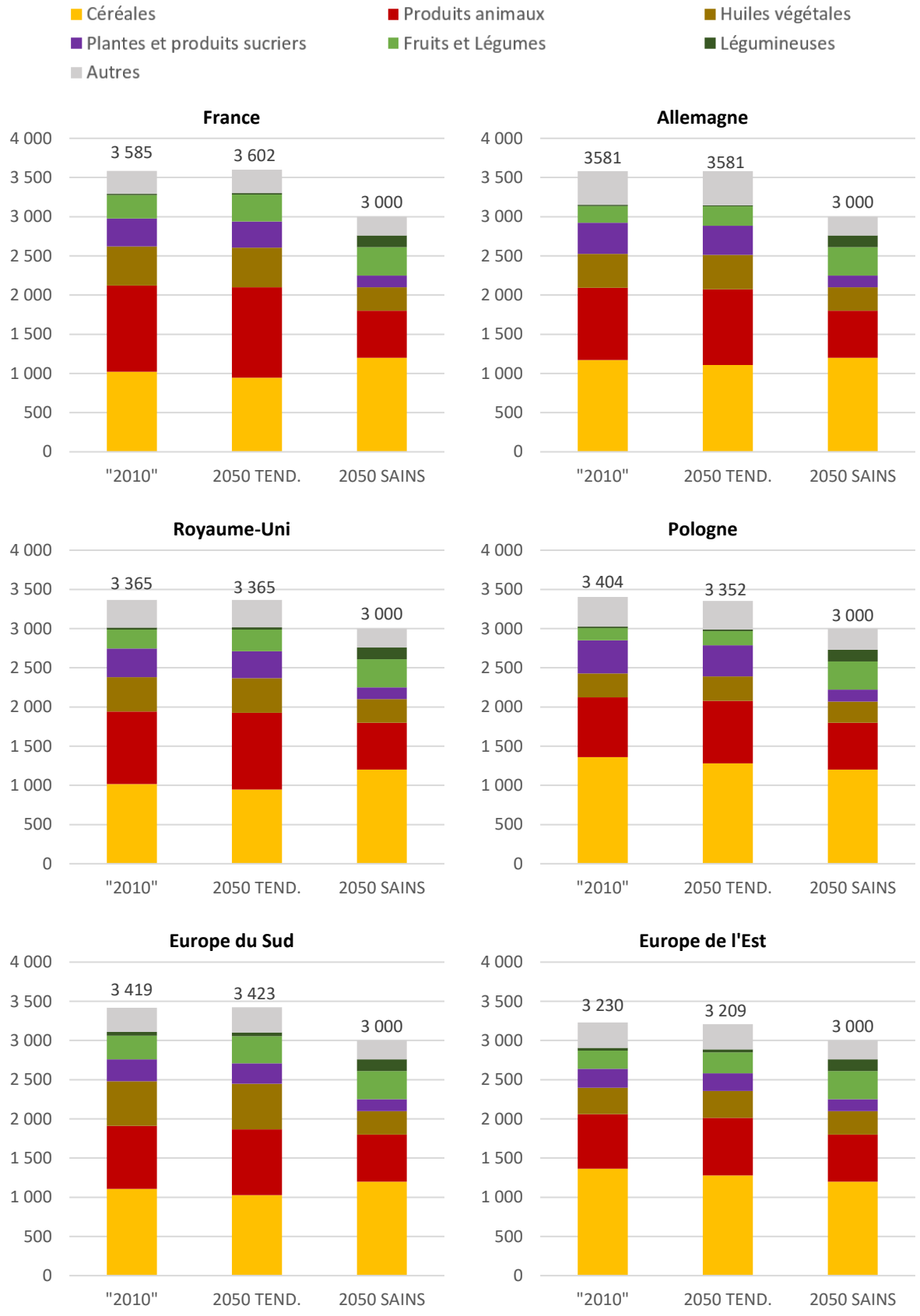
Cette première hypothèse reflète donc bien la tendance de transition nutritionnelle et d'urbanisation des régimes alimentaires mondiaux qui se caractérisent par une place importante faite, dans les régimes, à la viande et aux autres produits animaux, ainsi qu'aux produits transformés plus riches en huiles et sucres.

Lorsque l'on fait l'hypothèse d'une évolution vers des « régimes sains » à l'horizon 2050, la structure des régimes est, par construction, très différente puisqu'il s'agit d'une hypothèse de rupture forte par rapport au prolongement des tendances passées (même si les ajustements pris en compte ici par rapport aux niveaux de rupture envisagés par Agrimonde-Terra en limitent un peu l'ampleur). Cette rupture est très marquée pour les régions dont les régimes sont, dans la situation initiale, déjà très « urbanisés », c'est-à-dire les régions **Canada-USA**, les différentes régions d'**Europe** et l'**Océanie**, auxquelles on peut ajouter la région **Brésil-Argentine**. Dans ces régions, la baisse importante de la part des produits animaux, des produits sucriers et des huiles se traduit par une (ré)augmentation forte de la part des céréales et des fruits et légumes, l'augmentation de la part des légumineuses dans la consommation alimentaire de ces régions restant néanmoins limitée, passant d'environ 1 % à 5 %.

Pour les régions dont la structure de consommation a eu tendance, au cours des dernières décennies, à se rapprocher de celle des régions précédentes, comme la **Chine**, le **Reste de l'Amérique** et l'**ex-URSS**, la limitation de la croissance des apports caloriques associée aux hypothèses sur la composition des régimes alimentaires « sains », se traduit par le maintien à 2050 de la part des produits animaux et des huiles au même niveau que celles de « 2010 », seule la part des produits sucriers ayant tendance à chuter. Combinées aux hausses des parts de légumineuses et de fruits et légumes (imposées par nos hypothèses), ces tendances n'engendrent pas d'augmentation de la part des céréales dans les régimes alimentaires de ces trois régions. Celle-ci est maintenue à son niveau initial pour le Reste de l'Amérique et elle continue même de diminuer en Chine (passant de 50 % en « 2010 » à 45 % en 2050) et en ex-URSS (40 % en 2050 contre 43 % en « 2010 »).

Dans les régions où la part des produits animaux est initialement faible, l'évolution de la structure de consommation sous hypothèse de « régimes sains » se traduit par une augmentation forte de la part des fruits et légumes et des légumineuses et une baisse plus ou moins prononcée de la part des produits sucriers. C'est le cas en **Inde**, dans le **Reste de l'Asie**, les différentes régions d'**Afrique** (Afrique de l'Ouest, Afrique de l'Est, centrale et du Sud, Afrique du Nord) et le **Proche & Moyen-Orient**. En revanche, compte tenu de son faible poids initial, la part des produits animaux continue à y progresser (plus ou moins fortement), tout en restant néanmoins très en-deçà des niveaux atteints par les régions précédentes. Corrélativement, la part des huiles dans les régimes alimentaires reste stable, alors que celle des céréales continue à diminuer comme en Inde, dans le Reste de l'Asie et en Afrique du Nord, ou à se stabiliser comme dans les deux régions d'Afrique subsaharienne et au Proche & Moyen-Orient.

Figure 3-2. Régimes alimentaires caractérisant les régions européennes en « 2010 » et en 2050 selon les deux trajectoires d'évolution retenues (en kcal/h/j)



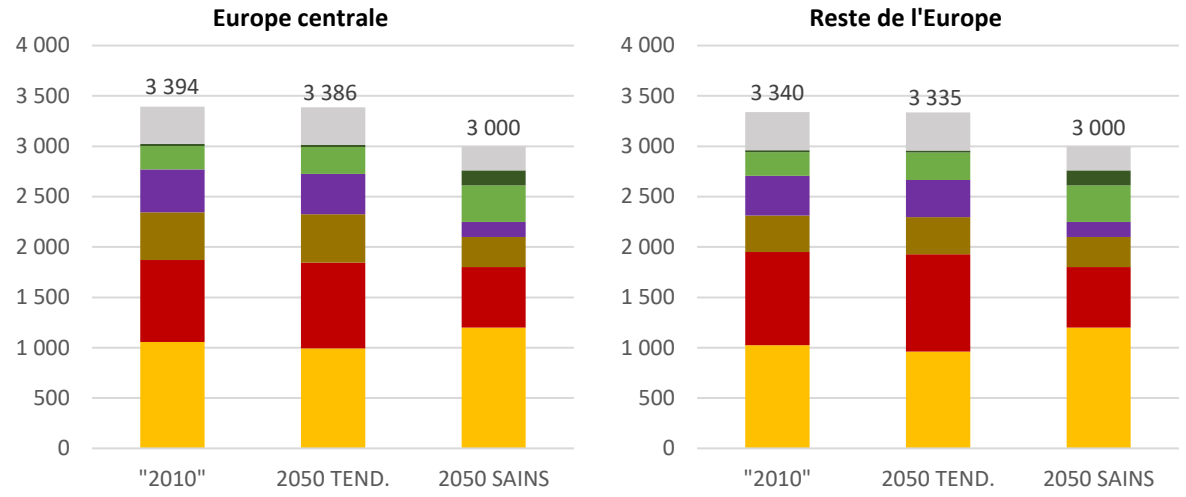


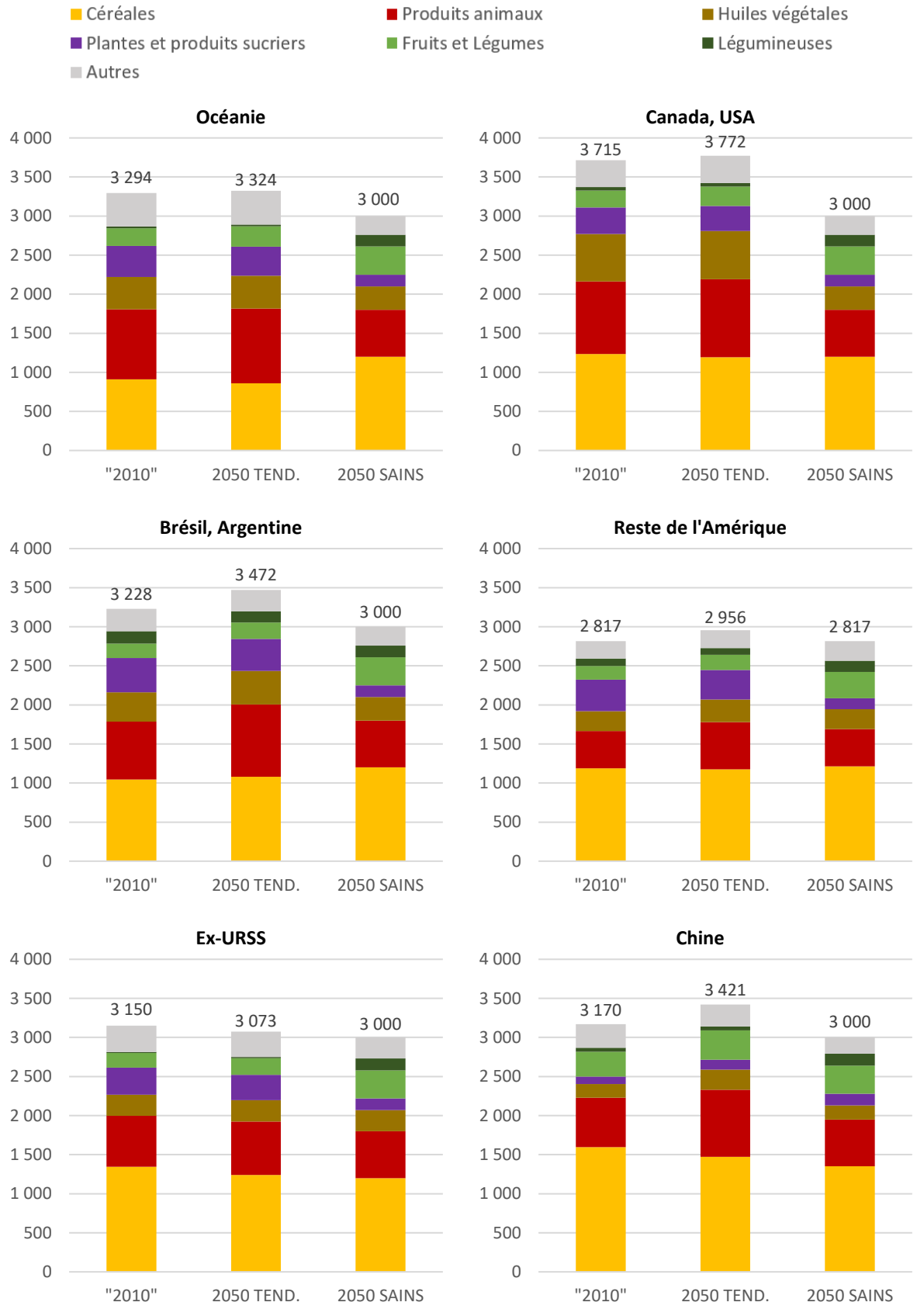
Tableau 3-3. Évolution des disponibilités alimentaires (en Kcal/hab/j) par grand groupe de produits entre « 2010 » et 2050 dans chacune des régions européennes selon les deux hypothèses d'évolution des régimes

	France			Allemagne			Royaume-Uni		
	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS
Céréales	1 023	947	1 200	1 170	1 109	1 200	1 017	948	1 200
Huiles végétales	497	504	300	432	438	300	437	443	300
Fruits et Légumes	297	342	360	213	246	360	241	278	360
Plantes et produits sucriers	359	336	150	398	373	150	366	343	150
Légumineuses	18	19	150	14	14	150	26	27	150
Autres	292	300	240	431	435	240	352	349	240
Produits animaux	1 099	1 153	600	923	966	600	926	977	600
TOTAL	**3 585**	**3 602**	**3 000**	**3 581**	**3 581**	**3 000**	**3 365**	**3 365**	**3 000**

	Pologne			Europe du Sud			Europe de l'Est		
	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS
Céréales	1 361	1 280	1 200	1 107	1 027	1 200	1 363	1 278	1 200
Huiles végétales	307	311	270	570	579	300	336	342	300
Fruits et Légumes	155	179	360	302	348	360	231	267	360
Plantes et produits sucriers	424	398	150	278	261	150	242	227	150
Légumineuses	19	19	150	47	49	150	37	38	150
Autres	378	365	270	310	318	240	324	322	240
Produits animaux	760	800	600	804	841	600	697	735	600
TOTAL	**3 404**	**3 352**	**3 000**	**3 419**	**3 423**	**3 000**	**3 230**	**3 209**	**3 000**

	Europe centrale			Reste de l'Europe		
	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS
Céréales	1 058	993	1 200	1 025	963	1 200
Huiles végétales	474	481	300	361	367	300
Fruits et Légumes	232	267	360	236	272	360
Plantes et produits sucriers	425	398	150	394	369	150
Légumineuses	23	24	150	20	21	150
Autres	369	371	240	378	378	240
Produits animaux	813	853	600	926	966	600
TOTAL	**3 394**	**3 386**	**3 000**	**3 340**	**3 335**	**3 000**

Figure 3-3. Régimes alimentaires caractérisant les régions du monde hors Europe en « 2010 » et en 2050 selon les deux trajectoires d'évolution retenues (en kcal/h/j)



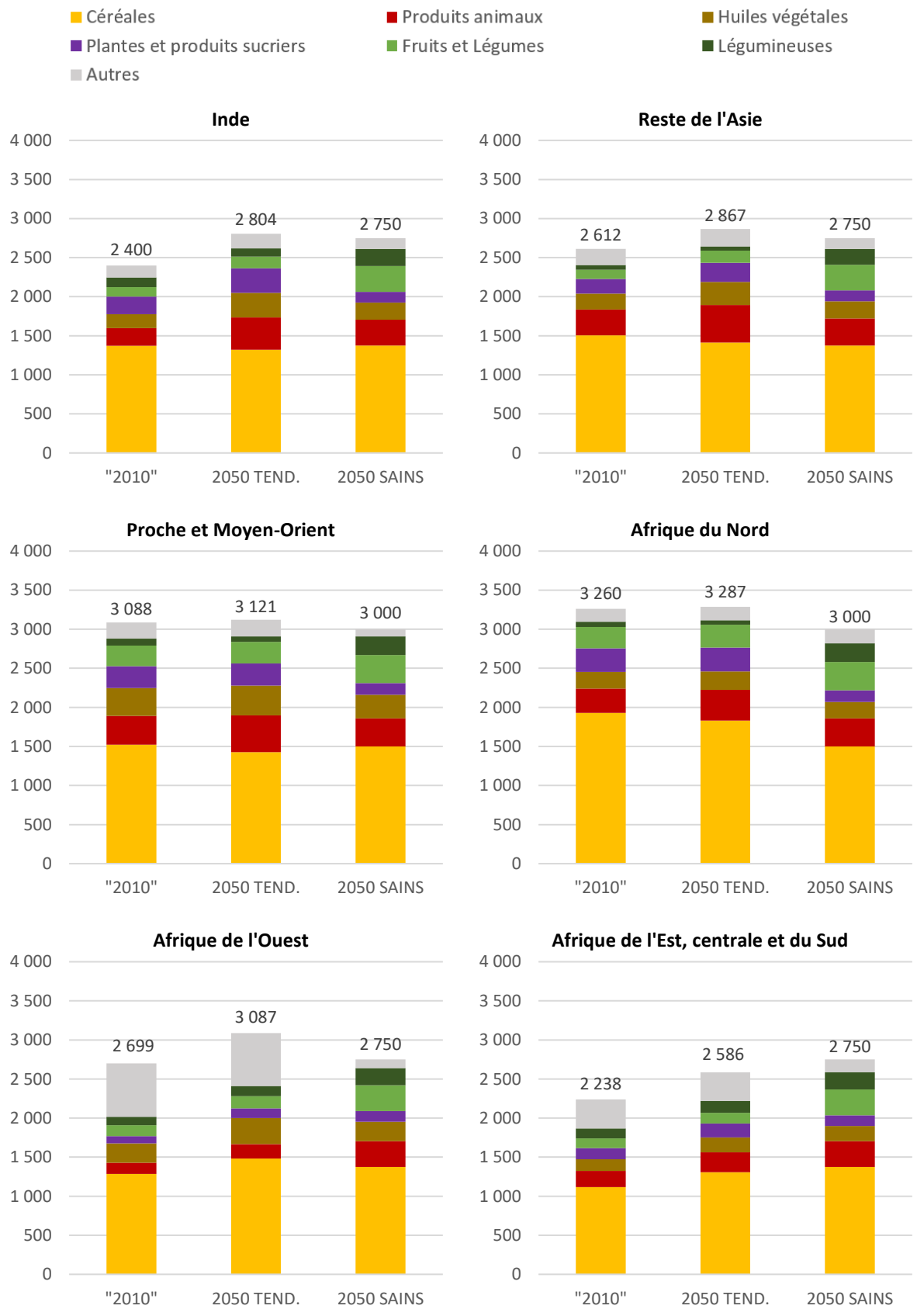

Céréales
Produits animaux
Huiles végétales
Plantes et produits sucriers
Fruits et Légumes
Légumineuses
Autres
Inde
2 400
2 804
2 750
Reste de l'Asie
2 612
2 867
2 750
Proche et Moyen-Orient
3 088
3 121
3 000
Afrique du Nord
3 260
3 287
3 000
Afrique de l'Ouest
2 699
3 087
2 750
Afrique de l'Est, centrale et du Sud
2 238
2 586
2 750
4 000
3 500
3 000
2 500
2 000
1 500
1 000
500
0
"2010"
2050 TEND.
2050 SAINS

Tableau 3-4. Évolution des disponibilités alimentaires (en Kcal/hab/j) par grand groupe de produits entre « 2010 » et 2050 dans chacune des régions du monde selon les deux hypothèses d'évolution des régimes

	EUROPE (moy.)			Océanie			Canada, USA			Brésil, Argentine			Reste de l'Am.			Ex-URSS			Chine		
	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS
Céréales	1 124	1 040	1 200	909	860	1 200	1 235	1 195	1 200	1 044	1 081	1 200	1 188	1 175	1 213	1 345	1 240	1 200	1 595	1 472	1 350
Huiles végétales	455	462	298	411	418	300	607	617	300	374	428	300	253	290	254	269	273	270	176	258	180
Fruits et Légumes	252	291	360	224	259	360	216	250	360	186	210	360	176	195	338	187	214	360	318	374	360
Plantes et produits sucriers	346	328	150	399	374	150	342	320	150	439	409	150	405	377	141	348	326	150	95	127	150
Légumineuses	29	29	150	22	22	150	43	44	150	157	142	150	93	83	141	13	14	150	52	50	150
Autres	349	352	242	430	434	240	345	349	240	286	275	240	225	231	254	336	324	270	301	280	210
Produits animaux	874	927	600	899	958	600	927	996	600	742	926	600	477	605	477	652	683	600	633	859	600
TOTAL	**3 428**	**3 428**	**3 000**	**3 294**	**3 324**	**3 000**	**3 715**	**3 772**	**3 000**	**3 228**	**3 472**	**3 000**	**2 817**	**2 956**	**2 817**	**3 150**	**3 073**	**3 000**	**3 170**	**3 421**	**3 000**

	Inde			Reste de l'Asie			P&M-Orient			Afrique du Nord			Afrique de l'Ouest			Afrique ECS		
	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS	"2010"	2050 TEND.	2050 SAINS
Céréales	1 372	1 321	1 375	1 507	1 413	1 375	1 522	1 427	1 500	1 928	1 831	1 500	1 286	1 483	1 375	1 117	1 307	1 375
Huiles végétales	179	314	220	202	295	220	355	382	300	213	236	210	247	333	248	149	191	193
Fruits et Légumes	120	149	330	118	154	330	267	276	360	271	291	360	137	155	330	124	136	330
Plantes et produits sucriers	227	314	138	188	245	138	278	283	150	302	306	150	94	124	138	143	179	138
Légumineuses	125	107	220	59	55	203	88	73	240	67	58	240	109	130	220	129	154	220
Autres	152	185	138	208	223	138	208	212	90	165	171	180	683	677	110	371	365	165
Produits animaux	224	414	330	330	481	347	370	470	360	314	393	360	143	185	330	205	254	330
TOTAL	**2 400**	**2 804**	**2 750**	**2 612**	**2 867**	**2 750**	**3 088**	**3 121**	**3 000**	**3 260**	**3 287**	**3 000**	**2 699**	**3 087**	**2 750**	**2 238**	**2 586**	**2 750**

Au final, si la poursuite des tendances passées ne modifie pas fondamentalement les régimes alimentaires des régions à pays développés, elle se traduit pour les régions à pays émergents ou en développement par une transition nutritionnelle plus prononcée avec une augmentation des apports caloriques, une réduction de la part des céréales dans les régimes au profit de la part des produits animaux, des huiles et des produits sucriers. Néanmoins, cette accentuation de la transition nutritionnelle ne pourra, à l'horizon 2050, se traduire par des régimes alimentaires similaires à ceux des régions à pays développés que dans le cas de la Chine, les autres régions à pays émergents ou en développement restant très en deçà des apports caloriques et des parts de produits animaux, sucres et huiles des régions à pays développés. Dans un tel contexte, l'adoption de régimes alimentaires « sains » constitue une vraie rupture pour les régions à pays développés, celle-ci nécessitant la mise en place de politiques publiques fortement incitatives aux modifications des comportements alimentaires. Avec le jeu d'hypothèses retenues, qui s'écartent quelque peu des hypothèses d'Agrimonde-Terra, la rupture est nettement moins prononcée pour les régions à pays émergents et en développement. Hormis dans le cas de la Chine et de l'Afrique du Nord où ils devraient baisser, les niveaux d'apports caloriques seraient proches de ceux qu'engendrerait la poursuite des tendances passées. Il faut néanmoins souligner le cas particulier de l'Afrique de l'Est, centrale et du Sud où le passage d'une évolution tendancielle des régimes à une évolution vers des régimes plus sains se traduit par une augmentation plus forte des apports caloriques par habitant et par jour dans le second cas (+23 %) que dans le premier (+15 %). Parallèlement, si on y enregistre bien une augmentation de la part des fruits et légumes et des légumineuses, la part des produits animaux et celle des huiles devrait continuer à augmenter ou au mieux à se stabiliser (à des niveaux inférieurs à ceux des régions à pays développés), ce qui n'entrainerait pas d'inversion de la tendance à la baisse de la part des céréales dans les régimes alimentaires des habitants de ces régions du monde.

3.5. Bilan : évolution de la demande alimentaire mondiale à l'horizon 2050

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. À l'échelle du Monde, elle augmenterait ainsi de +47 % sous hypothèse de régimes tendanciels, accroissement qui serait ramené à +38 % en cas de rupture vers des régimes sains (voir Tableau 3-5). Le facteur démographique joue ici 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 3-4 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 l'augmentation additionnelle des apports caloriques journaliers requise par l'adoption d'un régime sain.

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[30], verraient leur demande alimentaire augmenter fortement (de moitié, voire des 2/3) laissant supposer une **accentuation de la dépendance alimentaire de ces deux régions**[31].

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

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

[31] Voir Le Mouël et Schmitt, 2018.

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 de façon conséquente (+29 %) sous hypothèse de régimes tendanciels.

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

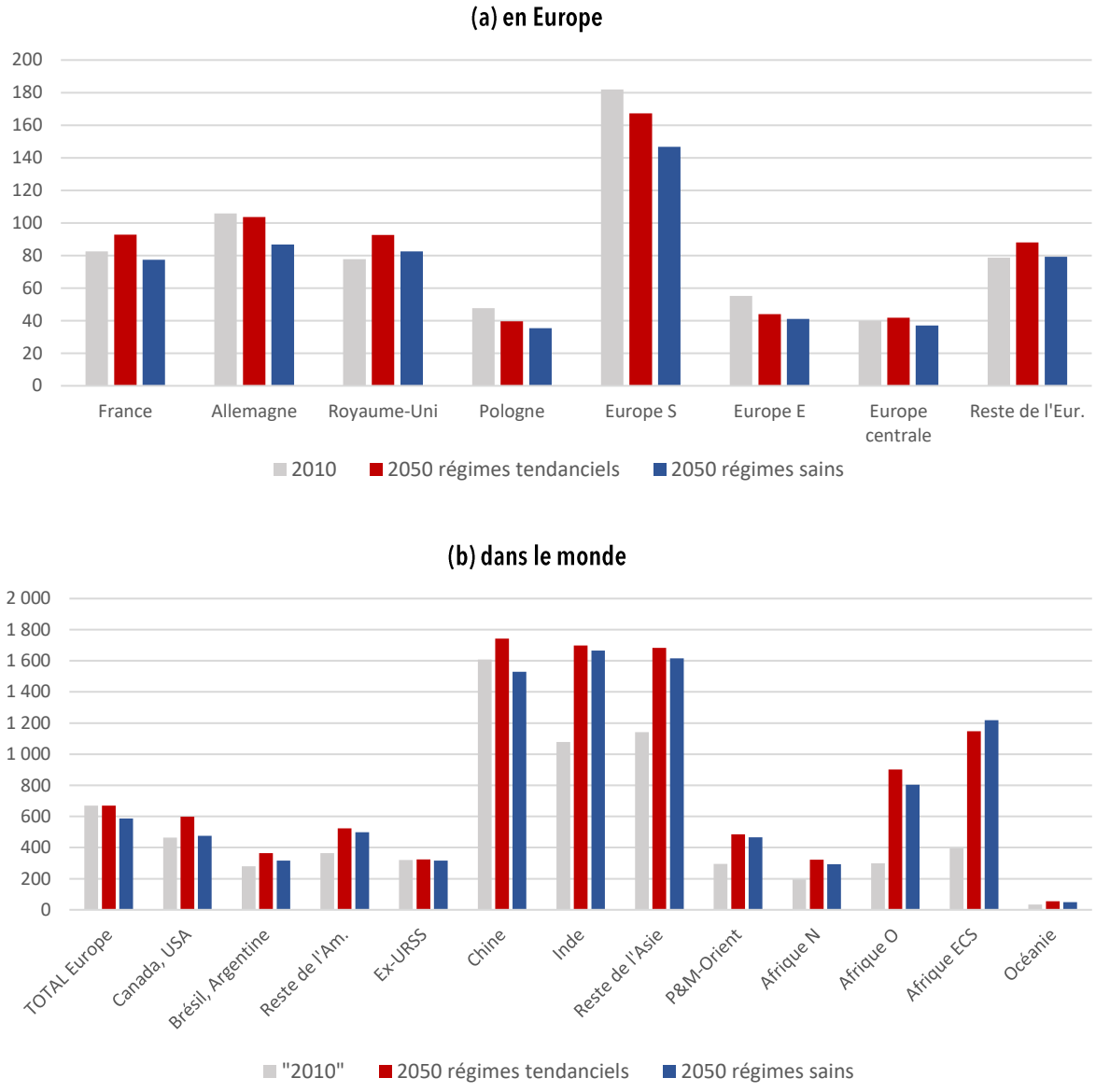


Tableau 3-5. Évolution de la demande alimentaire (en milliards de kcal) des 21 régions du monde entre "2010" et 2050

	"2010"			2050 Régimes tendanciels				2050 Régimes sains			
	Disponibilité par habitant (kcal/hab/j)	Demande totale régionale (Md kcal)	*Part dans la demande mondiale en "2010" (%)*	Variation de la dispo/hab par rapport à "2010" (%)	Demande totale régionale (Md kcal)	Variation de la demande par rapport à "2010" (%)	*Part dans la demande mondiale en 2050 (%)*	Var. de la dispo/hab par rapport à "2010" (%)	Demande totale régionale (Md kcal)	Variation de la demande par rapport à "2010" (%)	*Part dans la demande mondiale en 2050 (%)*
France	3 585	82	*1,2%*	0,5%	93	12,6%	*0,9%*	-16,3%	77	-6,2%	*0,8%*
Allemagne	3 581	106	*1,5%*	0,0%	104	-2,1%	*1,0%*	-16,2%	87	-18,0%	*0,9%*
Royaume-Uni	3 365	78	*1,1%*	0,0%	93	19,1%	*0,9%*	-10,8%	83	6,2%	*0,8%*
Pologne	3 404	48	*0,7%*	-1,5%	40	-16,8%	*0,4%*	-11,9%	35	-25,5%	*0,4%*
Europe Sud	3 419	182	*2,5%*	0,1%	167	-8,0%	*1,6%*	-12,3%	147	-19,4%	*1,5%*
Europe Est	3 230	55	*0,8%*	-0,7%	44	-20,3%	*0,4%*	-7,1%	41	-25,5%	*0,4%*
Europe centrale	3 394	40	*0,6%*	-0,2%	42	4,7%	*0,4%*	-11,6%	37	-7,2%	*0,4%*
Reste de l'Europe	3 340	79	*1,1%*	-0,2%	88	11,9%	*0,8%*	-10,2%	79	0,6%	*0,8%*
TOTAL Europe	**3 428 (moy)**	**669**	***9,4%***	**0,0%**	**670**	**0,1%**	***6,4%***	**-12,5%**	**586**	**-12,4%**	***6,0%***
Canada, USA	3 715	465	*6,5%*	1,5%	598	28,7%	*5,7%*	-19,3%	476	2,4%	*4,8%*
Brésil, Argentine	3 228	280	*3,9%*	7,6%	365	30,1%	*3,5%*	-7,1%	315	12,4%	*3,2%*
Reste de l'Am.	2 817	364	*5,1%*	4,9%	523	43,6%	*5,0%*	0,0%	498	36,8%	*5,1%*
Ex-URSS	3 150	319	*4,5%*	-2,4%	324	1,6%	*3,1%*	-4,8%	317	-0,8%	*3,2%*
Chine	3 170	1 609	*22,5%*	7,9%	1 743	8,4%	*16,6%*	-5,4%	1 529	-5,0%	*15,5%*
Inde	2 400	1 078	*15,1%*	16,8%	1 698	57,5%	*16,1%*	14,6%	1 665	54,4%	*16,9%*
Reste de l'Asie	2 612	1 141	*16,0%*	9,7%	1 684	47,5%	*16,0%*	5,3%	1 615	41,5%	*16,4%*
P&M-Orient	3 088	295	*4,1%*	1,1%	486	64,4%	*4,6%*	-2,8%	467	58,0%	*4,7%*
Afrique Nord	3 260	194	*2,7%*	**0,8%**	322	65,7%	*3,1%*	-8,0%	294	51,2%	*3,0%*
Afrique Ouest	2 699	300	*4,2%*	14,4%	902	201,0%	*8,6%*	1,9%	804	168,2%	*8,2%*
Afrique ECS	2 238	395	*5,5%*	15,6%	1 147	190,6%	*10,9%*	22,9%	1 219	209,0%	*12,4%*
Océanie	3 294	35	*0,5%*	0,9%	55	57,4%	*0,5%*	-8,9%	49	42,0%	*0,5%*
Reste du monde	2 439	4	*0,1%*	0,7%	3	-13,7%	*0,0%*	12,7%	4	-3,4%	*0,0%*
TOTAL Monde		**7 149**	***100,0%***	**6,0%**	**10 520**	**47,1%**	***100,0%***	**-6,5%**	**9 838**	**37,6%**	***100,0%***

Tableau 3-6. Évolution de la demande alimentaire mondiale et européennes par type de produits (en 1000 tonnes) entre "2010" et 2050

	"2010"	2050 Régimes tendanciels	2050 Régimes sains	Régimes tendanciels		Régimes sains	
Demande totale (1000 tonnes)	Demande totale (1000 t)			Variation de la demande par rapport à "2010" (1000 t)	Variation de la demande par rapport à "2010" (%)	Variation de la demande par rapport à "2010" (1000 t)	Variation de la demande par rapport à "2010" (%)
Céréales (Blé, mais, riz, autres)	1 133 766	1 521 520	1 478 880	387 754	34%	345 113	30%
dont Europe	69 683	64 762	73 725	-4 921	-7%	4 043	6%
Huiles (Palme, colza, soja, tournesol, autres)	71 232	123 769	90 956	52 537	74%	19 724	28%
dont Europe	10 021	10 176	6 573	155	2%	-3 448	-34%
Viandes (Bovine, petits ruminants)	76 965	131 239	105 123	54 274	71%	28 158	37%
dont Europe	9 875	9 958	6 801	83	1%	-3 074	-31%
Viandes (Porc, volailles)	200 803	366 210	221 652	165 407	82%	20 849	10%
dont Europe	32 577	35 723	22 343	3 147	10%	-10 234	-31%
Produits laitiers & Œufs	662 457	1 046 540	873 825	384 083	58%	211 368	32%
dont Europe	134 104	141 637	92 374	7 533	6%	-41 731	-31%
Fruits & Légumes	1 437 358	2 103 160	3 270 287	665 801	46%	1 832 928	128%
dont Europe	133 523	153 687	190 688	20 164	15%	57 164	43%
Légumineuses	45 822	71 671	157 125	25 850	56%	111 303	243%
dont Europe	1 532	1 528	7 680	-4	0%	6 148	401%
Sucres	1 081 493	1 714 215	986 770	632 722	59%	-94 723	-9%
dont Europe	99 650	93 807	43 510	-5 843	-6%	-56 141	-56%
Autres (Oléagineux, racines et tubercules, autres)	577 271	848 018	523 175	270 748	47%	-54 096	-9%
dont Europe	54 271	52 239	38 703	-2 032	-4%	-15 568	-29%
Produits aquatiques	128 105	161 365	177 295	33 260	26%	49 191	38%
dont Europe	12 157	12 387	8 323	230	2%	-3 833	-32%

Chapitre 4. Usages non alimentaires des productions agricoles : intégration des biocarburants dans GlobAgri-AE2050 pour l'ensemble des régions

Les utilisations non alimentaires des matières premières agricoles correspondent à leurs utilisations industrielles. Parmi elles, la production de biocarburants a fait l'objet d'un intérêt grandissant des politiques énergétiques et environnementales, notamment en Europe, pour répondre au défi posé par l'épuisement des ressources naturelles. En 2009, le conseil européen a adopté la *Renewable Energy Directive* (RED) fixant comme objectif d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables et 10 % d'énergies renouvelables dans le domaine des transports d'ici à 2020. RED II est adopté en 2016 pour fixer des objectifs plus ambitieux à l'horizon 2030. Le développement des biocarburants est associé à des enjeux importants en termes d'utilisation et de production de matières premières agricoles et d'usages des terres. Ainsi, il parait important de travailler cette composante particulière de l'agriculture dans l'étude AE2050, autrement dit d'isoler spécifiquement les usages des matières premières agricoles à des fins de production de biocarburants, et d'élaborer une hypothèse d'évolution de ces usages dans AE2050[32].

Nous présentons ici d'abord la méthode de quantification des usages de matières premières agricoles pour la production de biocarburants dans la situation initiale « 2010 », et ensuite la manière dont nous les avons projetées à l'horizon 2050.

4.1. Quantification des usages de produits agricoles pour la production de biocarburants en « 2010 »

Le secteur de production de biocarburants n'est pas directement représenté dans GlobAgri-AE2050 puisqu'il s'agit d'un modèle d'équilibre emplois-ressources des matières premières agricoles. Il est cependant considéré indirectement par les usages de différentes matières premières agricoles nécessaires pour la production de biocarburants. La source de données privilégiée de GlobAgri, FAOStat, ne distingue pas spécifiquement les usages de matières premières à destination du secteur des biocarburants des autres usages industriels (énergétiques, pharmaceutiques, cosmétiques, etc.). La première étape du travail consiste donc à distinguer ces usages, des autres usages non alimentaires. Pour ce faire, trois éléments doivent être connus pour quantifier la situation initiale « 2010 » : (i) la production de biodiesel et d'éthanol pour chaque région AE2050, (ii) la répartition de la production de biodiesel et d'éthanol selon les différents produits agricoles utilisés pour chaque région AE2050 et (iii) les coefficients de conversion du biodiesel et d'éthanol en matières premières agricoles.

4.1.1. La production d'éthanol et de biodiesel par région AE2050 en « 2010 »

Afin d'estimer la production de biocarburants dans notre situation initiale, nous avons procédé à l'analyse et la comparaison des données fournies par cinq sources différentes (Statistiques agricoles de l'OCDE-FAO[33], USDA Foreign Agricultural Service-Rapports Biofuels Annual[34], European Biodiesel Board [35], FO Licht World Biofuel Reports et Eurostat). Finalement, ce sont les données d'Eurostat que nous avons utilisées pour les niveaux de production de biodiesel pour les différents pays européen, et FO Licht pour les productions d'éthanol[36]. Pour les autres pays du monde, les données sur la production de biocarburants

[32] Dans les versions antérieures des projets GlobAgri, les utilisations non alimentaires de matières premières agricoles en 2050 étaient constantes par rapport à leur niveau moyen de « 2010 ».

[33] https://read.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/perspectives-agricoles-de-l-ocde-et-de-la-fao-2010_agr_outlook-2010-fr#page1

[34] https://www.fas.usda.gov/data/search?search_api_views_fulltext=biofuels

[35] http://www.ebb-eu.org/stats.php

[36] Nous avons considéré pour souci de simplification la production d'éthanol « total » et non pas la production d'éthanol carburant, car les projections de production de biocarburants que nous utilisons (CE, 2017 ; et FAO-OCDE, 2018) ne distinguent pas les projections pour l'éthanol carburant. D'après nos

sont principalement issues de la base de l'OCDE-FAO. Des données désagrégées par pays sont disponibles et nous les avons ensuite agrégés en région AE2050.

Ainsi estimée pour « 2010 » (*cf.* Tableau 4-2 *infra*), en Europe, la production d'éthanol représente 4,8 Mt et la production de biodiesel 9,5 Mt. La production mondiale d'éthanol est quant à elle de 76,6 Mt, avec la région Canada-USA comme principal producteur (39,6 Mt). Cette région est suivie par la région Brésil-Argentine (20,2 Mt), puis la Chine (6,2 Mt). La production mondiale de biodiesel représentait 18,5 Mt, avec la région Brésil-Argentine comme le principal producteur (3,8 Mt), suivie par l'Allemagne (2,9 Mt), la région Canada-USA (2,2 Mt) puis la France (2 Mt).

4.1.2. Les matières premières agricoles utilisées dans la production d'éthanol et de biodiesel en « 2010 »

Comme dit plus haut, les quantités de matières premières agricoles utilisées pour la production de biocarburants ont été estimées à partir d'informations, lorsqu'elles sont disponibles, sur la répartition de la production de biocarburants par matières premières, ou à partir de quantités de matières premières estimées directement par certaines sources. Nous avons ensuite utilisé des coefficients de transformation (Tableau 4.A en Annexe de ce Chapitre) pour convertir les quantités de biocarburants en matières premières agricoles correspondantes. Dans le cas des quantités de matières premières estimées directement, nous les avons ajustées pour correspondre aux niveaux de production de biocarburants tels que définis dans la section précédente.

Nous avons privilégié les données de la base FAO-OCDE, la plus complète et la plus cohérente selon les différentes sources consultées. Celles-ci présentent cependant certaines limites liées à leur agrégation à la fois géographique (l'Europe est considéré comme un seul bloc notamment) et en termes de nomenclature produits (par exemple, le détail du type d'huile utilisée pour la production de biodiesel n'est pas fourni). Dans ce dernier cas, nous avons complété par des données plus détaillées provenant de l'USDA et de FO-Licht.

En ce qui concerne l'information chiffrée sur les matières premières utilisées au niveau de chaque pays/région européenne AE2050, elle est très rarement disponible. Une recherche plus approfondie par pays européen est donc réalisée afin d'élaborer des hypothèses sur les parts respectives des différentes matières premières utilisées dans la production de biodiesel et d'éthanol[37].

La clé de répartition de la production de biocarburants entre différentes matières premières ainsi estimée permet de calculer les quantités de matières premières utilisées pour la production de biocarburants dans la situation initiale « 2010 » du modèle GlobAgri-AE2050 pour chaque région AE2050, en utilisation les coefficients de transformation présentés en Tableau 4.A en Annexe du chapitre. La répartition de la production de biocarburants entre différentes matières premières agricoles est présentée par région dans les Figures 4-3 à 4-6, et les quantités de matières premières correspondantes dans les Tableaux 4.B à 4.E en Annexe.

4.2. Élaboration des projections des usages de matières premières pour biocarburants à 2050

Pour établir les projections à l'horizon 2050, on s'appuie principalement sur les projections du rapport de la Commission Européenne – EU Agricultural Outlook 2017-2030 (EC, 2017) – pour l'Europe et sur les projections FAO-OCDE – OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027 (OCDE/FAO, 2018) – pour les autres régions du modèle. Il est à noter que ces deux rapports prennent en compte la production d'éthanol total et non pas uniquement l'éthanol carburant. Afin de faciliter l'utilisation de ces projections et de minimiser le nombre d'hypothèses à formuler, nous avons décidé de considérer aussi la production d'éthanol total.

estimations, la production d'éthanol carburant représente 60% de la production d'éthanol total en Europe et 83% dans le monde. On utilise les données Fo-Licht pour calculer la production d'éthanol total des pays européens à partir des données Eurostat.

[37] Basée sur l'analyse et la comparaison des différentes sources de données, notamment nationales pour les deux principaux producteurs européens France et l'Allemagne.

Nous présentons d'abord la synthèse des hypothèses tirées des perspectives de la Commission Européenne et de la FAO-OCDE et ensuite de façon plus précise les hypothèses retenues pour AE2050.

4.2.1. Hypothèses tirées des perspectives pour l'Europe (CE, 2017)

Le développement du marché des biocarburants en Europe est stimulé par trois directives européennes :

- La *Renewable Energy Directive* qui impose 20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique total en 2020 et 10% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique des transports). A noter que depuis Janvier 2018 une seconde version de RED existe imposant 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 ;

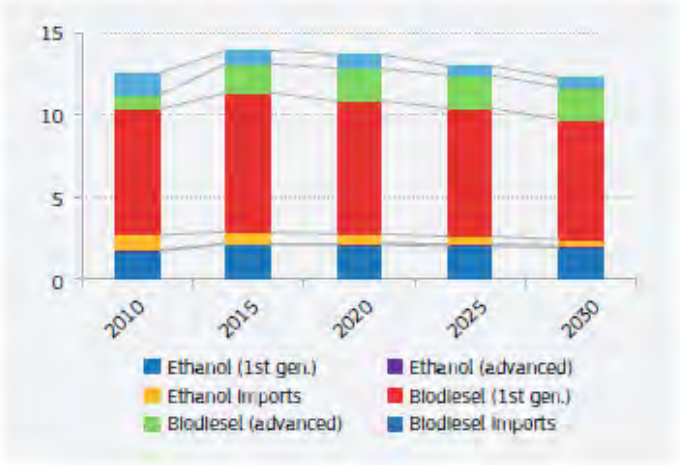
- La *Fuel Quality Directive* (FQD) impose des seuils de réduction des émissions de GES à 2020 ;

- La directive *Indirect Land Use Change* (ILUC) qui impose un plafond pour les énergies renouvelables provenant de cultures en concurrence avec l'alimentation humaine ou l'alimentation du bétail à 7%.

Le rapport EC (2017) ne prend pas en compte les propositions de RED II à cause des trop grandes incertitudes sur ses effets au moment de la rédaction du rapport. Ces projections supposent donc le *statu quo* après 2020 mais restent incertaines puisqu'elles dépendent fortement de l'environnement politique et économique.

De plus, il n'y a pas pour l'instant de véritables signaux forts d'investissement dans la recherche sur les biocarburants de 2nde génération. On attend cependant que l'augmentation des parts des huiles recyclées et graisses animales se poursuive d'ici à 2030 grâce à la mesure incitative qui consiste à double compter les quantités de biocarburants issus de ces produits. La croissance est toutefois limitée par la disponibilité de ces huiles/graisses recyclées et le coût de récupération de ces huiles. Ainsi, la part des biocarburants dans l'énergie totale des transports est supposée égale à 5,8% en 2030 et la part des biocarburants de 1ère génération dans l'énergie totale des transports est attendue à la baisse de 4,2% à 4% en 2030 grâce à l'augmentation marginale de la production des biocarburants de deuxième génération. En terme de niveaux absolus, ces projections prévoient une réduction de l'utilisation des biocarburants due à une réduction de l'utilisation du carburant total (Figure 4-1).

Figure 4-1. Consommation de biocarburant de l'UE selon différentes sources (en million de tonnes équivalent pétrole)

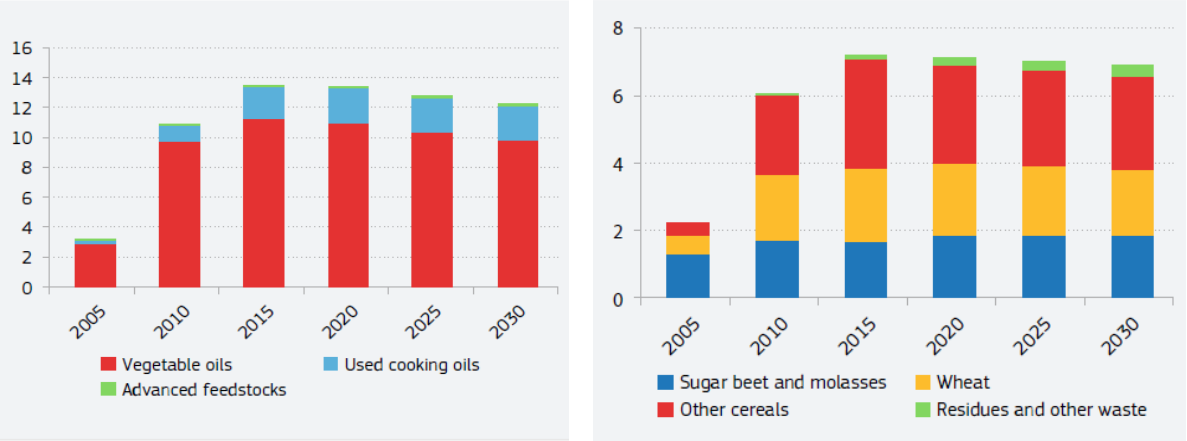


Source : EU Agricultural Outlook 2017-2030 (2017)

Des hypothèses sont aussi faites sur les matières premières utilisées dans la production de biodiesel et d'éthanol (Figures 4-2 et 4-3). La part des huiles végétales entrant dans la composition du **biodiesel** est amenée à décroitre au profit des huiles/graisses recyclées. À noter que le détail de la composition interne du groupe *vegetable oils* n'est pas donné. Concernant l'**éthanol**, il est attendu une augmentation de l'utilisation de la betterave et des mélasses du fait de la suppression des quotas sucriers en 2017, et une augmentation du recours aux résidus. Le maïs reste la matière première privilégiée au niveau européen.

Figure 4-2. Composants de la production de biocarburant de l'UE (en milliard de litres)

(a) biodiesel (b) éthanol



Source : EU Agricultural Outlook 2017-2030 (2017)

4.2.2. Hypothèses tirées des perspectives pour les autres régions du monde (OCDE/FAO, 2018)

Les projections 2018-2027 du rapport OCDE/FAO (2018) supposent que le développement du marché des biocarburants dépend des politiques énergétiques nationales actuelles et des incitations mises en place par celles-ci (subventions, taxes), de l'évolution des prix du pétrole et de l'environnement macroéconomique général et sont donc incertaines. À l'horizon 2027, il est supposé que la majeure partie des biocarburants sera encore produite à partir de matières premières agricoles c'est-à-dire que la production de biocarburants de seconde génération « ne décollera pas ». On s'attend aussi à ce que le commerce de biocarburants reste marginal, les pays produisant davantage pour satisfaire leur demande domestique. Les prix du pétrole brut sont supposés augmenter de 40 % en terme nominaux d'ici à 2027 jusqu'à 90 USD le baril. Ceci aura pour effet de ralentir la demande de pétrole et donc de biocarburants sous l'hypothèse que les *taux d'incorporation* restent fixes. L'augmentation de la production de biocarburants au niveau mondial sera surtout le fruit des pays émergents et en développement. Dans les pays développés, on prévoit une stagnation voire une décroissance de la production de biocarburants.

4.2.3. Évolution des volumes de production de biocarburants dans AE2050

Pour estimer l'évolution de la production de biocarburants d'ici à 2050, on s'appuie sur les résultats de la perspective européenne 2017 pour les sous-régions Europe AE2050 et sur les résultats de la perspective FAO-OCDE 2018 pour les autres régions AE2050. L'horizon temporel de ces projections est différent de celui de l'étude AE2050 (2030 et 2027 versus 2050). **Nous proposons alors de maintenir le taux d'incorporation des biocarburants dans l'énergie des transports constant entre 2030 et 2050 pour établir les volumes de production de biocarburants en 2050.** Le taux d'incorporation est la part des biocarburants dans la demande d'énergie par le secteur transports en MTEP (millions de tonnes équivalent pétrole).

Nous avons retenu le scenario *Current Policies* du rapport World Energy Outlook 2016 de l'IEA (IEA, 2016) pour déterminer la demande d'énergie du secteur transport en 2030 et 2050. Dans ce scénario il est supposé qu'aucune nouvelle politique est mise en place après 2016 et que les mandats sont prolongés jusqu'en 2040. Puisque la prospective s'arrête en 2040, on prolonge la demande énergétique des transports à 2050 en supposant une évolution identique entre 2030-2040 et 2040-2050. Connaissant la demande énergétique du secteur transport en 2030 et en 2050[38], on peut calculer le taux d'incorporation de biocarburants en 2030 pour chaque région AE2050, puis le maintenir constant et calculer la production de biocarburants en 2050.

[38] Le rapport World Energy Outlook détaille les projections de demande d'énergie par grand pays ou zone du monde, au total 18 pays/grandes zones sont distingués.

Ce faisant, deux cas de figure se présentent (Tableau 4-1) :

- Dans les sous-régions européennes et en Océanie cela engendre en 2050 une baisse de la production de biocarburants par rapport à 2030 car la perspective IEA (2016) prévoit une baisse de la consommation d'énergie dans les transports après 2030. On décide alors de maintenir le niveau de production de 2030.

- Dans les autres régions cela engendre une augmentation de la production par rapport à 2030. On utilise alors directement cette production calculée pour 2050.

Tableau 4-1. Récapitulatif des sources de données et règles de calcul retenues dans AE2050 pour calculer la production de biocarburants (éthanol total et biodiesel) à l'horizon 2050

	« 2010 »	2030	2050
Pays européens	FO-Licht pour les productions d'éthanol. Eurostat pour les productions de biodiesel	Répartition constante de la production européenne entre les différents pays par rapport à « 2010 ».	Volumes de production constants par rapport à 2030.
Total Europe	Somme des pays européens	Perspectives CE (2017) : projections de production à 2030.	Volume de production constant par rapport à 2030.
Autres régions (sauf Océanie)	Rapport FAO/OCDE (2018)	Rapport FAO/OCDE (2018) : projections des productions à 2027.	Taux d'incorporation de 2030 constant vs demande d'énergie pour le transport du scénario « Current Policies » prolongée à 2050 (World Energy Outlook, IEA, 2016) [39]
Total monde	Somme tous pays	Somme tous pays	Somme tous pays

Ainsi recalculé, le taux d'incorporation des biocarburants dans le total énergétique dans le monde en 2050 serait d'environ 3 %[40] contre 4 % dans le scénario de l'IEA (2016) et avec de fortes disparités inter-régionales. La projection retenue pour AE2050 est donc plus conservatrice que le scénario supposé conservateur de l'IEA (2016). En effet, les volumes de production FAO-OCDE, Eurostat et Fo-Licht utilisés dans GlobAgri-AE2050 sont plus faibles que ceux utilisés par l'IEA (2016) déjà pour la situation initiale[41] .

Le Tableau 4-2 présente les quantités de biodiesel et d'éthanol produites en 2050 selon la méthode de calcul décrite précédemment. Au niveau mondial, les productions de biodiesel et d'éthanol augmentent respectivement de 126 % et 61 % par rapport à l'année initiale « 2010 » pour atteindre 42 Mt et 123 Mt en 2050.

En Europe, la croissance des productions de biodiesel et d'éthanol est plus faible puisque la production n'augmente que de 19 % dans le premier cas et 14 % dans le second pour atteindre 11,3 Mt de biodiesel et 5,5 Mt d'éthanol. L'Europe reste le premier producteur mondial de biodiesel en 2050. Ne disposant pas de projections détaillées par pays européens, la part de chaque région dans la production totale reste inchangée par rapport à « 2010 ».

Dans le reste du monde, la production de biodiesel et d'éthanol augmente de façon importante dans toutes les régions à l'exception de l'Océanie (+13 % pour le biodiesel et +3 % pour l'éthanol). La région Brésil-Argentine reste le plus grand producteur de biodiesel, après l'Europe, avec 11 Mt. Cette région est suivie par le Reste de l'Asie avec environ 10 Mt et par la région Canada-USA (6,5 Mt). Pour l'éthanol, les régions Canada-USA et Brésil-Argentine restent les plus gros producteurs d'éthanol (resp. 49 Mt et 37 Mt). Les régions Inde et Reste de l'Asie voient leur production augmenter très nettement et dépassent ainsi la région Reste de l'Amérique (resp. 6, 6,4 et 5 Mt).

[39] À l'exception de l'Océanie qui garde le même volume de production en 2050 qu'en 2030.

[40] Ce taux était de 2.5% dans la période de référence « 2010 ».

[41] 74 Mtep dans le monde en 2014 pour l'IEA contre 57 Mtep pour AE2050 en « 2010 ».

Tableau 4-2. Productions de biocarburants dans le monde pour l'année « 2010 » et à l'horizon 2050

	BIODIESEL (1000 t)				ETHANOL (1000 t)			
	« 2010 »	**2050**	**VARIATION (+)**	**%**	**« 2010 »**	**2050**	**VARIATION (+)**	**%**
France	1 991	2 364	373	19%	1 438	1 660	222	15%
Allemagne	2 866	3 404	538	19%	803	927	124	15%
Royaume-Uni	177	211	33	19%	482	556	74	15%
Pologne	369	438	69	19%	206	238	32	15%
Europe du sud	1 918	2 278	360	19%	502	580	78	15%
Europe de l'Est	221	262	41	19%	225	260	35	15%
Europe centrale	563	668	106	19%	345	398	53	15%
Reste de l'Europe	1 393	1 654	261	19%	763	881	69	15%
Total Europe	***9 498***	***11 280***	**1 782**	**19%**	***4 764***	***5 500***	**736**	**15%**
Canada-USA	2 188	6 579	4 391	201%	39 619	49 199	9 580	24%
Brésil-Argentin	3 815	10 912	7 097	186%	20 224	36 938	16 714	83%
Reste de l'Amérique	344	1 265	921	268%	1 749	5 039	3 290	188%
Ex-URSS					748	868		
Chine	563	1 022	460	82%	6 218	12 067	5 848	94%
Inde	76	443	367	484%	1 211	6 044	4 833	399%
Reste de l'Asie	1 982	10 311	8 329	420%	1 459	6 379	4 920	337%
Proche et Moyen Orient					58	307		
Afrique du Nord					38	50		
Afrique de l'Ouest					4	73		
Océanie	77	87	10	13%	248	254	7	3%
Afrique Est, centrale et Sud					216	598		
Total Monde	***18 543***	***41 900***	**23 358**	**126%**	***76 556***	***123 314***	**46 758**	**61%**

4.2.4. Évolution de la part des matières premières impliquées dans la production de biocarburants

Pour faire évoluer les parts des différentes matières premières impliquées dans la production de biocarburants on procède en deux temps (Tableau 4-3). D'abord, on fait évoluer ces parts entre 2010 et 2030 d'après les informations disponibles dans les perspectives EC (2017) et OCDE/FAO (2018). Lorsque les données ne sont pas disponibles dans ces rapports on conserve les mêmes hypothèses de répartition que dans la situation initiale. Puis on suppose qu'après 2027/30, les quantités produites supplémentaires par rapport aux niveaux de 2030 sont le fruit des technologies dites de 2e génération, c'est-à-dire des technologies qui utilisent des matières premières qui ne rentrent pas en concurrence *directe* avec l'alimentation humaine. Comme évoqué précédemment, dans les régions où la projection de biocarburants à 2050 était inférieure à la projection 2030, c'est le cas pour les sous-régions européennes et l'Océanie, on considère que la production de biocarburants se maintient entre 2030 et 2050 et que la différence entre la projection 2030 et la projection 2050 sera une production de biocarburants 2ème génération. Pour les autres régions du modèle, la totalité de l'augmentation de la production entre 2030 et 2050 sera due à l'apparition des biocarburants 2e génération.

Tableau 4-3. Récapitulatif des sources « Part des matières premières ou types de biocarburants »

	« 2010 »	**2030**	**Hypothèses 2050**
Pays dont la demande d'énergie dans les transport diminue entre 2030 et 2050 (Europe et Océanie)	Rapport OCDE/FAO (2018) complété par les données USDA et FO-licht[42].	Projections du rapport OCDE/FAO (2018). Parts constantes pour les données USDA et FO-Licht	Niveau de production de biocarburants constant (en tonnes) vs 2030. Part 1G : taux d'incorporation constant vs 2030 Part 2G : différence niveau 2050 (= niveau 2030) et la part 1G
Pays dont la demande d'énergie dans les transport augmente entre 2030 et 2050 (toutes les autres régions)	Rapport OCDE/FAO (2018) complété par les données USDA et FO-licht.	Projections du rapport OCDE/FAO (2018). Parts constantes pour les données USDA et FO-Licht	Taux d'incorporation constant Part 2G : différence niveau 2050 et niveau 2030

Pour les sous-régions Europe, on ne dispose pas de données détaillées par sous-région mais la lecture du rapport de la CE (2017) suggère de garder constante les parts des différentes matières premières pour la production d'**éthanol** par rapport à la situation moyenne « 2010 ». Le seul changement par rapport à la situation initiale est donc l'apparition des biocarburants de 2eme génération (Figure 4-4). Ces derniers représenteraient en Europe 10% de la production totale d'éthanol en 2050.

Pour le **biodiesel** on fait l'hypothèse que le niveau des huiles recyclées/graisses double ce qui résulte en une plus grande part faites aux huiles recyclées par rapport aux huiles conventionnelles (Figure 4-5). L'autre différence par rapport à la situation initiale est l'apparition des biocarburants de deuxième génération. Ces biocarburants représenteraient 9% de la production totale de biodiesel en Europe en 2050.

Pour les autres régions du monde, nous utilisons les données de la base statistique FAO-OCDE pour l'année 2027. Pour les produits du **biodiesel**, nous n'avons pas le détail de la catégorie *huiles végétales*, on conserve alors les hypothèses élaborées pour la situation initiale. Que ce soit pour les produits servant à produire de l'éthanol ou du biodiesel, la répartition reste stable entre 2010 et 2050, la principale différence étant l'apparition des biocarburants de 2ème génération qui vient combler la différence de niveau de production entre 2030 et 2050 (Figure 4-5 et 4-6).

Selon nos hypothèses, les biocarburants de deuxième génération représenteraient ainsi au niveau mondial 20 % de la production totale de biodiesel et 18 % de la production totale d'éthanol, les principaux producteurs de ce type de biocarburants se trouveraient pour l'éthanol en Asie (Chine, Inde, Reste de l'Asie) et dans la région Brésil-Argentine, et pour le biodiesel dans le reste de l'Asie et la région Brésil-Argentine.

[42] Certaines données de la base OCDE/FAO sont agrégées dans une catégorie « Autres pays » ou « Oils for feedstock ». Nous avons renseigné les matières premières pour la production de biocarburants des pays présents dans notre base « Production » avec des données USDA (Argentine, Australie, Brésil, Canada, Chine, Colombie, Guatemala, Inde, Japon, Paraguay, Pérou, Thailand) et FO-Licht (USA, Singapour)

Figure 4-3. Part des différentes matières premières utilisées pour la production de d'éthanol en « 2010 » et en 2050 en Europe

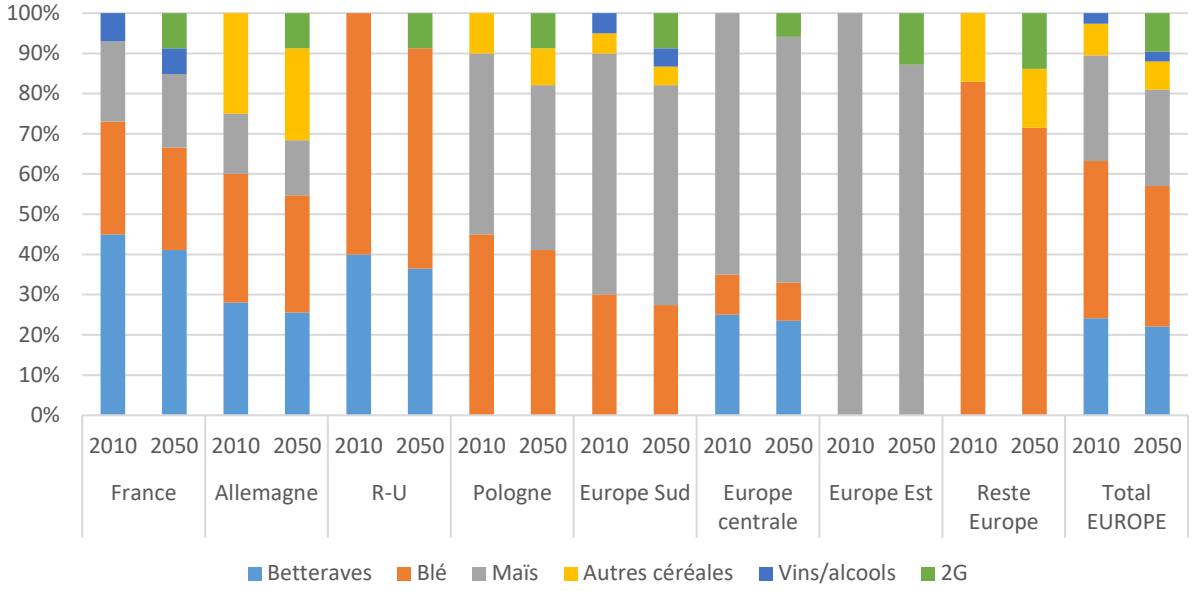


Figure 4-4. Part des différentes matières premières utilisées pour la production de biodiesel en « 2010 » et en 2050 en Europe

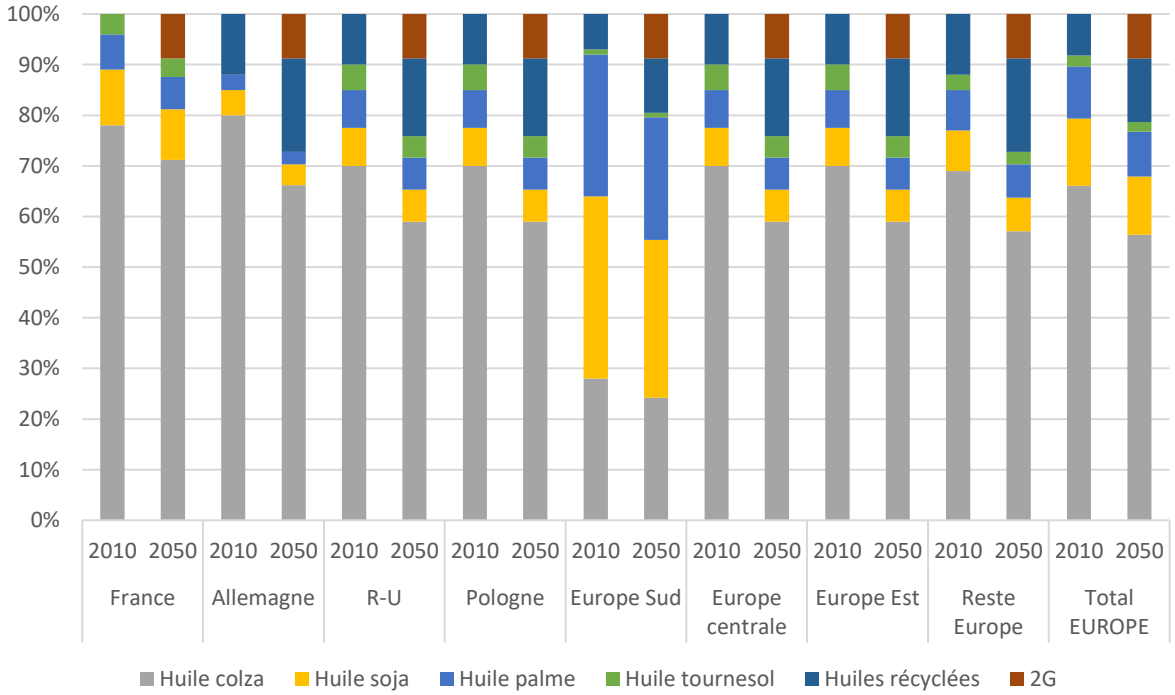


Figure 4-5. Part des différentes matières premières utilises pour la production d'éthanol en « 2010 » et en 2050 dans les autres régions du monde

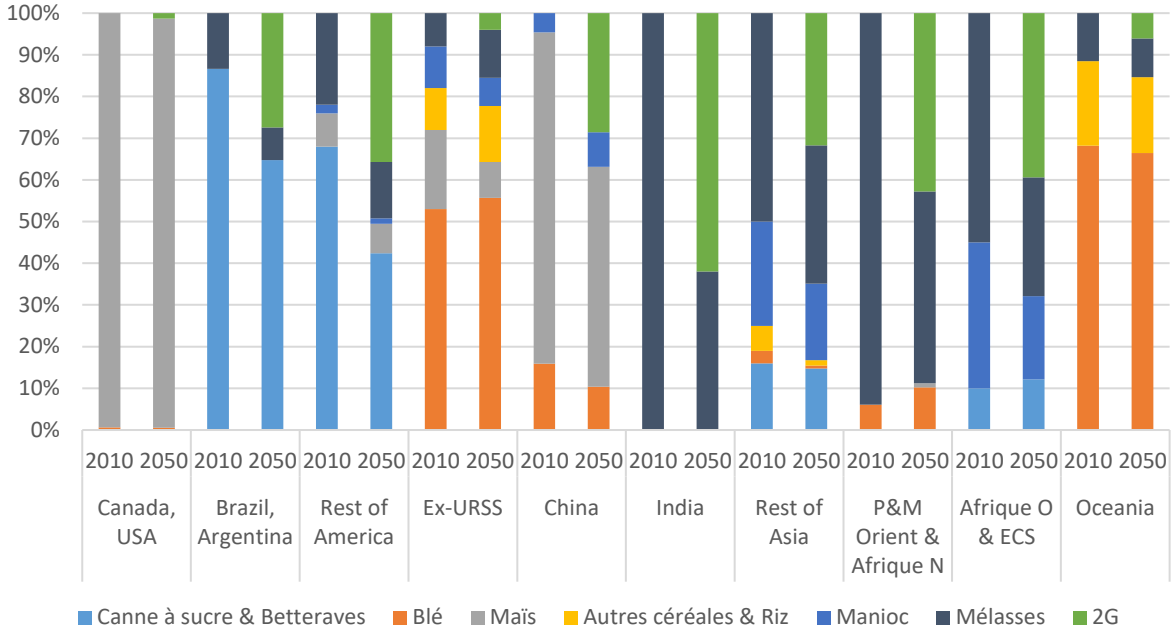
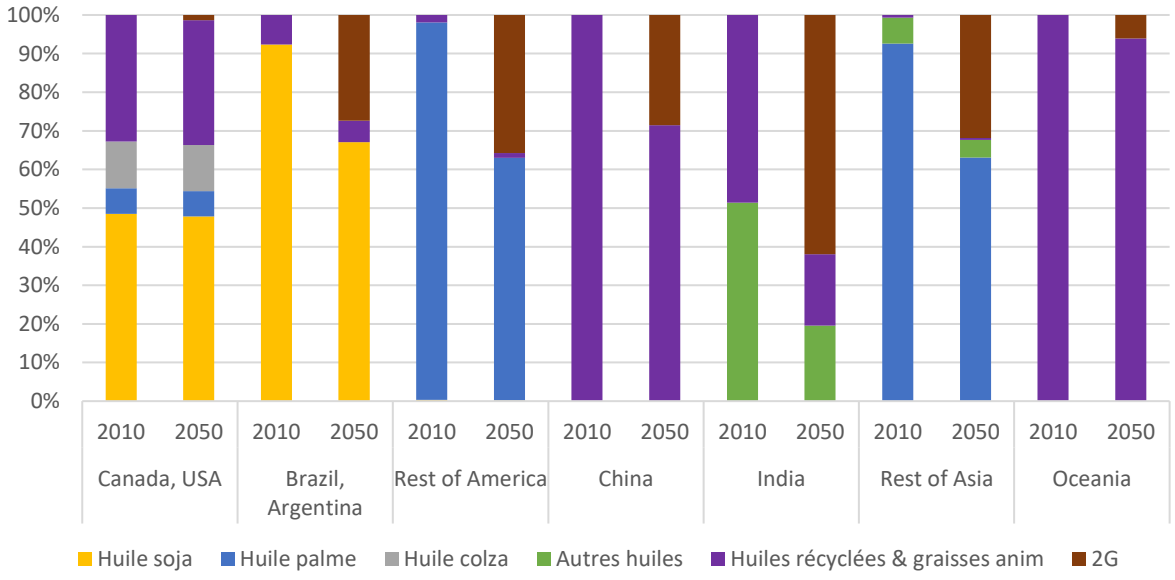


Figure 4-6. Part des différentes matières premières utilisées pour la production de biodiesel en « 2010 » et en 2050 dans les autres régions du monde



Dans les Tableaux 4.B à 4.E présents en annexe de ce Chapitre, on retrouve l'évolution des productions de biocarburants pour chaque région AE2050 et leur répartition selon les différentes matières premières.

4.2.5. Remarques liées aux matières premières dites de seconde génération

Les matières premières utilisées dans la production de biocarburants de 2e génération sont sans concurrence directe d'usage avec l'alimentation. Il s'agit des ressources « lignocellulosiques » qui regroupent à la fois des produits qui utilisent directement de la terre comme les cultures énergétiques dédiées (Miscanthus, Switchgrass, taillis à très courte rotations, etc.)

et des co-produits (qui n'utilisent donc pas directement de terre) comme les déchets, les résidus forestiers et les pailles de céréales. La nature des produits qui pourront être utilisés à l'horizon 2050 pour produire des biocarburants de 2ème génération est très difficile à évaluer.

Compte tenu de la difficulté à évaluer la nature des ressources qui seraient privilégiées ainsi que l'évolution de leur rendement s'il devait s'agir des cultures énergétiques dédiées, nous faisons l'hypothèse ici qu'il s'agira essentiellement des déchets, des résidus forestiers et de culture et que ces matières premières, parce qu'elles n'utilisent pas directement de surfaces, seront particulièrement favorisées dans les pays en développement où l'augmentation de la consommation de carburants fossiles dans les transports sera la plus forte. Dans les scénarios AE2050, les biocarburants de seconde génération n'utilisent donc aucune surface.

4.3. Les hypothèses retenues pour les usages non-alimentaires hors biocarburants

Les usages non-alimentaires hors biocarburants concernent les usages des matières premières agricoles dans les industries chimiques, cosmétiques, pharmaceutiques, textiles, etc.

Dans la section précédente, nous avons quantifié les usages des matières premières agricoles liés aux biocarburants. A partir de cette quantification, nous pouvons déduire les usages non-alimentaires hors biocarburants à partir des données globales fournies par FAOSTAT (Tableau 4-4).

Tableau 4-4. Usages non-alimentaires hors biocarburants de matières premières agricoles

Mt/% des utilisations totales en 2010	Céréales	Huiles végétales	Plantes sucrières
Europe	8,6 Mt / 3%	8,2 Mt / 31%	5,5 Mt / 5%
Monde	72,6 Mt / 3%	53,9 Mt / 39%	261,5 Mt / 14%

Source : base de données GlobAgri-AE2050

Les données du Tableau 4-4 font apparaître des quantités relativement importantes d'huiles végétales dans ces usages. Ainsi, selon nos calculs basés sur les données de FAOSTAT et nos propres estimations des usages pour biocarburants, 53,9 Mt d'huiles dans le monde (soit 39% des utilisations totales d'huiles végétales dans le monde), et 8,2 Mt en Europe (soit 31% des utilisations totales d'huiles végétales en Europe) seraient utilisées pour d'autres fins que l'alimentation et les biocarburants.

Étant donnée l'importance des quantités en jeu (environ 1/3 de la production mondiale), nous avons examiné plus en détail les différences sources statistiques disponibles liées aux usages non-alimentaires d'huiles végétales, et comparé les données de FAOSTAT à deux autres sources de données globales.

4.3.1. Comparaison avec d'autres sources : PSD-USDA et OCDE-FAO

Le Tableau 4-5 montre la comparaison des bilans mondiaux « total huiles végétales » de FAOSTAT avec les données de la base PSD-USDA et OCDE-FAO (les perspectives agricoles).

Il apparait, à l'issue de cette comparaison, que FAOSTAT se trouve bien au-dessus des chiffres indiqués par les deux autres sources pour les usages non-alimentaires d'huiles végétales (2e ligne du Tableau 4-5). En incluant les usages pour biocarburants, ceux-ci représentent 71 Mt en 2010 selon FAOSTAT, alors que PSD-USDA et OCDE-FAO les évaluent à environ la moitié, soit 32 Mt pour PSD-USDA et 36 Mt pour OCDE-FAO.

Cette surestimation dans FAOSTAT se fait surtout au détriment de la consommation humaine d'huiles végétales, estimée à 77 Mt en 2010 selon FAOSTAT, contre 110 Mt selon PSD-USDA et 122 Mt selon OCDE-FAO. Nous sommes donc face à une différence de l'ordre d'environ 35-45 Mt d'huiles végétales allouées à la consommation humaine, soit environ l'équivalent d'un quart de la production mondiale. En revanche, les utilisations domestiques totales (Food + Other + Variations de stocks) sont à peu près équivalentes entre les trois sources.

Tableau 4-5. Usages non-alimentaires (en milliers de tonnes) des huiles végétales dans le monde : comparaison des données PSD-USDA, OCDE-FAO et FAOSTAT

PSD-USDA (moy 2009/11)*		FAOSTAT (2010)		OCDE-FAO (2010)	
Food Use Dom. Cons.	110 234	Food supply quantity	77 180	Food	121 603
Ind Dom. Cons. (incl. biofuels)	31 661	Other uses (incl. biofuels)	70 758	Other use (excl. biofuels)	10 558
Production	151 805	Production	152 544	Production	151 761
Exports	66 237	Export Quantity	78 721	Exports	62 579
Beginning Stocks	18 322	Stock Variation	467		
Ending Stocks	20 779		-	Ending stocks	20 228
		Feed	772	Feed	0
		Losses	532		
		Processing	328	Biofuel use	15 508

*moyenne des années campagne 2009/10, 2010/11 et 2011/12.
Sources: PSD-USDA : https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery,
FAOSTAT: http://www.fao.org/faostat/en/#data/BC, OECD-FAO : Agricultural Outlook 2018-2027 http://www.agri-outlook.org/fr/donnees/

Malgré nos recherches complémentaires, cet écart ne trouve d'explication ni dans la composition de cet agrégat (i.e. types d'huiles inclues dans le total, mais ce qui ne pourrait toutefois justifier un tel écart), ni dans la définition de la variable « Other use »[43].

Comme nous disposons d'informations détaillées sur la consommation humaine (régimes détaillés finement par produit et pour chaque pays du monde) uniquement dans FAOSTAT et que nous ne saurons juger de l'exactitude des données des autres sources que nous avons consultées, il nous apparait extrêmement compliqué d'apporter des corrections aux régimes alimentaires dans GlobAgri-AE2050 (eux-mêmes établis sur les statistiques FAOSTAT) sans faire d'hypothèses très grossières qui seraient en elles-mêmes sources d'erreurs. Nous proposons donc ci-après une autre stratégie pour corriger les différences constatées dans les statistiques tout en conservant la cohérence des sources de données employées dans l'étude.

4.3.2. Proposition de correction des usages d'huiles végétales dans GlobAgri-AE2050

Dans l'année de base « 2010 » du modèle, l'utilisation *totale* d'huiles végétales est bien cohérente avec les statistiques de différentes sources, même si elle est répartie différemment entre usages. Nous pouvons donc conserver ce jeu de données.

Pour l'année de projection « 2050 », le modèle GlobAgri-AE2050 calcule la réponse à une variation de la demande, alimentaire ou non, en faisant varier la production agricole, les échanges commerciaux et les surfaces cultivées. En effet, le modèle ne fait pas la distinction entre les différentes types d'usages des produits agricoles. Ainsi, pour tenir compte de la sous-évaluation possible de la consommation alimentaire d'huiles végétales par FAOSTAT/GlobAgri-AE2050 sans pénaliser l'augmentation de la demande totale d'huiles dans nos différents scénarios à l'horizon 2050, **nous proposons de faire évoluer aussi les autres usages non-alimentaires d'huiles végétales, entre 2010 et 2050, et ceci au même rythme que celui de la consommation alimentaire d'huiles**.

Le Tableau 4-6 montre les résultats chiffrés de ces calculs pour nos deux scénarios « Régimes tendanciels » et « Régimes sains » à l'horizon 2050.

[43] La description de la variable « Other use » dans FAOSTAT indique que les quantités renseignées dans cette variable concernent à la fois les quantités utilisées dans l'industrie non-alimentaire et, plus étonnamment, les quantités ingérées par les touristes ainsi que par des animaux de compagnie. Il semble peu réaliste qu'une telle quantité d'huiles soit effectivement allouée à ces deux seuls usages.

Tableau 4-6. Évolution des utilisations alimentaires et non alimentaires entre 2010 et 2050 dans GlobAgri-AE2050

Huiles végétales totales (1000 t)		« 2010 »	Scénario Régimes tendanciels 2050	Scénario Régimes sains 2050
Monde (dont Europe)	Demande humaine	71 232 *(10 021)*	123 769 *(10 176)*	90 956 *(6 573)*
Monde (dont Europe)	Usages pour biocarb.	16 527 *(8 966)*	29 301 *(9 122)*	29 301 *(9 122)*
Monde (dont Europe)	Autres usages	53 935 *(8 220)*	91 059 *(8 524)*	66 588 *(5 848)*
Monde (dont Europe)	Total	141 694 (27 207)	244 129 (27 822)	186 845 (21 543)

Ainsi, au lieu de garder les autres utilisations d'huiles constantes par rapport à leur niveau en 2010 (54 Mt dans le monde) dans les simulations, **on les augmente à 91 Mt d'huiles en 2050 (+ 69 %) dans le scénario « Régimes tendanciels »**. En Europe, les autres utilisations d'huiles augmentent de manière plus modérée (comme la consommation alimentaire) de 8,2 Mt en 2010 à 8,5 Mt en 2050. **Ainsi la demande mondiale d'huiles végétales s'établit à 244 Mt en 2050**, par rapport à 207 Mt au total si on avait gardé les utilisations non alimentaires hors biocarburants constantes. À titre de comparaison les perspectives agricoles FAO-OCDE (2018-2027) projettent une utilisation totale de 235 Mt d'huiles en 2027. En Europe, la différence est moins importante ; la demande totale s'élève maintenant à presque 28 Mt en 2050, par rapport à 27,5 Mt avec des utilisations non alimentaires hors biocarburants constantes.

En suivant cette même démarche, **dans le scénario « Régimes sains », les autres utilisations augmentent** (mais moins que dans le scénario « Régimes tendanciels ») **de 54 Mt en 2010 à 66,6 Mt en 2050 (+ 23 %)**, au même rythme que la demande alimentaire. **La demande totale d'huiles végétales dans ce scénario s'établit ainsi à 187 Mt en 2050**. En Europe aussi, les autres utilisations suivent la demande alimentaire et diminuent donc par rapport à « 2010 », de 8,2 Mt en 2010 à 5,8 Mt en 2050. La demande totale européenne s'élève ainsi à 21,5 Mt en 2050 dans ce scénario.

Ne disposant pas d'éléments permettant de quantifier l'évolution des autres usages non-alimentaires hors huiles végétales (céréales, plantes sucrières…), il a été décidé de garder les niveaux de ces utilisations constantes et égales à leur niveau initial « 2010 ».

Annexes du Chapitre 4.

Tableau 4.A. Coefficients de transformation des matières premières agricoles en biocarburants (tonne de matière premières par tonne de biocarburants)

	Coefficient
Blé	3,23 (Europe), 3,5 (autres pays)
Maïs	3,09
Autres céréales	5,26
Riz	5,26
Sorgho	3,50
Betteraves	13,33
Canne à sucre	15,15
Mélasses	4,81
Manioc	4,52
Huile de palme	1,04
Huile de colza	1,03
Huile de soja	1,02
Huile de coprah	1,09
Huile de tournesol	1,04
Autres huiles	1,09
Huiles recyclées	1,09
Graisses animales	1,09

Tableau 4.B. Quantités de matières premières utilisées pour la production de biodiesel en Europe en milliers de tonnes en « 2010 » et en 2050

	Huile de palme		Huile de colza		Huile de soja		Huile de tournesol		Huiles recyclées	
	2010	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**
France	146	158	1 594	1 727	223	242	83	90	0	0
Allemagne	90	88	2 354	2 313	146	144	0	0	375	684
Royaume-Uni	14	14	127	128	14	14	9	9	19	35
Pologne	29	29	265	266	28	28	19	19	40	73
Europe du Sud	561	577	551	567	705	724	20	21	146	267
Europe de l'Est	17	17	159	159	17	17	12	12	24	44
Europe centrale	44	44	404	405	43	43	29	29	61	112
Reste de l'Europe	116	114	987	970	114	112	44	43	182	332
Total Europe	1 017	1 042	6 443	6 533	1 290	1 324	216	223	848	1 547

Tableau 4.C. Quantités de matières premières utilisées pour la production de biodiesel dans le monde en milliers de tonnes en « 2010 » et en 2050

	Huile palme		Huile colza		Huile soja		Huile tournesol		Autres huiles		Graisses animales & Huiles recyclées	
	2010	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**
Total Europe	1017	1042	6443	6533	1290	1324	216	223	0	0	848	1547
Canada-USA	152	451	271	802	1083	3213	0	0	0	0	782	2319
Brésil-Argentine	0	0	0	0	3596	7471	0	0	0	0	316	657
Reste de l'Amérique	351	830	0	0	1	2	0	0	0	0	7	17
Chine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	613	796
Inde	0	0	0	0	0	0	0	0	43	95	40	89
Reste de l'Asie	1919	6799	0	0	0	0	0	0	145	516	14	50
Océanie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	89
Total monde	3439	9122	6713	7336	5970	12010	216	223	188	610	2704	5564

Tableau 4.D. Quantités de matières premières utilisées pour la production d'éthanol en Europe en milliers de tonnes en « 2010 » et en 2050

	Maïs		Autres céréales		Betteraves		Blé		Vins et alcools	
	2010	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**
France	888	935	0	0	8 628	9 088	1 299	1 368	101	106
Allemagne	372	392	1 057	1 113	2 998	3 158	829	873	0	0
Royaume-Uni	0	0	0	0	2 571	2 708	933	983	0	0
Pologne	286	301	108	114	0	0	299	315	0	0
Europe du Sud	930	979	132	139	0	0	486	512	25	26
Europe de l'Est	694	731	0	0	0	0	0	0	0	0
Europe centrale	692	729	0	0	1 150	1 211	111	117	0	0
Reste de l'Europe	0	0	683	679	0	0	2 043	2 031	0	0
Total Europe	3 862	4 068	1 980	2 045	15 347	16 164	6 000	6 199	126	132

Tableau 4.E. Quantités de matières premières utilisées pour la production d'éthanol dans le monde en milliers de tonnes en « 2010 » et en 2050

	Bett & Canne à sucre		Mélasses		Maïs		Blé		Autres céréales		Manioc		Vins & Alcools	
	2010	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**	**2010**	**2050**
Total Europe	15 347	16 164	0	0	3 862	4 068	6 000	6 199	1 980	2 045	0	0	126	132
Canada-USA	0	0	0	0	121 558	148 997	818	926	0	0	0	0	0	0
Brésil-Argentine	265 537	362 393	12 975	13 974	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reste de l'Amérique	18 020	32 380	5 830	10 303	432	1 099	0	0	0	0	158	293	0	0
Ex-URSS	0	0	288	481	439	232	1 387	1 690	394	614	339	264	0	0
Chine	0	0	0	0	15 247	19 653	3 462	4 378	0	0	1 306	4 537	0	0
Inde	0	0	5 823	11 048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reste de l'Asie	3 457	14 276	3 507	10 236	0	0	153	152	461	457	1 650	5 308	0	0
P&M Orient	0	0	251	643	0	11	20	127	0	0	0	0	0	0
Afrique Nord	0	0	181	144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Afrique Ouest	6	134	10	100	0	0	0	0	0	0	6	66	0	0
Afrique ECS	327	1 098	570	819	0	0	0	0	0	0	341	541	0	0
Océanie	0	0	137	114	0	0	591	591	176	162	0	0	0	0
Total monde	302 694	426 446	29 572	47 861	141 537	174 059	12 431	14 064	3 010	3 278	3 800	11 010	126	132

Chapitre 5. Projections à 2050 des rendements moyens des cultures sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques

Établir des projections de rendements végétaux pour une large gamme de cultures et pour les différentes régions du monde nécessite de formuler des hypothèses sur l'évolution du contexte pédoclimatique – qui permet ou non l'implantation et le développement des couverts végétaux –, de la dynamique des évolutions techniques (sélection variétale, progrès technique, pratiques agricoles, etc.), et de la nature des systèmes de culture mis en place (par exemple, systèmes irrigués *versus* pluviaux). Dans cette étude, on a mis l'accent sur la caractérisation des incertitudes relatives à l'expression et à l'amplitude des effets respectifs du changement climatique (CC) et des évolutions techniques à l'horizon 2050. Pour rappel, deux trajectoires de CC ont été considérées dans le volet de quantification de l'étude, permettant de définir deux hypothèses de climat en 2050. Le CC dit « tendanciel » repose sur le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP-6.0 du GIEC. Le CC dit « aggravé » repose sur le RCP-8.5.

Ce chapitre présente (i) le mode de caractérisation (choix des données) des paramètres climatiques en 2050 selon les deux trajectoires de CC retenues et la méthodologie de projection des effets différenciés du CC selon son intensité, (ii) la méthodologie de projection des effets des évolutions techniques et (iii) les estimations de rendements végétaux (cultures et fourrages) obtenues pour 2050 en tenant compte de ces deux effets.

Rappelons que GlobAgri-AE2050 considère 33 catégories de cultures et cinq catégories de fourrages[44]. Concernant ces derniers, seules les catégories « herbe des prairies permanentes », « herbe des prairies temporaires » et les « fourrages cultivés non herbacés » mobilisent des surfaces. La production des « *fourrages occasionnels* » et des « *résidus de culture* » ne nécessite pas en elle-même de mobiliser des surfaces dédiées, puisqu'il s'agit essentiellement de coproduits ou de sous-produits. Seuls les rendements des trois premières catégories de fourrages ont donc fait l'objet d'hypothèses d'évolution à 2050.

Divers jeux de projections ont *in fine* été retenues pour la réalisation des simulations. Deux jeux de projections, « basses » et « hautes », ont d'abord été sélectionnées dans l'optique de la simulation des scénarios de référence. Trois autres jeux de projection ont ensuite été définis dans le but de réaliser des analyses de sensibilité. Ces projections « alternatives » représentent les hypothèses suivantes : (i) les rendements évoluent sous le seul effet du CC entre « 2010 » et 2050 (absence d'évolutions techniques sur cette période) ; (ii) on observe une différenciation des évolutions des rendements européens par rapport aux rendements observés dans les autres régions du monde ; (iii) les rendements européens sont plus sensibles au déficit hydrique qui pourrait frapper certaines régions européennes à l'horizon 2050.

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

5.1.1. Caractérisation du climat en 2050 sous changement climatique « tendanciel » et sous changement climatique « aggravé » dans les 21 régions de l'étude

Parmi les manifestations du CC, 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 CC sur la production agricole, il est donc nécessaire de caractériser les variations de ces trois paramètres pour chaque région AE2050 entre la situation initiale « 2010 » et l'horizon de projection 2050.

[44] (i) l'herbe des prairies permanentes (« *grass* ») = herbe pâturée et en ensilage des pâtures permanentes ; (ii) l'herbe des prairies temporaires (« *grass-like forages* ») = herbe mixte et ray-grass ; (iii) les fourrages cultivés non herbacés (« *other forages* ») = Luzerne et autres plantes fourragères (betterave, légumes, sorgho, légumineuses, maïs, etc.) ; (iv) les fourrages et déchets occasionnels (déchets alimentaires, alimentation de parcours, etc.) ; (v) les résidus de culture = Pailles, tiges.

Quantification des variations de [CO_2][45] à l'horizon 2050

Dans son 5e rapport d'évaluation (AR5), le GIEC (IPCC, 2013) fournit des projections décennales de [CO_2]. À partir des projections fournies pour 2050, est calculée, pour chaque RCP, la variation de [CO_2] par rapport à « 2010 ». Pour caractériser la [CO_2] en 2050, on utilise les valeurs de la « *Table AII.4.1: CO2 abundance (ppm)* » de l'Annexe II de l'AR5.

Ainsi, sous l'hypothèse d'un CC tendanciel tel que découlant du RCP-6.0, la [CO_2] augmenterait de +87,2 ppm à l'horizon 2050 par rapport à « 2010 », pour atteindre 477,7 ppm en 2050. Sous l'hypothèse d'un CC aggravé tel que découlant du RCP-8.5, cette augmentation serait de +150 ppm pour atteindre 540,5 ppm en 2050 (IPCC, 2013).

Quantification des variations de T° et de P à l'horizon 2050

Les données du *Climate Change Knowledge Portal* mises à disposition par la Banque Mondiale[46] (voir Tableau 5-1) ont été retenues pour quantifier les variations de T° et de P entre la situation initiale « 2010 » et l'horizon 2050. Contrairement aux données mises à disposition sur le site internet du GIEC, les données de la Banque Mondiale sont disponibles par pays et sont donc faciles à agréger pour une utilisation dans GlobAgri-AE2050. L'Annexe 5.A de ce chapitre décrit plus en détail ces données ainsi que les méthodes d'estimation des valeurs de T° et de P pour 2050 dans la présente étude.

Tableau 5-1. Caractéristiques des données extraites du *Climate Change Knowledge Portal*

	Période historique	Période future
Variables	T° et P mensuelles moyennes	Anomalies de T° et de P mensuelles moyennes (par rapport à la période de référence 1986-2005)
Découpage géographique	Pays	Pays
Période	1901-2016	Moyenne 2040-2059
Données	Observées (source : CRU[47])	Simulées par 16 modèles GCM du CMIP5[48]
Scénarios		RCP-6.0 ; RCP-8.5

Les périodes de référence AE2050 et Banque Mondiale étant différentes, il nous faut opérer une correction. De plus, afin de s'affranchir de la variabilité inter-modèles, il convient d'utiliser les données « Anomalies » qui correspondent à des variations des paramètres climatiques plutôt qu'à des valeurs absolues. Nous avons donc pour chaque pays :

- calculé les moyennes annuelles des observations de la période de référence Banque Mondiale 1986-2005 ;

- ajouté à ces moyennes annuelles les anomalies médianes[49] pour en déduire les projections de T° et de P médianes en valeur absolue pour la période 2040-2059 (2050) selon les deux scénarios RCP-6.0 et RCP-8.5 (voir Tableau 5-2) ;

- calculé les moyennes annuelles des observations de la situation « actuelle » (voir Tableau 5-3). En règle générale, la situation actuelle est définie dans AE2050 comme l'année « 2010 », moyenne des années 2009-2010-2011. En matière de climat, il est plus pertinent de considérer une moyenne calculée sur une vingtaine d'années pour s'affranchir de la variabilité interannuelle et décennale du climat d'origine essentiellement naturelle. Les projections des températures et précipitations annuelles moyennes sont d'ailleurs fournies pour des périodes de 20 ans et non pas pour des années précises. La situation actuelle a donc été définie spécifiquement ici comme la période historique 1996-2015[50]. Ce faisant, on considère donc que

[45] Il s'agit bien ici des concentrations en CO_2 seul et non pas des concentrations atmosphériques de tous les gaz à effet de serre en équivalent CO_2. Dans AE2050, est pris en compte seulement l'effet du CO_2 sur les rendements des cultures.

[46] http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=downscaled_data_download&menu=futureGCM

[47] Climatic Research Unit TS v. 4.01, dataset DOI: http://doi.org/10/gcmcz3.

[48] bcc_csm1_1 ; bcc_csm1_1_m ; ccsm4 ; cesm1_cam5 ; csiro_mk3_6_0; fio_esm; gfdl_cm3 ; gfdl_esm2m ; giss_e2_h ; giss_e2_r ; ipsl_cm5a_mr ; miroc_esm ; miroc_esm_chem ; miroc5 ; mri_cgcm3 ; noresm1_m (Coupled Intercomparison Project Phase 5)

Original source data: The Coupled Model Intercomparison Project, v. 5 – CMIP5: Taylor,K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. B Am Meteorol Soc, 93, 485-498. 10.1175/bams-d-11-00094.1. CCKP data products: prepared and processed by National Center for Atmospheric Research - Research Applications Laboratory (NCAR-RAL).

[49] des 16 modèles GCM du CMIP5 (cf. note précédente).

[50] Comme on le verra plus loin, cette approche est cohérente avec la méthodologie de projection des effets des évolutions techniques qui consiste à prolonger (en les adaptant) les tendances observées sur les deux dernières décennies (*cf.* Section 5.2).

les variations de températures et de précipitation entre la période actuelle et l'horizon 2050 sont équivalentes aux variations de températures et de précipitations entre 2005 et 2049 (années centrales des périodes considérées) ;

- calculé la variation des températures en °C et des précipitations en % entre la période « actuelle » de référence et 2050 ;

- agrégé les données climatiques en régions définies pour AE2050 en pondérant chaque pays par sa surface émergée (données GAEZ v3.0).

Tableau 5-2. Températures en °C et Précipitations en mm pour la période 2040-2059 (médiane des 16 projections)

	Températures (°C)		Précipitations (mm)	
	RCP-6.0	RCP-8.5	RCP-6.0	RCP-8.5
France	12,8	13,4	825	815
Germany	10,6	11,2	743	758
United Kingdom	9,9	10,3	1238	1261
Poland	10,2	10,4	606	618
South Europe	14,5	15,2	723	698
East Europe	7,5	8,1	332	321
Central Europe	9,3	9,7	996	995
Rest of Europe	5,1	6,0	812	828
EUROPE	9,7	10,4	752	751
Canada, USA	5,5	6,4	596	615
Brazil, Argentina	23,9	24,5	1480	1467
Rest of America	22,5	23,1	1493	1480
Former Soviet Union	-0,2	0,6	443	455
China	8,5	9,3	607	638
India	25,7	26,3	1058	1082
Rest of Asia	18,8	19,5	1517	1566
Near and Middle East	22,2	23,0	202	199
North Africa	24,0	24,9	81	78
West Africa	29,1	29,7	747	742
Oceania	23,1	23,4	677	686
Rest of the World	5,5	6,2	968	970
ECS Africa	20,0	20,5	588	587
WORLD	14,7	15,3	755	764

Tableau 5-3. Caractéristiques de la distribution des données climatiques pays extraites, période 1996-2015

	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitations annuelles (mm)
min	-5,1	28
1er quartile	11,6	574
Médiane	23,2	1060
Moyenne	19,5	1237
3e quartile	25,9	1777
max	29,0	3544

Lecture du tableau : Ligne « Médiane », parmi les pays de la base de données, 50 % ont des températures annuelles moyennes sur la période 1996-2015 supérieures à 23,2 °C et 50 % ont de températures inférieures.

Les variations régionales de T° et de P ainsi obtenues pour les régions AE2050 entre la période 1996-2015 et l'horizon 2040-2059 sont présentées dans le Tableau 5-4. Il faut noter que les variations au niveau mondial ne tiennent pas compte des T° et des P à la surface des océans et des continents Arctique et Antarctique.

Tableau 5-4. Variations de T° et de P calculées à partir des données Banque Mondiale

	Variations Températures (°C)		Variations Précipitations (%)	
	RCP-6.0	RCP-8.5	RCP-6.0	RCP-8.5
France	1,1	1,7	-2	-3
Germany	1,1	1,7	3	5
United Kingdom	0,8	1,2	-1	1
Poland	1,4	1,7	-2	0
South Europe	1,1	1,8	-7	-11
East Europe	1,1	1,7	-9	-10
Central Europe	1,3	1,8	-1	-1
Rest of Europe	1,2	2,1	5	7
EUROPE	1,1	1,8	-2	-2
Canada, USA	1,7	2,6	6	10
Brazil, Argentina	1,0	1,6	0	-1
Rest of America	1,1	1,7	-2	-4
Former Soviet Union	1,6	2,4	7	10
China	1,3	2,1	5	11
India	1,1	1,7	2	4
Rest of Asia	1,1	1,7	2	6
Near and Middle East	1,1	1,8	10	9
North Africa	1,1	2,0	3	-1
West Africa	1,2	1,8	-3	-2
Oceania	1,3	1,6	-4	-3
Rest of the World	1,0	1,7	0	0
ECS Africa	1,1	1,7	-4	-3
WORLD	1,3	2,0	2	3

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.

À titre indicatif, les données de la Banque mondiale donnent des variations médianes de T° entre 1986-2005 et 2040-2059 de +1.5°C sous RCP-6.0 et +2.2°C sous RCP-8.5 tandis que l'Annexe II du rapport du GIEC (IPCC, 2013) donne +1.2°C et +1.7°C entre 1986-2005 et 2046-2055. Ces différences peuvent s'expliquer par la différence entre les horizons temporels considérés, un nombre différent de modèles utilisés pour calculer les résultats médians et le fait que le GIEC considère l'ensemble des surfaces terrestres c'est-à-dire tenant compte des océans et des continents polaires. La comparaison de ces chiffres a donc peu de valeur.

5.1.2. Modèles d'effets du changement climatique sur les rendements végétaux établis par analyse quantitative dans le cadre de l'étude AE2050 (Makowski *et al.*, *in press*)

Une revue de la littérature internationale spécifiquement dédiée à la question des effets du CC sur les rendements végétaux a été conduite dans le cadre de l'étude AE2050 par Tamara Ben Ari, David Makowski et Elodie Marajo-Petitzon. Elle avait pour but, en procédant à une analyse quantitative de type méta-analyse des données disponibles les plus solides, de quantifier les effets que l'on pouvait attendre sur les rendements végétaux des variables clés du CC, et notamment, de la concentration en

CO_2 ([CO_2]), la température (T°) et les précipitations (pluviométrie). La méthodologie et les résultats détaillés de cette analyse sont présentés dans la Section 2 du rapport du volet d'analyse bibliographique de l'étude, et dans Makowski *et al.* (*in press*).

Cette revue de littérature a permis de sélectionner un corpus de 16 articles scientifiques répondant aux trois critères suivants :

- Ils portent sur l'impact du CC sur le rendement d'au moins une culture ;
- Ils présentent les résultats d'au moins trois méthodes d'estimation du rendement différentes et/ou d'au moins trois modèles de culture différents ;
- Ils explicitent des valeurs de rendement ainsi que les caractéristiques des évolutions climatiques testées (variations de [CO_2], température, précipitation).

L'analyse quantitative qui en résulte inclut ainsi des résultats produits par des ensembles de modèles de cultures et par des méta-analyses de rendements simulés ou de données expérimentales.

Le corpus ainsi constitué contient des données sur les rendements en blé, maïs, riz, soja et orge[51]. L'analyse statistique de ces informations visait à établir un ou plusieurs modèles expliquant la variation du rendement des cultures en fonction de la variation des trois paramètres climatiques clefs (T°, P et [CO_2]), des interactions entre ces paramètres et de la mise en œuvre ou non de stratégies d'adaptation au CC[52].

Les résultats de ce travail fournissent plusieurs modèles robustes, permettant d'estimer des variations de rendements (en %) par rapport à une situation de référence sous l'effet du changement des conditions climatiques. Nous retenons pour notre étude deux de ces modèles, l'un pour les plantes de type C3 et l'autre pour les plantes de type C4.

Le modèle retenu pour les plantes en C3 correspond au modèle global fondé sur les informations relatives aux cultures de plantes de type C3 représentées dans le corpus (blé, riz, soja, orge). Il intègre les effets de la variation de T°, de P, de [CO_2], de l'interaction entre [CO_2] et T°, et de la mise en œuvre ou non d'adaptation au CC. Nous n'avons pas retenu les modèles spécifiques par culture, blé, riz, soja et orge, car certains paramètres de ces équations ne sont pas significatifs, notamment le paramètre d'interaction T° × [CO_2]. Il s'écrit :

$$\boldsymbol{Y_{ij}} = \boldsymbol{a_{Ti}T_{ij}} + \boldsymbol{a_P P_{ij}} + \boldsymbol{a_C C_{ij}} + \boldsymbol{a_{CT} C_{ij} T_{ij}} + \boldsymbol{a_A I_{Aij}} + \boldsymbol{\varepsilon_{ij}} \quad \text{(Équation 1)}$$

où Y_{ij} est le changement relatif de rendement en % par rapport à la référence du site *i* pour le scénario *j*, a_{Ti} correspond à l'effet de l'augmentation d'un degré Celsius sur le rendement pour l'étude *i*, a_P est un paramètre décrivant l'effet de l'augmentation de 1 % de précipitations sur le rendement, a_C est un paramètre décrivant l'effet de l'augmentation d'un ppm de CO_2, a_A est le paramètre correspondant à l'effet d'une adaptation au CC, a_{CT} est un paramètre décrivant l'interaction entre l'effet de l'augmentation de la température et celui de l'augmentation du CO_2. La variable I_{Aij} est une variable indicatrice égale à 1 pour les situations tenant compte d'une (ou plusieurs) adaptation(s), et égale à zéro sinon. Dans l'utilisation qui sera faite plus loin des paramètres estimés de ce modèle, il n'a pas été tenu compte de l'effet de la variable « Adaptation(s) » de façon à ne tenir compte que des effets directs du CC[53].

Le modèle retenu pour les plantes en C4 est le modèle spécifique « Maïs », cette culture étant la seule de type C4 du corpus (pour mémoire, les autres plantes de types C4 dans notre étude sont le sorgho, la canne à sucre et le millet). Il intègre les effets T° et [CO_2]. Les effets de pluviométrie ainsi que les effets d'interaction et d'adaptations au CC, ne sont pas significatifs. Il s'écrit alors :

$$\boldsymbol{Y_{ij}} = \boldsymbol{b_{Ti}T_{ij}} + \boldsymbol{b_C C_{ij}} + \boldsymbol{\varepsilon_{ij}} \text{ (Équation 2)}$$

Ces équations, dont les paramètres sont présentés dans le Tableau 5-5, permettent d'estimer la variation de rendement entre « 2010 » et 2050 en fonction du seul effet de la variation des différents paramètres climatiques sur cette période. Leur utilisation nécessite donc d'avoir défini les variations de conditions climatiques selon les différents scénarios de CC, en suivant la méthode décrite en Sous-Section 5.1.1. Notons que les paramètres des deux équations sont identiques pour toutes les régions du monde.

[51] Un article traite toutes les cultures confondues : Challinor *et al.*, 2014.

[52] Il s'agit *a priori* d'adaptations simples, incrémentales, de type décalage de date de semis, adaptation de l'irrigation… Il ne s'agit pas d'adaptation systémiques.

[53] 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 5.2.2. 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.

Tableau 5-5. Valeurs des paramètres estimés par analyse quantitative et utilisées pour calculer des variations de rendements en 2050 en fonction des variations des paramètres climatiques

	Équation 1 (plantes en C3)	Modèle Maïs (plantes en C4)
T° (Δ en °C)	-2,395	-4,330
P (Δ en %)	0,265	
[CO_2] (Δ en ppm)	0,090	0,020
T°× [CO_2]	-0,014	
Adaptation	7,253	

Source : Makowski *et al.* (*in press*).

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

Pour les agrégats de produits de GlobAgri-AE2050 comprenant à la fois des plantes de type C3 et C4, c'est-à-dire pour les agrégats « *Sugar plants and products* » (canne à sucre et betterave à sucre) et « *Other cereals* » (sorgho, millet, orge, seigle, avoine), nous avons calculé la moyenne des variations C3 et C4, pondérée par la part des deux types de cultures dans l'agrégat pour les données disponibles les plus récentes, à savoir FAOStat 2017.

Pour calculer des rendements « AVEC CC » on applique simplement la variation (divisée par 100) aux rendements « SANS CC ». Ainsi, par exemple :

Rendements « FAO (2012) retravaillé AVEC CC » = Rendements « FAO (2012) retravaillé SANS CC » × Variation calculée à partir de Equation 1.

La Figure 5-1 présente les variations de rendement estimées entre « 2010 » et 2050 pour les plantes en C3 (5-1.a) et pour les plantes en C4 (5-1.b) sous le seul effet du CC (variations de T°, de P et de [CO_2]). Ces variations ont été estimées pour les deux trajectoires de CC retenues dans l'étude, tendanciel et aggravé. Pour un scénario climatique donné, **deux jeux de projections sont estimés, sans et avec prise en compte de l'effet de fertilisation du CO_2, ceci de façon à tenir compte de l'incertitude et des débats autour de l'expression « réelle » de cet effet au champ** (discuté dans la Section 3 du rapport du volet d'analyse bibliographique de l'étude).

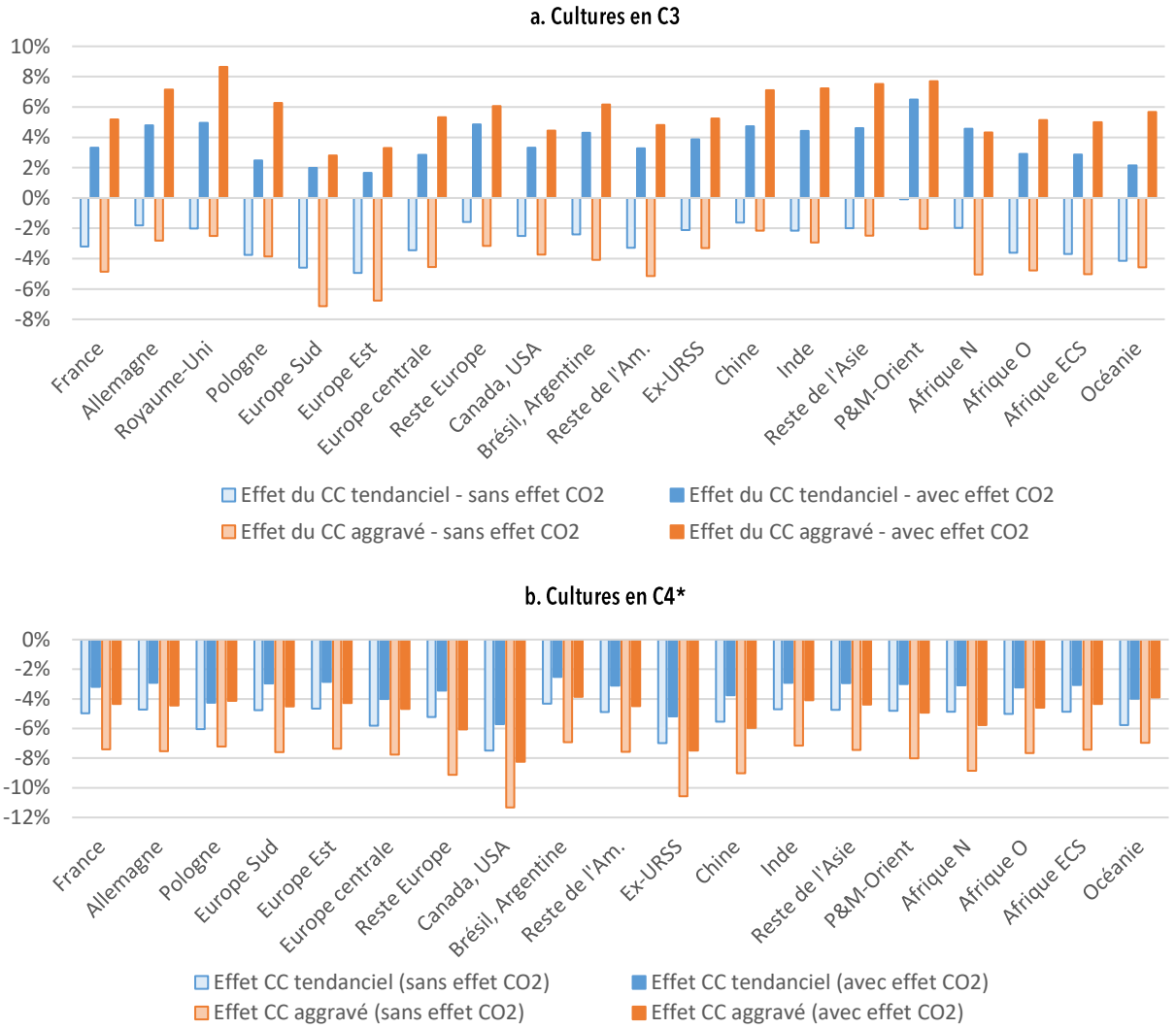
La lecture du Tableau 5-5, résumant les résultats de la méta-analyse Makowski *et al.* (*in press*), suggère que les effets des températures et des précipitations sur les rendements végétaux tendent à abaisser les potentiels de rendements. C'est bien cette tendance à la baisse assez marquée que l'on retrouve dans la Figure 5-1. Cette tendance à la baisse s'accentue en outre quand on passe de la trajectoire d'émissions RCP-6.0 à la trajectoire RCP-8.5, bien que l'écart entre ces deux trajectoires soit assez faible pour les plantes en C3 (par exemple, blé, riz, soja, tournesol, colza).

La baisse des rendements liée aux effets du CC hors [CO_2] est nettement plus marquée pour, d'un côté, le maïs et, de l'autre, les produits sucriers dans les régions du monde où domine la canne à sucre, à qui on a affecté, comme pour le maïs, les résultats des plantes en C4. Compte tenu de l'importance du coefficient affecté aux effets T° pour les plantes en C4, l'aggravation du CC (passage du RCP-6.0 à RCP-8.5) accentue de façon bien plus marquée que pour les plantes en C3, le décrochage des rendements du maïs et des produits sucriers que l'on pourrait attendre à l'horizon 2050.

Néanmoins, la prise en compte de l'effet [CO_2] parmi les composantes du CC à considérer modifie assez profondémment les résultats attendus. En effet, on sait qu'une augmentation de la concentration de CO_2 disponible dans l'atmosphère peut avoir un effet stimulant sur la croissance des plantes, à condition que les besoins azotés et hydriques des plantes soient respectés. C'est ce que traduisent de façon assez claire les résultats de la méta-analyse Makowski *et al.* (*in press*), le coefficient attribué à la [CO_2] étant assez largement positif et l'effet étant en outre plus net pour les plantes en C3 que pour le maïs et les plantes en C4. Il y a donc bien, à l'horizon 2050, une compensation des effets négatifs de la température et des précipitations par un effet largement positif de la [CO_2] pour toutes les cultures et dans toutes les régions AE-2050. Cette compensation est tellement puissante qu'elle induirait une augmentation du rendement des plantes en C3 si l'on prend en compte les trois composantes du CC (T°, P et [CO_2]).

Cet effet de compensation est nettement moindre pour le maïs et les plantes en C4 (le coefficient attribué à [CO_2] y est beaucoup plus faible, notamment en regard de l'effet fortement négatif de la température). Ainsi, dans le cas du maïs et des plantes sucrières dans les régions du monde pratiquant la canne à sucre, il y a bien amoindrissement des effets négatifs du CC quand on prend en compte les effets de la [CO_2], mais cet amoindrissement reste somme toute assez limité.

Figure 5-1. Gamme des variations des rendements des cultures en C3 et en C4 en 2050 par rapport à « 2010 » (en %) sous l'effet d'un CC tendanciel ou aggravé, avec et sans prise en compte de l'effet de fertilisation du CO_2



* Le Royaume-Uni n'apparaît pas ici car FAOStat ne fournit aucune information statistique sur la culture du maïs dans ce pays.

Conclusions opérationnelles pour la réalisation des simulations avec GlobAgri-AE2050

In fine, il semble indispensable de retenir dans les scénarios de référence les deux modalités d'utilisation des modèles établis par méta-analyse, soit avec et sans effet CO_2, traduisant **deux hypothèses contrastées concernant l'expression de cet effet « au champ ». Les projections avec effet CO_2 traduisent l'hypothèse selon laquelle les conditions culturales (notamment nutrition azotée et apport en eau) permettent la pleine valorisation de cet effet. Les projections sans effet CO_2 traduisent au contraire l'hypothèse que cet effet ne peut pas s'exprimer**.

Les rendements des fourrages constituent un cas particulier. Pour les **fourrages cultivés**, les variations des rendements sous l'effet du CC sont calculées comme la moyenne pondérée des variations des rendements estimées pour les produits GlobAgri-AE2050 entrant dans la composition de cet agrégat. Deux des catégories de fourrages (au sens de Monfreda *et al.*, 2008) entrant dans la composition de l'agrégat « Fourrages cultivés non herbacés » ne correspondent pas directement à des catégories de produits de la base GlobAgri-AE2050 :

- Pour la catégorie « *Oilseeds average* », qui correspond aux données classées en « *Green oilseeds* » dans GlobAgri-AE2050, nous utilisons l'évolution de rendement du colza en Europe, et l'évolution du rendement du soja dans les autres régions AE2050.
- Pour la catégorie « *Other forage products* », qui intègre à la fois la catégorie « *Forage products* » et la luzerne et le trèfle qui n'existent pas en tant que tels dans la base GlobAgri-AE2050, nous calculons l'évolution moyenne des rendements de tous les autres produits GlobAgri-AE2050 entrant dans l'agrégat « Fourrages cultivés non herbacés », que nous pondérons par la part de cette catégorie dans la composition totale de l'agrégat « Fourrages cultivés non herbacés »[54].

Nous avons supposé que les effets du CC 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.

Enfin, les variations des rendements des **prairies temporaires** sont supposées être égales à celles des fourrages cultivés.

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

Deux sources d'informations ont été mobilisées et comparées pour projeter les effets des évolutions techniques[55] sur les rendements végétaux à l'horizon 2050 :

- le rapport Alexandratos et Bruinsma (2012), ci-après désigné « FAO (2012) » ;
- le rapport FAO (2018), considéré ici comme une actualisation et un prolongement d'Alexandratos et Bruinsma (2012).

Diverses projections de rendements à 2050 sont disponibles ou peuvent être obtenues en mobilisant ces sources d'information seules ou en combinaison les unes avec les autres. On procède ici à une analyse comparative des projections de rendements obtenues selon ces diverses méthodes, visant à « décortiquer » la façon dont chacune des méthodes prend en compte (ou non) les effets de certains facteurs influençant les rendements, en particulier les effets respectifs du CC et du progrès technique (incluant l'amélioration variétale).

5.2.1. Projection des rendements 2050 à partir du rapport Alexandratos et Bruinsma (2012)

Le rapport FAO (2012) propose des projections des rendements végétaux entre l'année de référence « 2006 » (moyenne des années 2005-2006-2007) et 2050, obtenus pour l'essentiel à partir de prolongements des tendances passées, revus et souvent « corrigés » suite à des consultations des experts et autres partenaires de la FAO. De façon schématique, l'offre d'un produit végétal est le produit d'un rendement (exprimé en tonnes par hectare) par une surface (exprimée en hectares). Les projections de l'offre sont en pratique un peu plus complexes car elles tiennent compte : i) de la qualité des terres mises en culture (sous forme de différentes classes), qualité qui influence les rendements, et ii) des cultures pluviales et irriguées, décomposition qui joue aussi sur les rendements car ces derniers sont (nettement) plus élevés en cultures irriguées *versus* pluviales. En d'autres termes, la production en 2050 d'un produit donné dans un pays / groupe de pays donné peut s'écrire comme :

$$Q = SI.RI + SP.RP \qquad \text{(équation 3)}$$

où *Q* est la production en 2050, *SI* la surface irriguée en 2050, *RI* le rendement de la culture irriguée en 2050, *SP* la surface en culture pluviale en 2050, et *RP* le rendement de la culture pluviale en 2050. En rapportant ces données finales aux valeurs

[54] Trois régions ont une catégorie « Fourrages cultivées non herbacés » composée uniquement de « *Other forage products* » : Inde, Afrique du Nord et Afrique ECS. Nous calculons alors la moyenne de l'évolution de rendement de tous les produits GlobAgri-AE2050 qui pourraient être utilisés en tant que fourrages et appliquons cette moyenne à la catégorie « Fourrages cultivés non herbacés » dans ces régions.

[55] A l'instar de la productivité des facteurs de production, les effets des « changements techniques » sur les rendements passent par le double jeu : i) d'une augmentation des quantités des facteurs de production (ce qui peut notamment se traduire par un accroissement des consommations intermédiaires ou « intrants ») et ii) du progrès technique, qui peut ne pas impliquer d'augmentation d'intrants (voir Section 4 du rapport du volet d'analyse bibliographique de l'étude).

initiales respectives (« 2006 »), on en déduit les taux de croissance de la production, des terres irriguées consacrées à la culture, des rendements irrigués de la culture, etc. Ce travail est réalisé par la FAO pour au total 105 pays et 34 cultures[56].

Compte tenu des informations statistiques disponibles, le travail réalisé dans FAO (2012) ne repose pas uniquement sur l'analyse statistique des évolutions passées (antérieures à la moyenne triennale 2005-07) projetées à l'horizon 2050. En effet, cette analyse statistique est complétée / corrigée à dires d'experts, dires d'experts qu'il est difficile, par construction, d'apprécier faute d'explicitation précise de ces dires dans le rapport et des corrections alors réalisées relativement à des évolutions « purement » statistiques. En outre, les informations statistiques publiquement disponibles sont partielles : on ne dispose pas en particulier des évolutions, pour les 105 pays et les 34 cultures, des rendements en cultures irriguées et des rendements en cultures pluviales. On ne dispose pas non plus des surfaces irriguées *versus* pluviales pour ces 34 cultures et ces 105 pays. On dispose seulement dans le rapport de 2012 d'informations « agrégées » (par exemple, pour l'ensemble des cultures au niveau mondial, au niveau des pays développés, au niveau des pays en développement, au niveau des pays en développement sans la Chine et l'Inde).

Notons que, dans ce travail de projection, les auteurs assument explicitement l'hypothèse normative selon laquelle les conditions climatiques de « 2006 » prévaudront toujours en 2050[57]. On peut donc considérer que les évolutions de rendements résultent donc uniquement des évolutions techniques telles que définies dans la présente étude.

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*[58] par l'amélioration des technologies et des pratiques, notamment une plus grande efficacité de la fertilisation[59]. 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 FAO (2012) 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. L'exercice de projection des effets des évolutions techniques sur les rendements des productions végétales réalisé pour l'étude AE2050 à partir de FAO (2012) a donc procédé en plusieurs étapes.

En premier lieu, les taux de croissance annuels moyens entre « 2006 » et 2050 issus de FAO (2012) ont été mobilisés pour projeter, à l'horizon 2050, les rendements des différentes productions végétales des différentes régions définies pour l'étude AE2050, à partir de l'année « 2010 ». FAO (2012) ne distinguant pas différentes sous-régions au sein de l'Union européenne, nous avons appliqué à chacune des sous-régions européennes définies dans l'étude AE2050 le taux de croissance annuel moyen de la zone UE-27 issu de FAO (2012) (qui sera dénommé par la suite « FAO-UE27 »).

En second lieu, pour chaque couple région/culture, on a comparé ces projections FAO (2012) avec deux autres projections de rendements à 2050, établies par prolongements des tendances passées à partir des données historiques[60] :

[56] Ce travail, sous forme de variables agrégées de bilan (production totale, demande humaine totale, alimentation) nous est rendu disponible pour six grandes régions mondiales et 26 groupes de cultures.

[57] Plus précisément, une partie des adaptations incrémentales mises en œuvre par le passé, et dont les effets sur le rendement sont implicitement intégrés, constitue une réponse/adaptation au CC de la période passée. En conséquence, l'effet du CC passé est enregistré dans les projections de rendements, mais uniquement de façon indirecte.

[58] 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.

[59] Évolution conduisant à un ralentissement de la croissance de la consommation des engrais, mais pas à leur diminution de façon absolue.

[60] Notons que, tout comme les projections FAO (2012), les tendances d'évolution passées de rendements tiennent compte, par construction, des effets des évolutions techniques relevant de l'adaptation incrémentale au CC passé. En conséquence, l'effet du CC passé est enregistré dans les projections de rendements, mais uniquement de façon indirecte.

- La projection, à partir de l'année de base « 2010 », du taux d'évolution moyen du rendement observé sur la période 1975-2005, permet d'obtenir une estimation du prolongement de la tendance longue[61] ;
- La projection, à partir de l'année de base « 2010 », du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015[62], permet d'obtenir une estimation du prolongement des évolutions observées ces 20 dernières années, étant entendu que les effets du CC sur les rendements des céréales semblent essentiellement visibles depuis 1995 (voir à ce propos Brisson *et al.*, 2010), constat qui peut être étendu par hypothèse à d'autres productions et d'autres régions.

La comparaison de ces trois séries, guidée par le collectif d'experts techniques réunis dans notre groupe de scénarisation, a permis de fixer les règles de décision décrites ci-après pour opter, lorsque nécessaire au cas par cas, entre ces trois modes de projection.

Dans les différentes régions européennes

Exception faite du « Reste de l'Europe », rassemblant un ensemble hétérogène de pays, les projections de rendement de FAO (2012) n'ont pas pu être retenues pour les régions de l'Europe. En effet, elles ne permettent pas de différencier les évolutions des sous-régions selon leurs spécificités bioclimatiques et d'orientations productives agricoles, FAO (2012) ne proposant, pour chaque culture, qu'un seul taux de croissance annuel moyen pour l'ensemble de la zone UE-27. En conséquence et suivant en cela le collectif d'experts consulté, les règles suivantes ont été adoptées :

1. Règle générale : pour toutes les régions européennes (excepté le « Reste de l'Europe »), la projection à 2050 des rendements végétaux s'appuie sur la **tendance récente 1995-2015** (représentée par les **losanges verts** dans les Figures B.1 à B.21 de l'Annexe 5.B de ce chapitre). Cette règle permet de mieux rendre compte, d'une part, de la récente stagnation des rendements enregistrée dans certaines régions de l'Europe de l'ouest et pour certaines cultures[63] et, d'autre part, du mouvement de rattrapage des écarts de productivité pour certaines autres régions d'Europe[64]. Seule le « Reste de l'Europe » s'est vu appliquer le taux de croissance de la projection réalisée par FAO (2012) pour la région Europe (FAO-UE27).

2. L'analyse et la discussion des résultats obtenus par cette règle générale ont amené à envisager quelques exceptions :
   - Quand la projection de la tendance 1995-2015 appliquée à des productions majeures est apparue peu réaliste aux experts consultés, on a retenu : soit la projection de la tendance longue 1975-2005 (**point rouge** dans les Figures B.1 à B.21 de l'Annexe 5.B), soit celle de FAO-EU27 (**carré noir** dans ces mêmes Figures) même si cette dernière est calculée sur l'Europe comme un seul agrégat. Le premier type d'exception a été retenue dans le cas de l'évolution des **rendements en colza pour la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni** ; en effet, l'application des tendances 1995-2015 engendrait un écart de niveau de rendement considéré comme trop important entre ces trois pays clés. Le recours à la tendance longue (1975-2005) permet ici d'amoindrir assez fortement les écarts et d'envisager des niveaux de croissance des rendements du même ordre. Le second mode d'exception (FAO-EU27) n'a été appliqué qu'au **rendement du tournesol en Europe de l'Est**, la forte croissance du rendement observée avec la tendance de court terme étant jugé peu réaliste dans cette région fortement productrice, tout comme l'aurait été la baisse des rendements qu'engendrerait l'adoption de la tendance de long terme.
   - Pour les couples [culture/sous-région] caractérisés par une production très faible en « 2010 » (voir Annexe 5.C) et des rendements très fluctuants, et lorsque les estimations obtenues avec les trois modes de calcul exposés précédemment sont trop contrastées pour en choisir une, le niveau de rendement à 2050 a été considéré comme égal à celui observé en

[61] Pour cette projection des rendements des cultures « principales » (blé, maïs, colza, tournesol, soja, riz, plantes sucrières), les données historiques 1975-2005 de la FAO ont été utilisées, sauf en cas d'écarts importants entre les données historiques de la FAO et les données historiques de GlobAgri (= données FAO retravaillées et notamment « nettoyées » de leurs incohérences pour certains pays), écarts induits surtout par la présence de pays ayant changé de « statut » au cours de la période (ex-Yougoslavie, ex-Tchécoslovaquie, ex-URSS…). Dans ce cas, les données historiques de GlobAgri ont été utilisées car corrigées de ces évènements. Pour les autres cultures (agrégats de différentes cultures : fruits et légumes, autres céréales, autres oléagineux, légumineuses, racine et tubercules, fibres, autres produits végétaux, ainsi que le fruit du palmier), les données historiques de GlobAgri ont systématiquement été privilégiées, sauf en cas de points aberrants sur la période historique.

[62] Pour calculer la pente 2005-2015, les données de FAO ont été systématiquement utilisées dans la mesure où ce sont les seules qui soient disponibles jusqu'en 2016. Néanmoins, il a été jugé préférable de ne pas retenir l'année 2016 comme point final d'une période à partir de laquelle projeter une tendance, car cette année est considérée comme « exceptionnelle » en termes de rendements (très inférieurs à la moyenne pour certains couples culture/région, très supérieurs pour d'autres).

[63] Tel est le cas, par exemple, du blé en France, en Allemagne et au Royaume-Uni ; du maïs en France ; ou encore, du tournesol en France et en Allemagne.

[64] Comme on peut l'observer dans les cas très marquants de la Pologne, de l'Europe de l'est et de l'Europe centrale.

2010. Cette stabilité des rendements est ici une façon de neutraliser les effets que pourraient avoir des évolutions fortes et peu explicables des rendements de production de faible importance locale.

Dans le reste du monde (sauf « Afrique du Nord » et « Proche & Moyen-Orient »)

La règle générale adoptée pour toutes les autres régions du monde (hors Afrique du Nord et Proche & Moyen-Orient) s'appuie sur les taux de croissance issus des **projections FAO 2012** (**carré noir** sur les Figures B.1 à B.21 de l'Annexe 5.B).

Dans les quelques cas où la projection de FAO (2012) appliquée aux niveaux de rendements de l'année de référence « 2010 » est apparue comme peu réaliste à nos experts, on s'est donné la possibilité de faire exception en mobilisant : soit la projection de la tendance 1995-2015 (**losange vert** dans ces Figures), soit la projection de la tendance 1975-2005 (**point rouge** dans ces Figures).

Seule la première modalité d'exception (le recours à la tendance passée sur courte période) a finalement été mobilisée dans les cas suivants :

- On y a eu recours pour **l'ensemble des productions de la région « Ex-URSS »** : en effet, dans ce cas et pour la plupart des produits agricoles, la projection proposée par FAO (2012) se situait très en dessous des tendances enregistrées sur la période la plus récente. Compte tenu de l'importance des produits de cette région pour la définition des stratégies européennes, il a paru plus raisonnable de faire l'hypothèse d'une relance de la croissance des rendements dans cette région à l'égale de celle observée au cours des 20 dernières années plutôt que la quasi-stagnation de ceux-ci proposée par FAO (2012).
- De la même façon, le **rendement du maïs et du colza dans la région Canada-USA** n'aurait que très peu augmenté si on adoptait les tendances proposées par FAO (2012), en tout cas de façon bien moindre que ce qu'aurait donné le prolongement des tendances passées notamment de court terme. C'est pourquoi il est apparu pertinent d'adopter le prolongement des tendances 1995-2015 pour ces deux productions dans cette région fortement productrice. Cette exception est en outre motivée, en ce qui concerne le colza, par l'existence d'un plan stratégique canadien de grande ampleur.
- Enfin, l'évolution des **rendements du colza en Chine** telle que proposée par FAO (2012) étant beaucoup plus forte que ce que donnerait le prolongement des tendances tant de court terme que de long terme, ce qui la ferait contraster avec toutes les autres tendances adoptées pour la Chine, il a été convenu de limiter cette augmentation en adoptant la poursuite de la tendance 1995-2015.

Dans les deux régions « Afrique du Nord » et « Proche & Moyen-Orient »

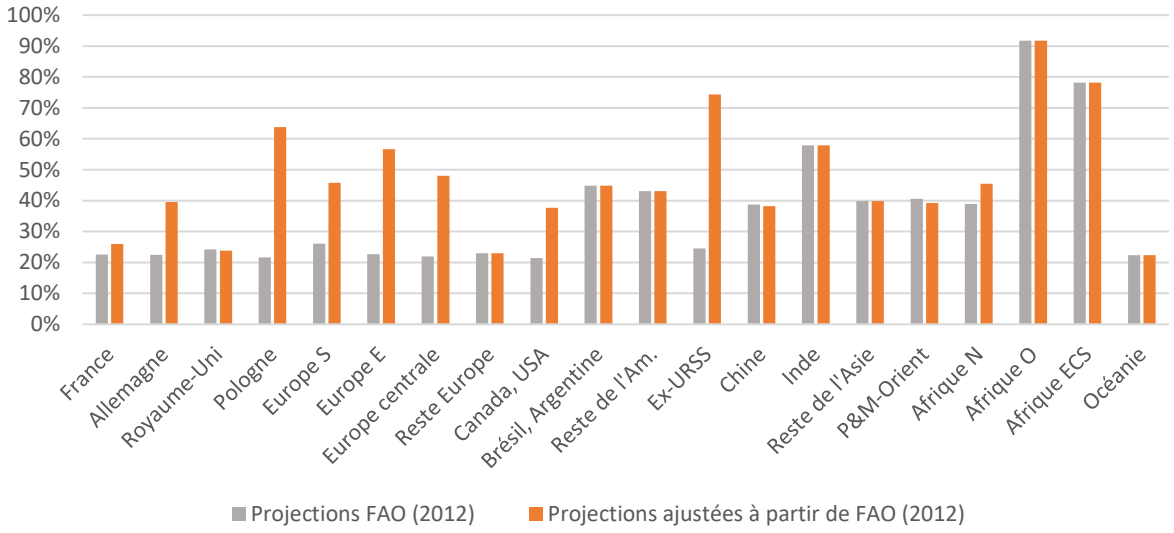
Dans la mesure où un important travail de révision des projections de FAO (2012) avait été réalisé lors de l'étude menée par l'Inra pour le compte de Pluriagri, sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord & Moyen-Orient (modifications à dires d'experts des projections FAO 2012, pour tenir compte des conditions de production dans la région), on a ici réutilisé les projections de rendements établies dans ce cadre-là (**carré noir** dans les Figures B.16 et B.17).

Dans la suite de ce document, les projections de rendements à 2050 obtenues en appliquant cet ensemble de règles et exceptions seront désignées Projections « FAO (2012) retravaillées », de façon à les distinguer des projections originelles dont elles sont issues et qui seront notées « FAO (2012) ».

La Figure 5-2 illustre les écarts, pour chaque région AE2050, entre, d'une part, les projections FAO (2012) appliquées sans modification aux rendements « 2010 » des cultures, et, d'autre part, les projections obtenues après ajustement de ces dernières selon les règles de décisions présentées ci-dessus.

Figure 5-2. Variation du rendement végétal moyen entre "2010" et 2050 (en %) selon :
(i) les projections FAO (2012) et (ii) les projections obtenues après ajustement des projections FAO (2012)

Rendement moyen toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires), pondéré par les surfaces occupées par chaque culture en "2010".



5.2.2. Les évolutions des rendements végétaux dans le rapport FAO (2018)

Compte tenu de l'usage et des auteurs de ces deux rapports, on peut considérer le rapport produit par la FAO en 2018 (FAO, 2018) comme une réactualisation et un prolongement du rapport FAO (2012). La FAO y propose de nouvelles projections de rendements à l'horizon 2050 à partir de l'année de base 2012. Cette fois-ci, trois scénarios sont distingués selon la nature et l'ampleur des défis auxquels l'humanité devra faire face pour garantir, dans le futur, l'accès équitable et durable aux ressources alimentaires, le CC faisant explicitement partie des cinq défis pris en compte[65]. Cette prise en compte explicite du CC et la mise en parallèle de trois scénarios sont donc les deux nouveautés majeures par rapport à FAO (2012). Les trois scénarios sont définis selon des hypothèses d'évolution des variables socio-économiques et environnementales qui influencent la sécurité alimentaire mondiale (cf. Figure 5-3). En particulier, chaque scénario est explicitement associé à une des quatre trajectoires d'émissions de GES (*i.e.* les RCP) du 5ième rapport (AR5) du GIEC et intègre des changements dans les technologies agricoles, conséquence du progrès technique, des incitations des politiques publiques et d'une adaptation au CC.

Les rendements moyens retenus dans FAO (2018) pour projeter le système agricole et alimentaire mondial à l'horizon 2050, tiennent compte des effets combinés (i) du CC sur les productivités agricoles des différentes régions du monde et (ii) des évolutions techniques. Tandis que l'effet des évolutions techniques sur les rendements dans les différents scénarios de FAO (2018) est estimé à partir de la littérature existante et des dires d'experts, l'effet du CC est tiré de la base de données FAO-IIASA GAEZ v4 [66]comportant des variations de rendements réalisables sous différentes conditions climatiques. Notons que, concernant les effets du CC, l'effet [CO_2] est explicitement exclu dans ces projections de rendement.

Le **scénario dit « *Business as usual* » (BAU)** correspond à une trajectoire selon laquelle les richesses augmentent modérément à l'échelle mondiale, sans toutefois combler les écarts importants entre pays. Des politiques d'atténuation du CC et les politiques sectorielles de développement sont mises en œuvre, mais sont insuffisantes pour répondre aux défis auxquels font face les systèmes agricoles et alimentaires. Les auteurs associent ce scénario au RCP-6.0, en précisant qu'il pourrait aussi être associé au RCP-8.5.

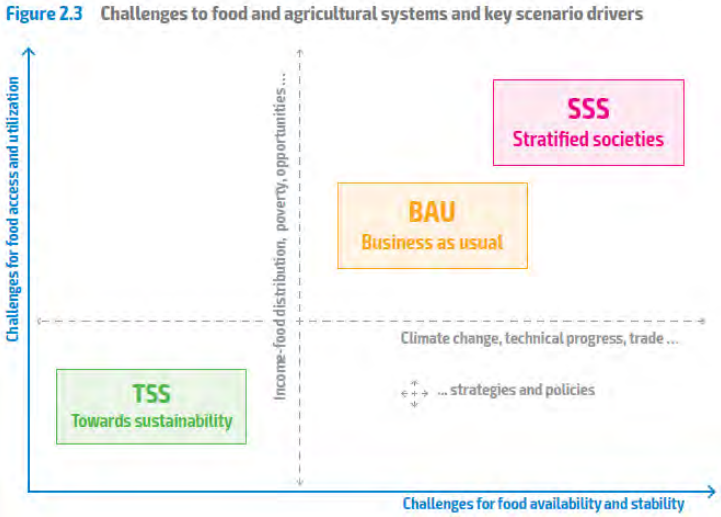
[65] Cinq défis sont identifiés : (i) fournir des produits agricoles en quantité suffisante pour répondre à la demande (qui s'accroit et dont la nature évolue) ; (ii) éradiquer la faim et l'insécurité alimentaire ; (iii) préserver et améliorer la productivité des écosystèmes et l'usage durable des ressources naturelles ; (iv) s'adapter aux effets du changement climatique ; (v) contribuer à l'atténuation du changement climatique.

[66] La version utilisées dans FAO (2018) est la « v4 », pas encore publiée. La « v4 » est une mise à jour « élargie » de la version précédente "v3, disponible sur www.fao.org/nr/gaez/en).

Le **scénario de rupture dit « *Towards sustainability* » (TSS)** représente un monde évoluant vers un développement durable. Les sociétés sont globalement plus équitables, et la quasi-totalité des Objectifs de développement durable (ODD) définis dans l'Agenda 2030 adopté par l'ONU en 2015 est atteinte. L'adoption d'orientations stratégiques appropriées et la pleine mise en œuvre de politiques efficaces permettent une agriculture plus durable. Les auteurs assimilent ce scénario au RCP-4.5, et précisent qu'il pourrait également être associé au RCP-2.6.

À l'opposé, le **scénario de rupture dit « *Stratified societies* » (SSS)** traduit l'évolution d'un monde au sein duquel chaque entité géographique ou sociale se replie sur ses objectifs propres et ses intérêts de court terme. Dans ce cas de figure, les défis auxquels font face les systèmes agricoles et alimentaires sont ignorés, tout comme les actions pour tenter d'atténuer le CC. Ce scénario est donc clairement associé au RCP-8.5.

Figure 5-3. Positionnement relatif des scénarios BAU, TSS et SSS de FAO (2018) selon les hypothèses d'évolutions socio-économiques et environnementales qu'ils prennent en compte



Source : FAO (2018)

Seul le scénario BAU est donc comparable à la logique essentiellement tendancielle de construction des scénarios que nous avons retenue dans notre étude. Concernant les évolutions techniques agricoles, ce scénario fait l'hypothèse que les efforts de recherche et de développement en agriculture et les investissements publics en agriculture sont modestes. Il en résulte une dynamique également 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 CC 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 CC.

Les éléments d'analyse présentés dans le rapport FAO (2018) et ses annexes permettent de distinguer explicitement les effets des évolutions techniques, d'une part, et du CC, d'autre part, sur les rendements végétaux des différentes régions du monde. Ainsi, le rapport FAO (2018) fournit des taux d'évolution du rendement moyen sous les effets combinés des évolutions techniques et du CC (sans [CO_2]), ainsi que 4 jeux de données distinguant effets des évolutions techniques et du CC selon deux modalités de production : culture « pluviale » et culture « irriguée ». Il est donc possible de reconstituer (voir Encadré 5-1) :

- d'une part, les rendements moyens 2050 ne tenant compte que des évolutions techniques, de façon à les comparer aux projections « FAO (2012) » et « FAO (2012) retravaillé »,

- d'autre part, de leur affecter les effets du CC issus de Makowski *et al.* (*in press*) de façon à les comparer aux projections « FAO (2018) » intégrant les deux effets des évolutions techniques et du CC.

Encadré 5-1. Reconstitution des rendements moyens 2050 « évolutions techniques » à partir de FAO (2018)

Afin de pouvoir comparer les projections des effets des évolutions techniques sur les rendements telles qu'estimées dans FAO (2012) et dans FAO (2018), nous avons dû reconstituer le rendement moyen 2050 FAO (2018) *hors CC (« des évolutions techniques » seules*) à partir des évolutions des rendements pluviaux et irrigués hors CC fournies par FAO (2018).

Comme indiqué précédemment, FAO (2018) fournit des informations explicites sur les effets que peuvent avoir sur les rendements végétaux des différentes régions du monde, les évolutions techniques, d'une part, et le CC, d'autre part. Ces informations sont fournies séparément pour les cultures irriguées et pluviales au tableau S 2.1 du *Supplementary Material* annexé au rapport (FAO, 2018, Annexe pp. 39-43). Ce tableau indique les évolutions des rendements des 5 cultures principales par région FAO ainsi qu'une moyenne pondérée (la catégorie « All ») pour chaque scénario FAO (2018) entre 2012 et 2050 (en indice, 2012 = 100).

Nous utilisons les informations fournies dans le tableau S 2.1 pour calculer[67] :

1. les rendements irrigués et pluviaux 2050 « évolutions techniques » en appliquant à nos rendements irrigués et pluviaux « 2010 » les évolutions 2012-2050 indiquées dans la colonne correspondante (« *Technology* ») pour le scénario « BAU » en ajustant ces évolutions à la période 2010-2050 ;
2. puis, le rendement moyen 2050 « évolutions techniques » en pondérant les rendements irrigués et pluviaux en 2050 « évolutions techniques » par les parts de surfaces irriguées et pluviales dans les surfaces totales en 2050[68].

Nous calculons également le rendement FAO (2018) « complet », c'est-à-dire combinant les effets des évolutions techniques et du CC, en calculant d'abord les rendements irrigués et pluviaux en 2050 par combinaison des deux évolutions données séparément pour « *Technology* » et « *Climate* » et en ajustant celles-ci à la période 2010-2050[69]. Le rendement moyen global « complet » est ensuite obtenu en pondérant les rendements irrigués et pluviaux « complet » par les parts de surfaces irriguées et pluviales dans les surfaces totales en 2050.

[67] Bien que les informations données dans le tableau S 2.1 de FAO (2018) soient assez détaillées, nous avons dû réaliser plusieurs hypothèses de correspondance entre les zones FAO et les régions AE2050, ainsi qu'entre cultures FAO et cultures GlobAgri-AE2050. Ces hypothèses de correspondance sont détaillées en Annexe 5.D du présent chapitre. C'est ainsi que, pour chacune des 8 régions européennes, a été appliqué les taux d'évolution moyens de l'ensemble des *High-Income Countries*. Cette façon de procéder ne différencie donc pas des taux d'évolution selon les régions de l'Europe, contrairement à ce que la procédure adoptée précédente, dite « FAO (2012) retravaillé » basée sur le prolongement des tendances observées sur la période 1995-2015, nous a permis de faire.

[68] La façon dont ces parts de surfaces irriguées et pluviales sont estimées à l'horizon 2050 est détaillée dans la Section 1.1.2 du Chapitre 1.

[69] Les rendements globaux « *technology* » et « *climate* » en culture irrigué et pluviale calculés ici ne sont pas identiques à ce que donne, pour la catégorie « All », le tableau 3.7 du rapport FAO lui-même (FAO, 2018, p. 82). Les différences se constatent surtout pour le scénario SSS et sont dues à l'effet « *technology* ». C'est donc par souci de cohérence que nous avons retenu les mêmes séries d'évolution, plus complètes, telles qu'elles apparaissent dans le *Supplementary Material* du rapport.

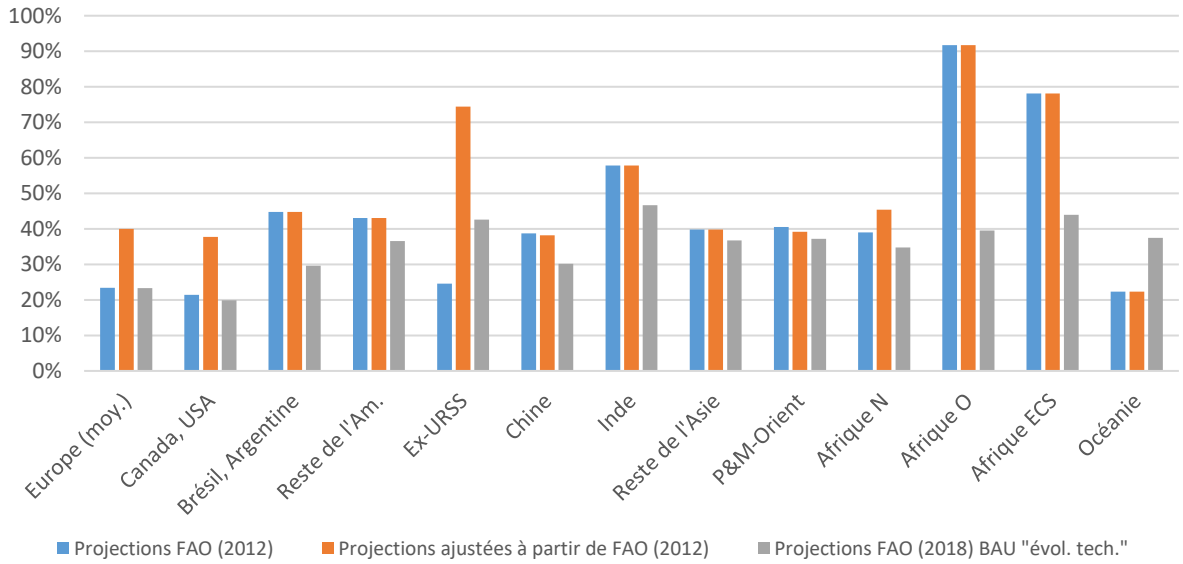
5.2.3. Comparaison des différents modes de projection des effets des évolutions techniques

La comparaison des projections de rendements proposées par FAO (2012) avec les projections de FAO (2018) ne prenant en compte que les évolutions techniques, revient de fait à examiner la façon dont la FAO et ses experts ont révisé les évolutions à venir des rendements végétaux d'ici 2050 à conditions climatiques constantes (*cf.* Figures 5-4 et 5-6). Cette première série de comparaisons permet d'analyser ainsi les éventuelles révisions des effets des évolutions techniques sur les rendements 2050 auxquelles a procédé la FAO entre ses projections 2012 et 2018, et les écarts entre les rendements FAO (2018) et ceux que nous avons spécifiquement construits à partir de FAO (2012) pour les besoins de cette étude. Les éléments permettant la comparaison des projections FAO avec les prolongements 1975-2005 et 1995-2015 (et donc avec nos projections « FAO (2012) retravaillé ») sont reportés dans les Tableaux 5.B.1 à 5.B.15 et les Figures 5.B.1 à 5.B.21 de l'Annexe de ce chapitre [70]. Les projections ont été comparées pour chacune des 21 régions AE2050 (8 régions européennes + 13 régions hors Europe). Ces comparaisons sont réalisées pour l'ensemble des cultures (hors fourrages) ainsi que pour certaines cultures prises séparément : (i) Blé ; (ii) Maïs ; (iii) Riz ; (iv) Soja ; (v) Colza ; (vi) Tournesol ; (vii) Plantes sucrières.

L'effet des évolutions techniques sur les évolutions de rendement dans les régions du monde, hors Europe

Cette comparaison fait tout d'abord apparaître une absence de remise en cause, par les projections FAO (2018), de l'ampleur des effets des évolutions techniques sur les rendements végétaux estimée par les projections FAO (2012) dans les **régions du monde à haut revenu**. Ainsi, dans la région **Canada-USA**, la tendance au plafonnement des rendements, déjà intégrée dans FAO (2012), est maintenue, voire quelque peu accentuée : les rendements en blé projetés par FAO (2018) sont d'environ 5 % inférieurs à ceux obtenus à partir des projections FAO (2012) ; l'écart entre les deux projections est de même ampleur pour le colza et plus restreint pour le maïs et le soja (de l'ordre de -2 %). A l'inverse, les projections 2018 sont un peu plus favorables pour les plantes sucrières (+2 %) et les fruits et légumes (+3 %). Rappelons néanmoins que la tendance au plafonnement des rendements telle qu'elle apparaît dans FAO (2012) a été considérée par nos experts comme trop marquée dans les cas notamment du maïs et du colza, au point d'avoir nécessité une révision à la hausse de leurs rendements, en adoptant la tendance 1995-2015 au lieu de la projection FAO (2012).

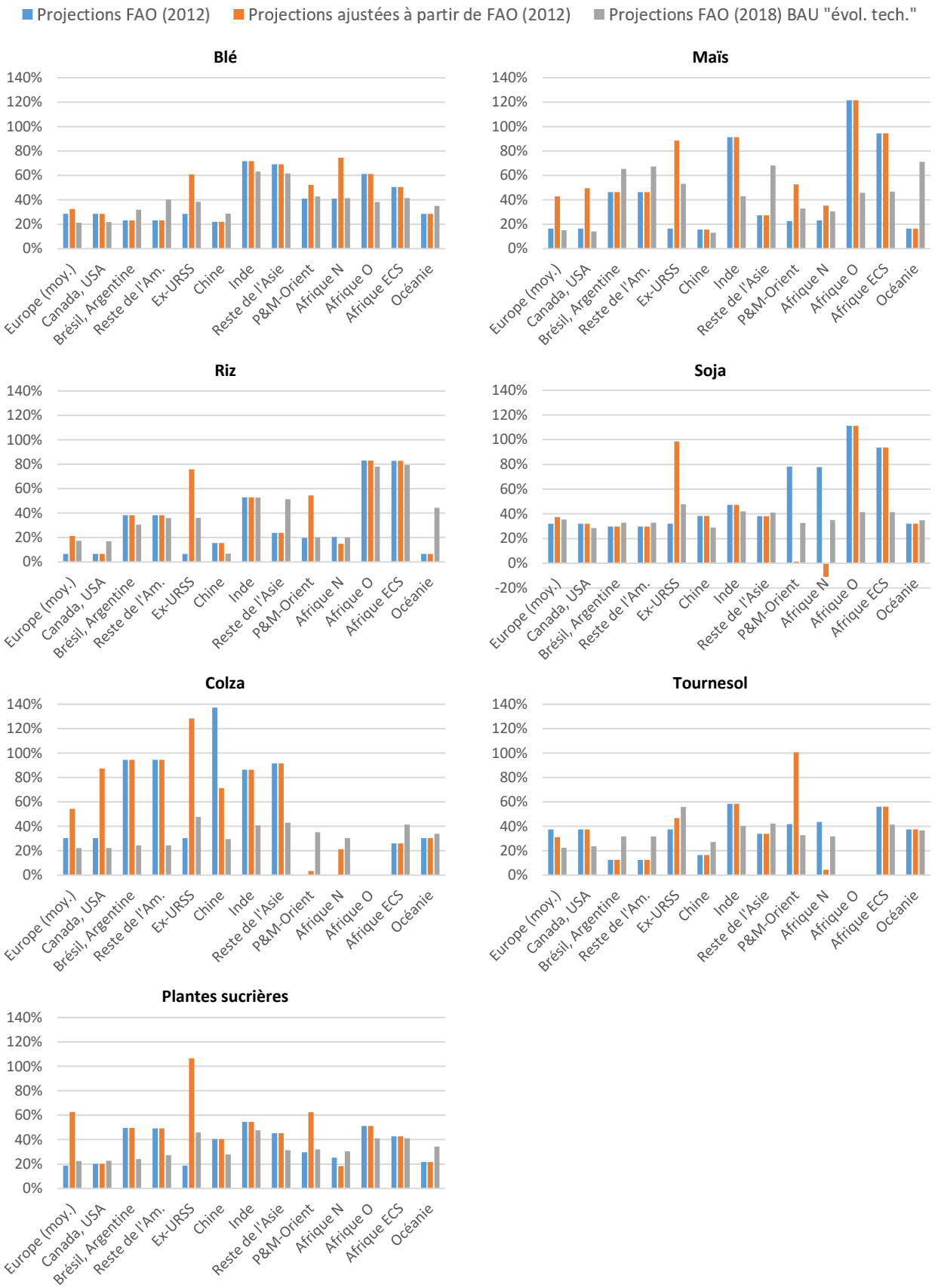
Figure 5-4. Variations entre « 2010 » et 2050 des rendements végétaux moyens* dans les différentes régions du monde hors Europe selon les projections FAO (2012), « FAO (2012) retravaillé » et « FAO (2018) BAU évolutions techniques » (en %)



* = Rendement moyen toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires), pondéré par les surfaces occupées par chaque culture en "2010".

[70] On fera attention lors de la lecture de ces Figures au fait que l'échelle des ordonnées peut varier de façon conséquente selon les cultures et les régions.

Figure 5-6. Variations entre « 2010 » et 2050 des rendements végétaux par culture dans les différentes régions du monde hors Europe selon les projections FAO (2012), « FAO (2012) retravaillé » et « FAO (2018) BAU évolutions techniques » (en %)



Les projections FAO (2012) pour l'**Océanie** sont proches des tendances de long terme 1975-2005 et en hausse relativement modérée, la forte variabilité des années les plus récentes (conséquence possible du CC en cours) conduisant à des projections de la tendance 1995-2015 plus éloignées (parfois supérieures comme pour le blé ou le maïs, parfois inférieures comme pour les produits sucriers). La révision FAO (2018) ne prenant en compte que les évolutions techniques telles que nous les avons appliquées à cette région[71], se traduit par une révision plutôt à la hausse des rendements des cultures les plus importantes de cette région : l'écart entre la projection FAO (2012) et la projection « FAO (2018) évolutions techniques » est alors de 5 % pour le blé et 10 % pour les plantes sucrières à la faveur de FAO (2018).

La région constituée des pays de l'**Ex-URSS** constitue un cas à part, la révision 2018 des rendements FAO « évolutions techniques » lui étant très nettement favorable. On a explicité plus haut la nécessité que nos experts ont repérée, de revoir à la hausse les évolutions de rendements telles que projetées par FAO (2012) : en vue de tenir compte de la redynamisation récente des évolutions de rendements dans cette région, on a préféré ajuster les projections FAO (2012) en optant pour des projections prolongeant les tendances récentes (1995-2015) à l'horizon 2050. Il est intéressant de constater que la révision « FAO (2018) évolutions techniques » envisage, pour cette région du monde, une amélioration des rendements plus marquée que celle envisagée par FAO (2012). L'écart entre « FAO 2018 évolutions techniques » et FAO (2012) est de 5 % pour le blé, de 13 % pour le tournesol et même de 19 % pour les plantes sucrières. Néanmoins, cette importante révision à la hausse des projections FAO ne comble qu'une partie de l'écart que nous avions relevé entre la tendance récente 1995-2015 des évolutions de rendements dans cette région et les projections FAO (2012). Au final, la projection « FAO (2018) évolutions techniques » reste encore assez largement inférieure aux tendances 1995-2015, que nous avions retenues pour nos projections dites « FAO (2012) retravaillé » : cet écart est d'environ 15 % pour le blé et d'environ 30 % pour les plantes sucrières. Même révisés à la hausse, les effets des évolutions techniques sur les rendements végétaux en Ex-URSS restent dans FAO (2018) plus pessimistes que ceux que nous avons retenus pour notre série « FAO (2012) retravaillé ».

Dans toutes les autres régions du monde, la révision FAO (2018) des effets des seules évolutions techniques sur les rendements végétaux se traduit par une détérioration de l'évolution des rendements projetés à l'horizon 2050.

La révision à la baisse des rendements végétaux entre les projections FAO (2012) et « FAO (2018) évolutions techniques » est particulièrement sévère pour les deux régions de l'Afrique subsaharienne. En **Afrique de l'Est, centrale et du Sud** tout comme en **Afrique de l'Ouest**, la comparaison de la projection FAO (2012) avec le prolongement des tendances de court ou long terme (respectivement, 1995-2015 et 1975-2005) fait ressortir le caractère plutôt optimiste des projections FAO (2012) pour ces deux régions, avec des hausses importantes de rendements pour tous les produits végétaux, en contraste fort avec les tendances 1995-2015 et 1975-2005[72]. La révision « FAO (2018) évolutions techniques » revient très fortement sur cet optimisme et propose des rendements végétaux en fort recul moyen par rapport aux projections FAO (2012). Le rendement moyen (*i.e.* toutes cultures confondues, hors fourrages, pondérées par leur poids dans les surfaces récoltées en « 2010 ») recule ainsi de 19 % en Afrique de l'Est, centrale et du Sud ; ce recul est de 27 % pour l'Afrique de l'Ouest. Ces révisions à la baisse sont très marquées pour le maïs et les « racines et tubercules », un peu moins forts pour les fruits et légumes, les plantes sucrières ou le riz. Ainsi, par rapport aux rendements initiaux (« 2010 »), les projections FAO (2012) proposent une très forte et très optimiste augmentation des rendements végétaux, et les projections « FAO (2018) évolutions techniques » ramènerait cette évolution liée aux seules évolutions techniques à une faible augmentation, plus réaliste si le contexte politique, économique et logistique de l'Afrique subsaharienne reste inchangé.

La révision à la baisse des effets des évolutions techniques sur les rendements végétaux apparaît globalement marquée pour le **Brésil-Argentine**, bien que moins sévère. Elle est néanmoins principalement imputable à une forte diminution de la projection de rendement des plantes sucrières, qui pèsent lourds dans le panier des productions de la région. En effet, les projections « FAO (2018) évolutions techniques » s'écartent des projections « FAO (2012) » de -17 % pour les plantes sucrières, alors que cet écart varie selon les mêmes scénarios de +7 % pour le blé, de +2,5 % pour le soja et de +13 % pour le maïs. La comparaison des rendements de ces mêmes cultures avec les tendances passées fait, de son côté, apparaître que les projections FAO (2012) se situent en dessous des tendances récentes d'évolution (1995-2015) pour le blé, le maïs et le soja,

[71] Rappelons que, pour obtenir les rendements FAO (2018) de la région Océanie, on a appliqué aux rendements de notre année de base les évolutions envisagées par FAO (2018) pour la région dite « *East-Asia & Pacific (excluding China)* ».

[72] On peut faire l'hypothèse que les auteurs de FAO (2012) s'appuyaient sur l'idée que le potentiel d'augmentation des rendements africains existe incontestablement et qu'il est très fortement dépendant de la possibilité d'utilisation de la fumure minérale. FAO (2012) explicitent d'ailleurs (p. 134) le fait que la consommation en engrais minéraux pourrait passer de 8 kg/ha sur la période 2005-2007 à 27 kg/ha en 2050 pour l'Afrique subsaharienne, niveaux faibles par rapport à la consommation mondiale moyenne de 132 kg/ha en 2005-2007 et de 191 kg/ha à l'horizon 2050 pour FAO (2012).

et au-dessus pour les plantes sucrières. La projection « FAO (2018) évolutions techniques » tend à réduire ces écarts par rapport aux tendances passées.

L'écart entre FAO (2012) et « FAO (2018) évolutions techniques » est assez faible en **Chine**. Si, pour certaines productions, comme le blé ou les « racines et tubercules », les rendements sont légèrement revus à la hausse, les révisions à la baisse sont plus nombreuses et concernent notamment le maïs (-2 %), le riz (-7,5 %), le sucre (-9 %) et les fruits et légumes (-10 %). On peut être surpris de cette anticipation d'un effet des évolutions techniques sur les rendements chinois plus pessimistes dans FAO (2018) que dans FAO (2012). En effet, la comparaison des projections FAO (2012) avec les tendances passées (tant récentes que lointaines) font déjà apparaître un choix d'évolution plus pessimiste que les tendances en cours, les projections « FAO (2018) évolutions techniques » renforçant donc encore ce pessimisme. Aucun des deux rapports n'explicite vraiment les raisons d'une telle anticipation de ralentissement des effets des évolutions techniques sur les rendements végétaux chinois, ni du renforcement de cette hypothèse dans le rapport le plus récent.

L'**Inde** constitue l'image « inverse » de la Chine avec des projections FAO (2012) plutôt optimistes par rapport aux tendances passées mais souvent assez proches des projections des tendances récentes 1995-2015 d'évolution des rendements. La révision à la baisse dans les projections « FAO (2018) évolutions techniques » viendraient « corriger » cet optimisme relatif.

Au final, il ressort de ces comparaisons que les effets des évolutions techniques dans les projections de rendement à l'horizon 2050 ont tout d'abord été revus à la baisse dans les régions du monde dont on pouvait considérer que les rendements proposés par FAO (2012) étaient par trop optimistes : c'est principalement le cas des deux régions africaines (Afrique de l'Est, centrale et du Sud ; Afrique de l'Ouest) mais aussi de l'Inde. Des révisions à la baisse des rendements végétaux concernent également la Chine et le Reste de l'Asie sans que l'on puisse expliquer ces révisions par un excès d'optimisme des projections FAO (2012). A l'inverse, les projections récentes (FAO, 2018) revoient à la hausse les rendements de l'Ex-URSS. Ces derniers avaient été considérés comme drastiquement pessimistes par nos experts, ce qui nous avaient amenés à remplacer les projections FAO (2012) par le prolongement des tendances récentes (1995-2015). Néanmoins, la révision des effets des évolutions techniques opérée dans FAO (2018) débouche sur des niveaux de rendements qui, en Ex-URSS, restent encore en-deçà des évolutions récentes. Par ailleurs, les évolutions de rendements des plantes sucrières dans les deux régions d'Amérique centrale et du sud (Brésil-Argentine et Reste de l'Amérique) sont fortement revues à la baisse par « FAO (2018) évolutions techniques », sans qu'une telle modification des anticipations ne soit clairement justifiée.

Les évolutions de rendements végétaux dans les régions d'Europe

Comme on l'a vu plus haut, les projections de rendements européens s'appuient sur deux procédures assez différentes : « FAO (2012) retravaillé » correspond, pour les régions européennes et presque tous leurs produits végétaux, à l'application aux rendements « 2010 » des taux annuels d'évolution de rendements observés entre 1995 et 2015 pour les prolonger jusque 2050. La procédure « FAO (2018) évolutions techniques » consiste à appliquer les taux annuels d'évolution des rendements sous seule influence des évolutions techniques, tels qu'ils sont donnés dans FAO (2018) pour les *High-Income Countries*. Ces taux différenciés selon les cultures sont ainsi homogènes entre régions européennes dans cette projection « FAO (2018) évolutions techniques ».

Si on se concentre sur **les projections « FAO (2012) retravaillé »** (cf. Figures 5.B.1 à 5.B.8 de l'annexe de ce chapitre), on y retrouve bien le plafonnement des rendements, notamment en matière de céréales et d'oléo-protéagineux, pour la **France,** l'**Allemagne** et le **Royaume-Uni**, qui, dans les interprétations ayant suivi l'article de Brisson *et al.* (2010), a été un peu rapidement attribué au seul CC en cours (alors que l'article avance des argumentaires complémentaires complexes et non réductibles à ce seul facteur, notamment sur les effets sur la fertilisation du remplacement des légumineuses par le colza). Compte tenu de la pression sociale qui s'exerce aujourd'hui sur le recours aux intrants agricoles, ces projections apparaissent dans l'ensemble cohérentes avec un progrès génétique pouvant s'orienter davantage vers des variétés à forte efficience et à rendement constant ou vers des systèmes de cultures plus complexes pouvant, eux aussi, limiter les rendements *maxima*. Dans ce contexte, on notera le décalage entre cette tendance générale et la projection des rendements en produits sucriers dont la croissance peut sembler passablement élevée au regard du plafonnement des rendements des autres cultures. Néanmoins, les spécialistes semblent considérer que les rendements des betteraves continueront à progresser bien qu'ils soulignent que ce sera probablement à un rythme moindre qu'au cours des trente dernières années. Il faut souligner que, notamment pour cette culture, l'enjeu majeur en matière d'évolution des rendements sera l'eau et sa disponibilité.

En **Pologne** tout comme en **Europe Centrale et de l'Est**, les rendements sont actuellement relativement bas, notamment à cause d'apports d'intrants inférieurs aux besoins des cultures. La projection plus optimiste retenue dans « FAO (2012) retravaillé » apparaît donc potentiellement cohérente avec une correction (en cours) de ce déficit d'apports.

A l'inverse, les projections relatives aux rendements de l'**Europe du Sud** peuvent sembler quelque peu optimistes (notamment en maïs), compte tenu des contraintes en eau et en irrigation que ces pays pourraient rencontrer à l'horizon 2050. En effet, en culture pluviale, peu d'éléments peuvent être avancés pour rendre compte d'une augmentation des rendements de cette région plus rapide que la tendance européenne adoptée par FAO (2012). C'est donc très probablement par le biais du prolongement de l'extension des surfaces irriguées que l'on peut rendre compte de cette augmentation des rendements. Or, celle-ci pourrait être remise en cause dans les décennies à venir pour des raisons de raréfaction de la ressource en eau particulièrement aiguë dans cette région européenne.

Même si les modifications apportées par **« FAO (2018) évolutions techniques »** par rapport à FAO (2012) sont mineures en ce qui concerne les *High-Income Countries* (et donc l'Europe), les écarts entre les projections de rendements établies pour « FAO (2012) retravaillé » et celles issues, pour les régions européennes, de « FAO (2018) évolutions techniques » sont notables. Elles sont dues, comme on l'a noté plus haut, à la procédure spécifique adoptée pour les régions européennes dans la projection « FAO (2012) retravaillé ». Pris globalement, *i.e.* pour l'ensemble européen, les évolutions de rendements « 2010 »-2050 sont, dans le cas de « FAO (2018) évolutions techniques », nettement en deçà des évolutions de rendements qui ressortent de « FAO (2012) retravaillé », c'est-à-dire du prolongement des tendances observées au cours des deux dernières décennies (Figure 5-4). L'écart est très net pour les grandes productions que sont le maïs, le colza, le tournesol ou les plantes sucrières (Figure 5-5) ; il est moins marqué pour le blé, dont l'évolution de rendements entre « 2010 » et 2050 est faible comparativement aux autres productions agricoles européennes, quelle que soit la procédure de projection retenue.

La mobilisation de ces deux projections donne ainsi une image contrastée des évolutions potentielles de rendements européens, qui, comme pour les autres régions du monde, **peuvent constituer les références d'hypothèses « haute » et « basse » des évolutions des rendements végétaux sous l'effet des seules évolutions techniques**.

Conclusions opérationnelles pour la réalisation des simulations avec GlobAgri-AE2050

À l'exception des régions « Océanie » et « Reste de l'Europe », « FAO (2012) retravaillé » projette, en moyenne[73],des rendements à 2050 systématiquement plus élevés que « FAO (2018) évolutions techniques ». L'écart entre ces deux ensembles de projections témoigne de la formulation implicite de deux hypothèses concernant la dynamique des évolutions techniques et leurs effets.

L'un des objectifs principaux de l'étude AE2050 est d'analyser la variabilité des différentes projections de rendements existantes dans la littérature pour en expliciter les causes. Pour répondre à cet objectif, il nous semble intéressant d'employer, pour la simulation des scénarios, non pas une unique hypothèse relative à la dynamique des évolutions techniques à l'horizon 2050, mais deux hypothèses afin de rendre compte de l'incertitude associée aux projections de la dynamique et des effets futurs des évolutions techniques sur les rendements. Une hypothèse, fondée sur les projections « FAO (2012) retravaillées », traduit des évolutions techniques soutenues. L'autre, fondée sur les projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques », traduit des évolutions techniques plus modérées.

L'usage de projections fondées sur FAO (2012) permet de connecter l'étude AE2050 aux travaux précédents portant sur la sécurité alimentaire mondiale (notamment Le Mouël C. et Schmitt, 2018). Par ailleurs, les projections de rendement FAO (2018) nous semblent incontournables, car elles sont issues d'un travail actualisé (notamment par rapport à FAO, 2012), portant sur l'ensemble du monde et une large gamme de cultures et biens agricoles, permettant ainsi de renseigner en cohérence la quasi-totalité des situations « culture x région » définies dans AE2050. Pour cette raison, certaines des variables nécessaires à GlobAgri-AE2050 (coefficients d'intensité culturale, ratios rendement irrigué / pluvial et part des surfaces irriguées dans les surfaces totales) sont déjà renseignées à l'aide de ce rapport. Mobiliser ces projections de rendements répond donc à un souci de cohérence.

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

[73] Calcul et comparaison des rendements moyens toutes cultures confondues hors fourrages par zone entre les deux projections.

variables selon les régions et les modes 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 CC (*cf.* Sous-Section 5.2.1). 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 implicitement calibrés en utilisant les deux rapports de la FAO.

5.3. Projections de rendements en 2050 sous les effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques : comparaison et sélection pour les scénarios de référence

Comme précisé précédemment, les effets du CC sur les rendements des différentes cultures considérées dans GlobAgri-AE2050 ont été estimés à partir des modèles établis par Makowski *et al.* (*in press*) dans le cadre de cette étude. Ces modèles sont jugés plus « robustes » que les estimations obtenues à l'aide d'un unique modèle comme dans FAO (2018) car issus d'une méta-analyse des résultats considérés comme les plus solides de la littérature scientifique internationale. De plus, ils permettent de tenir compte des effets possibles de l'augmentation de la [CO_2].

Les projections des rendements végétaux intégrant à la fois les effets du CC et les effets des évolutions techniques[74] sont obtenues en combinant les deux modalités de projections présentés dans les deux 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 de FAO (2012) ;
- Hypothèse TK- : un ralentissement de ces évolutions techniques – projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques ».

2. Dans un second temps, on ajuste les évolutions ainsi obtenues pour tenir compte des effets du CC en utilisant les modèles statistiques des cultures en C3 et C4 présentés dans la Sous-Section 5.1.2, 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 CC :

- Hypothèse CC tendanciel : CC tendanciel (RCP-6.0) ;
- Hypothèse CC aggravé : CC aggravé (RCP-8.5).

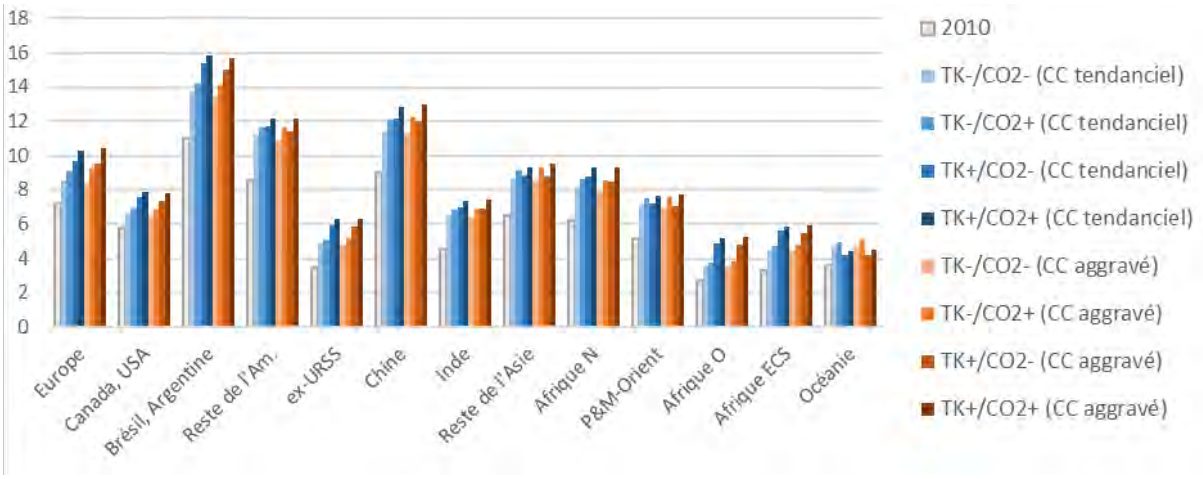
La procédure nous conduit à estimer huit jeux de rendements à l'horizon 2050, cette gamme des possibles traduisant les incertitudes associées à trois facteurs majeurs d'évolution des rendements, soit (i) les évolutions techniques, (ii) l'expression « au champ » de l'effet du CO_2 et (iii) l'intensité du CC. Ces huit jeux de projections sont illustrés par la Figure 5-7.

En guise d'éléments de discussion, les projections de rendements obtenues en combinant les hypothèses « TK- x CO2+/- x CC » tendanciel ont été comparées avec les projections de rendements « complètes » fournies dans le rapport FAO (2018) pour le scénario BAU, intégrant à la fois les effets des évolutions techniques (TK-) et ceux du CC tels qu'estimés par la méthode retenue par la FAO (1 seul modèle de culture, pas de prise en compte de l'effet CO_2, CC découlant du RCP6.0). Ces résultats sont présentés dans l'Encadré 5-2. Cette analyse permet de comparer deux méthodes d'estimation des effets du CC, à hypothèses d'évolution du contexte général et de dynamiques d'évolutions techniques similaires.

[74] sauf pour les prairies permanentes.

Figure 5-7. 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 CC (t/ha)

Rendement moyen toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires), pondéré par les surfaces occupées par chaque culture en « 2010 ».
Hypothèse TK : hypothèse relative à la dynamique des évolutions techniques : ralentissement (TK-) ou poursuite du rythme actuel (TK+).
Hypothèse 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 CC 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 CC ferait varier le rendement moyen de l'ensemble des cultures de 2 % (hypothèse de CC tendanciel) ou 10 % (hypothèse de CC 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, déjà pointé dans la Sous-Section 5.1.2, 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-tests 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 CC. Le Tableau 5-6 présente les variations du besoin estimé en surfaces cultivées entre « 2010 » et 2050 aux échelles de l'Europe (prise comme un ensemble) et du monde entier pour chacune de ces simulations-tests. Ces simulations montrent que l'intensité du CC (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 CC 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 CC, 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 (comme, par exemple, 2100) du fait d'écarts alors plus grands, en termes de paramètres climatiques, entre les deux hypothèses d'évolution du CC. *In fine*, pour les raisons expliquées ci-dessus, seule la trajectoire d'évolution tendancielle du CC est retenue dans les scénarios de référence et leurs analyses complémentaires.

Tableau 5-6. Variations du besoin en surfaces cultivées (Mha) entre "2010" et 2050 selon divers jeux de rendements végétaux prenant en compte (i) deux hypothèses d'évolutions techniques, (ii) deux hypothèses de capacité des plantes à valoriser le CO_2 et (iii) deux intensités de CC

	CC tendanciel (selon RCP 6.0)		CC aggravé (selon RCP 8.5)	
	Europe	Monde	Europe	Monde
TK+ / CO2+ Poursuite du rythme actuel des évolutions techniques et valorisation de l'effet CO_2 par les cultures	-21	-11	-22	-27
TK+ / CO2- Poursuite du rythme actuel des évolutions techniques mais pas de valorisation de l'effet CO_2 par les cultures	-14	71	-11	94
TK- / CO2+ Ralentissement des évolutions techniques mais valorisation de l'effet CO_2 par les cultures	-12	140	-12	126
TK- / CO2- Ralentissement des évolutions techniques et pas de valorisation de l'effet CO_2 par les cultures	*-4*	*223*	*-1*	*252*

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.

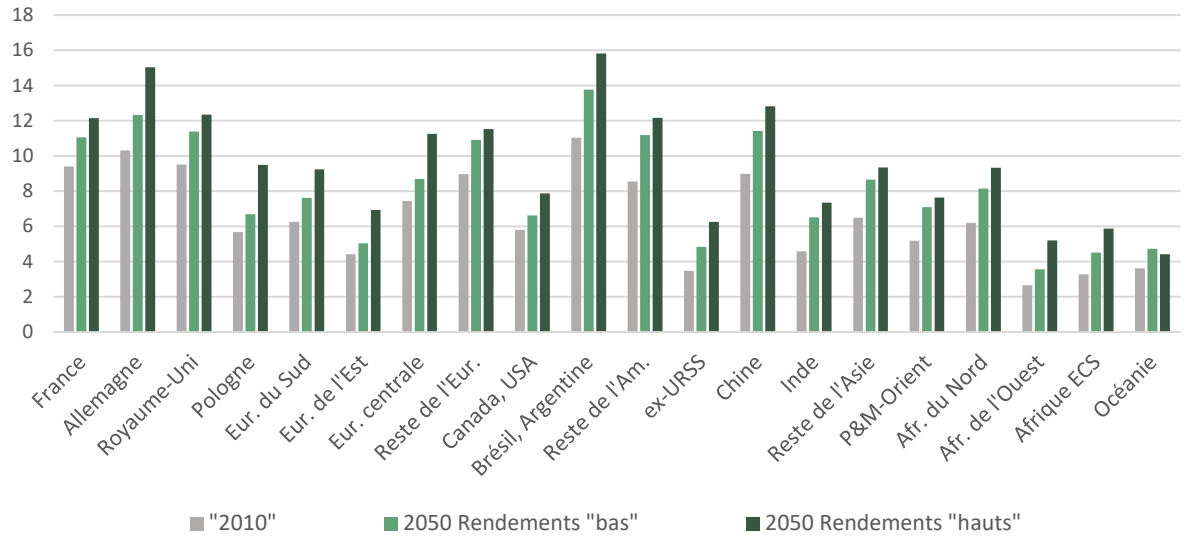
L'analyse nous conduit donc, *in fine*, à retenir pour chaque culture deux jeux contrastés de projections des rendements végétaux à l'horizon 2050, un jeu dit de « rendements bas » et un jeu dit de « rendements hauts ». Le jeu des « rendements bas » suppose un ralentissement des évolutions techniques 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 pleine valorisation « au champ » de l'effet de fertilisation du CO_2 (hypothèses TK+ et CO_2+)[75]. 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 en Figure 5-8[76], 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.

[75] Rappelons que pour les prairies permanentes, aucune hypothèse n'est formulée sur la dynamique des évolutions techniques à l'horizon 2050. Seul l'effet du changement climatique étant pris en compte, les deux jeux de « rendements bas » et de « rendements hauts » ne se distinguent que par l'hypothèse relative à la capacité de ces couverts à valoriser l'effet fertilisant du CO_2 : le jeu de « rendements bas » suppose l'absence de sa valorisation tandis que le jeu de « rendements hauts » suppose sa pleine valorisation.

[76] L'Annexe 5.E présente les niveaux de rendements 2050 retenus dans les scénarios de référence pour les principales cultures actuellement développées dans les 21 régions du monde, ainsi que pour les fourrages cultivés et les prairies permanentes.

Figure 5-8. 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

Rendement moyen toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires), pondéré par les surfaces occupées par chaque culture en « 2010 ».

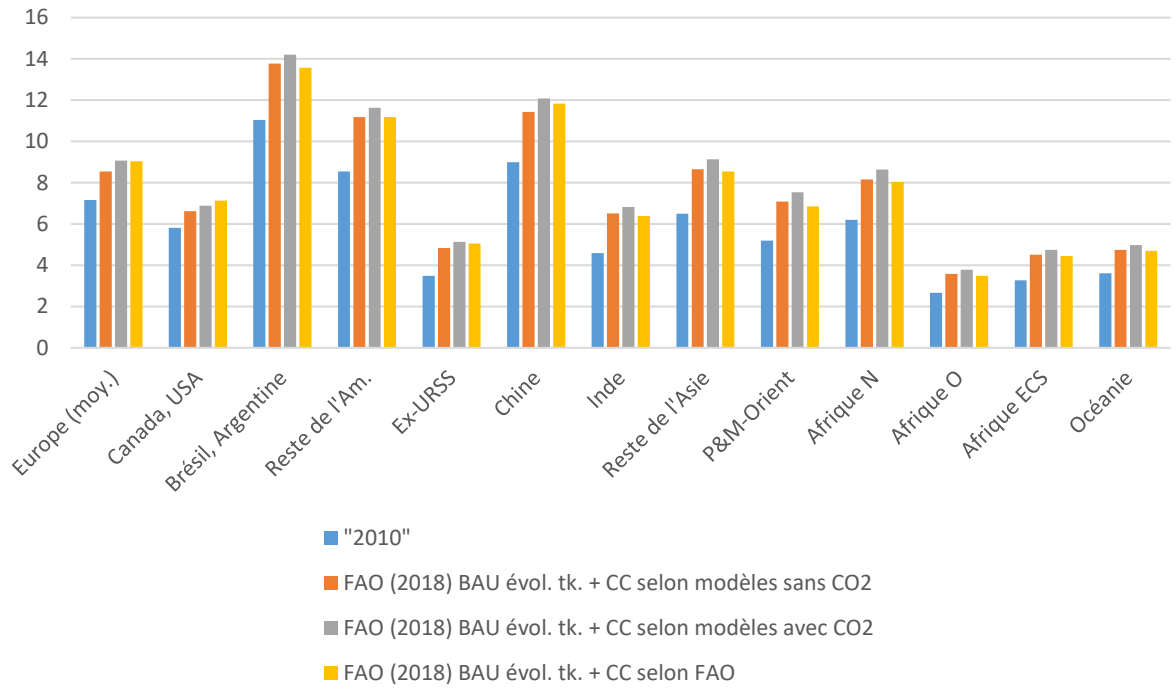


Toutes cultures confondues, la gamme de projections de rendements retenue dans le cadre de la présente étude équivaut à un taux d'évolution annuel du rendement moyen de +0,64 % (« rendements bas ») à +1,00 % (« rendements hauts ») à l'échelle mondiale. Cette fourchette de valeurs est cohérente avec les 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 CC sur les rendements.

Encadré 5-2. Comparaison des estimations des effets du CC sur les rendements des cultures obtenues selon Makowski et al. (*in press*) et selon FAO (2018)

Comme on l'a déjà noté, la prise en compte des effets du CC dans le rapport FAO (2018) exclut explicitement l'effet CO_2, considérant que celui-ci est négligeable au regard d'autres effets non explicitement pris en compte dans les simulations données par FAO-IIASA GAEZ v4. La comparaison des résultats proposés dans FAO (2018) incluant évolutions techniques et CC avec les résultats que l'on obtient en appliquant aux projections FAO (2018) « évolutions techniques » la démarche s'appuyant sur les résultats Makowski *et al.* (*in press*) avec ces deux variantes « sans effet CO_2 » et « avec effet CO_2 », met en lumière que, pour la plupart des cultures en C3, les projections FAO (2018) se rapprochent de façon très nette des résultats que l'on obtiendrait si on ne tenait pas compte de l'effet positif de la [CO_2] dans l'application des résultats Makowski *et al.* (*in press*). Quelques régions se décalent cependant de ce schéma général : les résultats FAO (2018) avec CC pour l'Europe ou Canada-USA s'apparentent aux résultats Makowski *et al.* (*in press*) avec effet CO_2, tout comme le riz en Chine ou le blé en Ex-URSS.

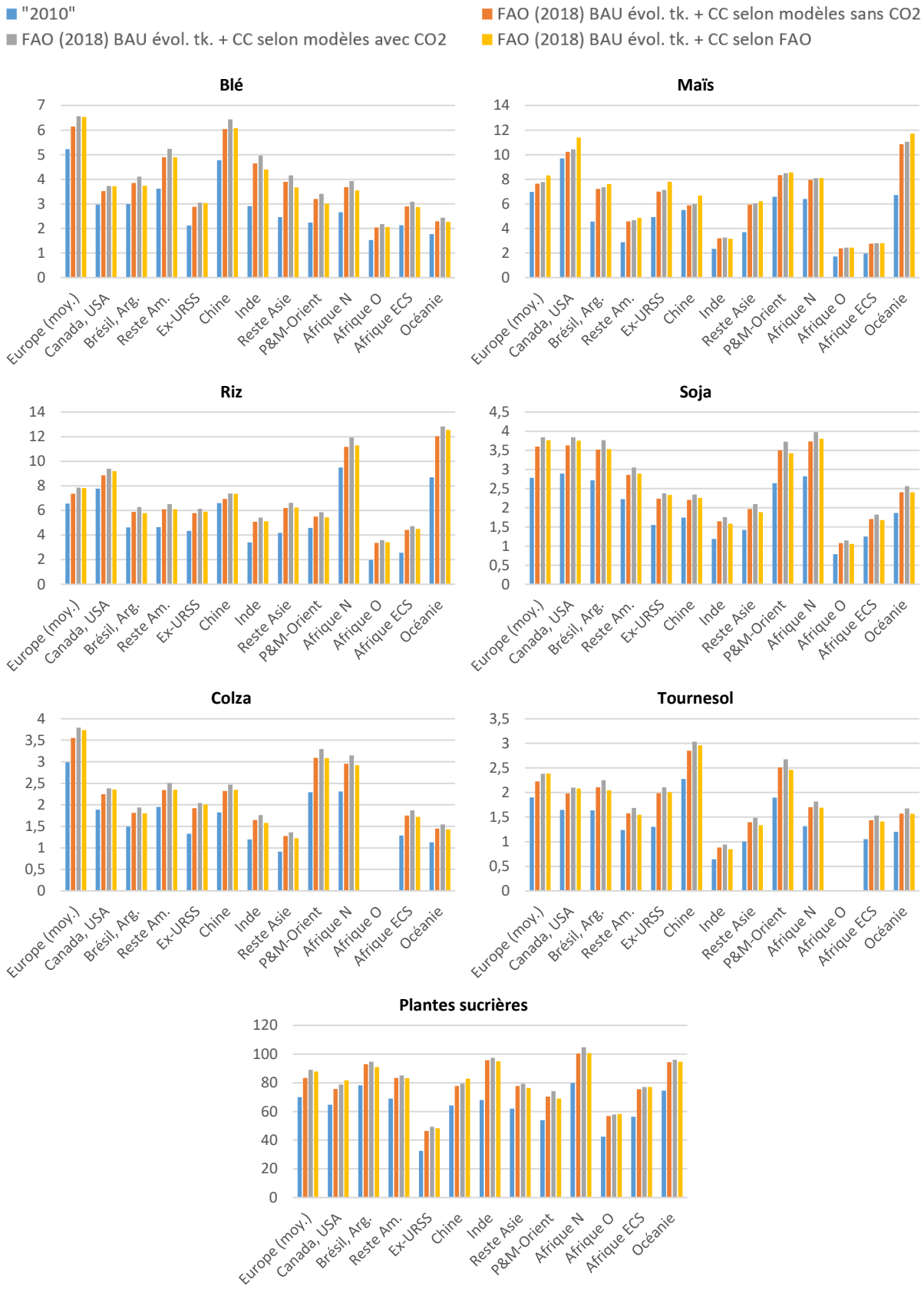
Figure 1. Effets du CC sur les rendements moyens, toutes cultures confondues (hors fourrages cultivés et prairies temporaires) – Comparaison des projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques + CC » et des résultats obtenus par application des modèles établis par Makowski *et al.* (*in press*) aux projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques » (en t/ha)



Les résultats proposés par FAO (2018) avec CC sont, pour le maïs mais aussi pour les plantes sucrières, difficiles à expliquer et assez troublants. Ils débouchent systématiquement sur des niveaux de rendement supérieurs à ceux obtenus par application des résultats Makowski *et al.* (*in press*) avec effet CO_2 et même, dans nombre de régions, au-dessus des projections FAO (2018) sans CC. Tout se passe ici comme si les projections FAO (2018) ne prenaient pas en compte l'ampleur de l'effet négatif de l'accroissement des températures sur la croissance du maïs (et de la canne à sucre) tel que les résultats Makowski *et al.* (*in press*) le mettent en évidence.

Compte tenu de la difficulté à comprendre la logique des résultats FAO (2018) relatifs au maïs et aux plantes sucrières, associée à la non prise en compte, dans FAO (2018), de l'effet CO_2 dont on a vu qu'il pouvait influencer de façon très significative les résultats, on a préféré ici n'introduire les effets du CC qu'au travers de l'application des résultats de la démarche Makowski *et al.* (*in press*) aux projections tenant compte des évolutions techniques déjà retenues à l'issue des raisonnements précédemment énoncés. Cette façon de procéder, qui a le mérite de garder de la cohérence dans la façon d'intégrer les effets du CC, permet également d'analyser la variabilité des résultats de simulation selon que l'on prend ou non en compte l'effet [CO_2].

Figure 2. Effets du CC sur les rendements par culture – Comparaison des projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques + CC » et des résultats obtenus par application des modèles établis par Makowski *et al.* (*in press*) aux projections « FAO (2018) BAU évolutions techniques » (en t/ha)



5.4. Projections de rendements utilisées dans les analyses de sensibilité des scénarios de référence

Outre les deux jeux de projections de rendements retenus pour caractériser les scénarios de référence, des projections de rendement « alternatives » ont également été retenues dans le but de réaliser des analyses de sensibilité des résultats des scénarios de référence aux hypothèses relatives aux rendements.

Il s'agit notamment de tester la sensibilité des résultats (notamment en termes d'estimation du besoin en surfaces cultivées en 2050) :

- à la prise en compte des effets des évolutions techniques sur les rendements, dans toutes les régions du monde ;
- à une hypothèse alternative aux rendements « bas » de référence, dans laquelle les évolutions techniques maintiennent une dynamique relativement forte en Europe tandis qu'elles sont plus modérées dans le reste du monde ;
- à une hypothèse alternative dans laquelle les rendements européens seraient plus sensibles au déficit hydrique qui devrait toucher certaines régions européennes en 2050 que ce qui est estimé dans les rendements de référence.

Cette section présente le mode de construction de ces deux dernières hypothèses alternatives.

5.4.1. Hypothèse alternative d'une absence d'évolutions techniques entre « 2010 » et 2050

Cette première hypothèse alternative consiste à fixer les rendements en 2050 sans tenir compte des évolutions techniques. Les projections de rendements ainsi définies sont obtenues en affectant aux niveaux de rendements de « 2010 » les effets du CC tels qu'estimés par les modèles statistiques définis dans le cadre de l'étude et présentés en Sous-Section 5.1.2. Les rendements « alternatifs » sont projetés selon les deux modalités CO2- et CO2+.

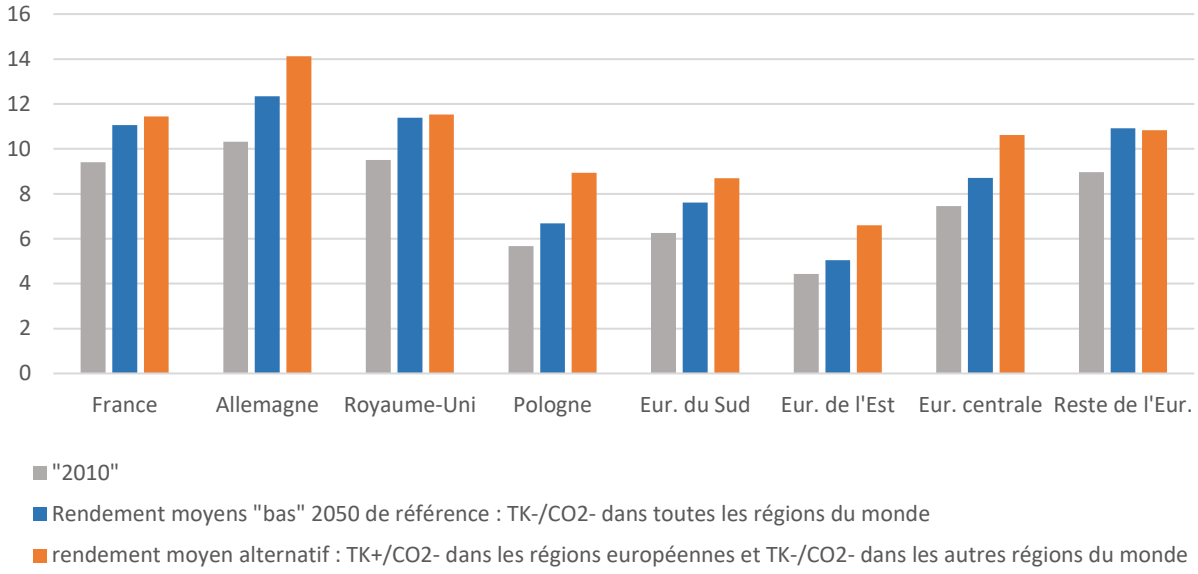
Dans cette hypothèse, on retrouve ici le fort recul des rendements des cultures par rapport à « 2010 » si ceux-ci n'étaient affectés que par le CC. Seules les plantes en C3 et sous l'hypothèse forte d'une capacité à exprimer l'effet de fertilisation associé à la [CO_2] seraient susceptibles de voir leurs niveaux de rendements augmenter quelque peu dans un tel cas (*cf.* Sous-Section 5.1.2).

5.4.2. Hypothèse alternative d'évolutions techniques soutenues dans les huit régions européennes et plus modérées dans les autres régions du monde

Cette deuxième hypothèse alternative vient se substituer aux rendements « bas » de référence. Elle envisage une différenciation des projections de rendements en appliquant aux régions européennes l'hypothèse TK+ (fondée sur les « projections FAO (2012) retravaillées ») et l'hypothèse TK- pour toutes les autres régions du monde. Rappelons que, pour les régions européennes, les « projections FAO (2012) retravaillées » s'appuient, à quelques exceptions près, sur le prolongement des tendances observées entre 1995 et 2015 pour caractériser la dynamique des évolutions techniques entre « 2010 » et 2050 (cf. Sous-Section 5.2.1). A ces hypothèses différenciées relatives aux évolutions techniques s'ajoute une unique hypothèse CO_2- appliquée indifféremment à l'ensemble des régions du monde (effets estimés sous l'hypothèse d'un CC « tendanciel », en cohérence avec les scénarios de référence). Cette hypothèse vise à examiner les effets d'une différenciation (pérenne ou ponctuelle) des processus d'évolution des rendements entre les régions européennes et les autres régions du monde, ce qui revient à envisager un « choc » de rendements (ici, positif) dans les régions européennes sans modification de la tendance retenue pour toutes les autres régions (ici, un effet modéré des évolutions techniques sur les rendements hors régions européennes).

Les Figures 5-11 et 5-12 illustrent les niveaux de rendements ainsi obtenus en 2050 dans les huit régions européennes, en comparaison avec les niveaux de « 2010 » et les niveaux de rendements « bas » de référence en 2050.

Figure 5-11. Niveaux de rendement moyen (toutes cultures hors fourrages et prairies permanentes) dans les différentes régions européennes : rendement « 2010 », rendement « bas » 2050 de référence (TK-/CO2-), et rendement 2050 sous les hypothèses TK+/CO2- (t/ha)

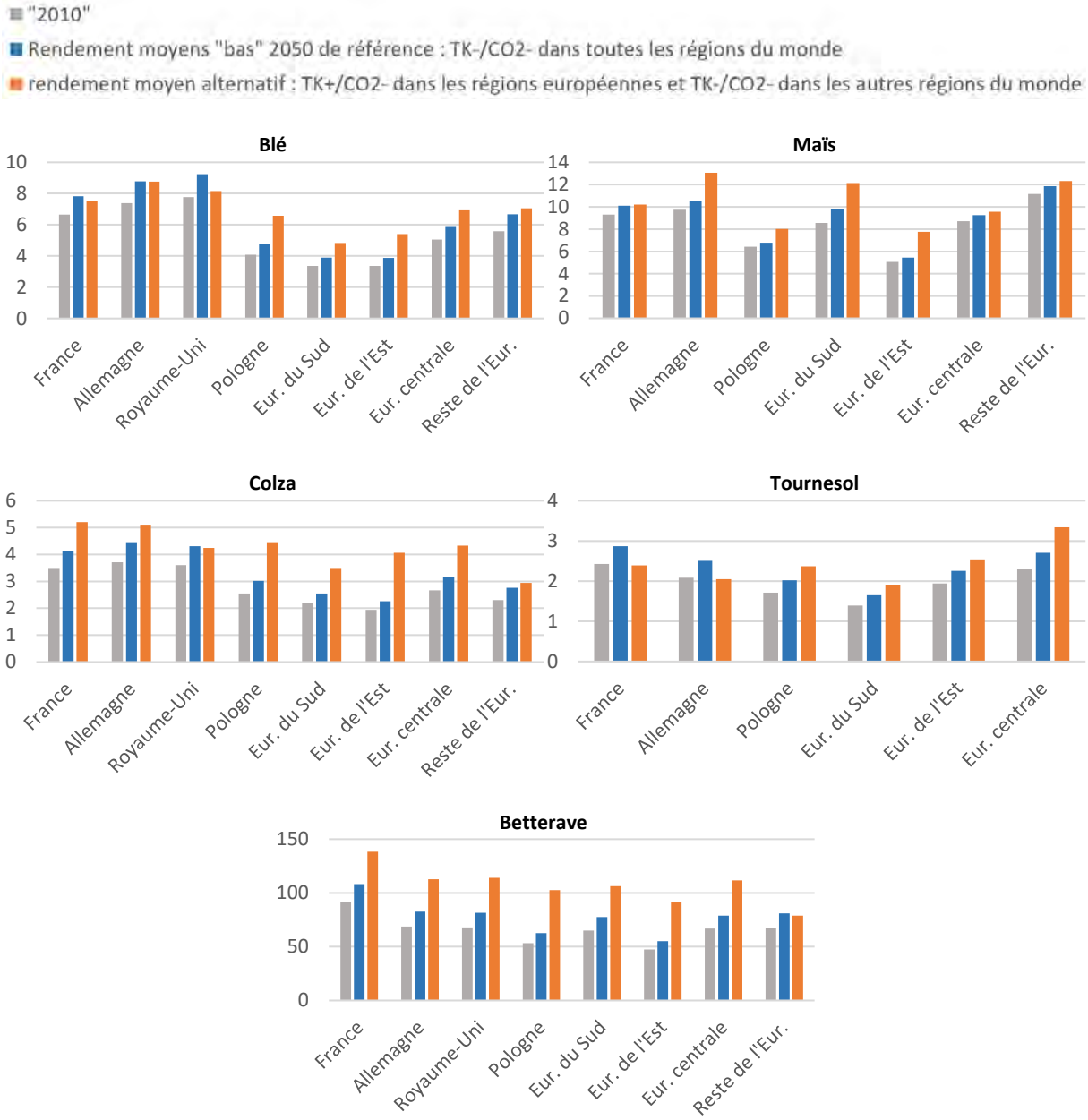


Bien sûr, sans retrouver les niveaux de rendements européens de l'hypothèse « haute » tels qu'ils apparaissent dans la Figure 5-8, l'hypothèse TK+/CO_2- amène à une évolution des niveaux de rendements plus favorables dans les diverses régions européennes[77] que sous l'hypothèse « basse » de nos rendements antérieurs. L'écart moyen entre les deux séries (Figure 5-11) est moins marqué pour la France et pour le Royaume-Uni (ainsi que pour le Reste de l'Europe) que pour les autres régions européennes. Pour comprendre ces différences, il faut revenir à la procédure qui a permis d'obtenir les rendements TK- pour les différentes régions européennes. Si la procédure retenue pour TK+ conduit à une différenciation des taux d'évolution entre les régions pour chacune des cultures, ce n'est plus le cas pour TK- puisque ces derniers sont obtenus par l'application aux rendements « 2010 », de chaque culture, du taux d'évolution issu de FAO (2018) pour l'ensemble de l'Europe, c'est-à-dire un taux moyen et identique pour chaque région européenne. Cette façon de procéder débouche sur quelques évolutions divergentes, comme pour le blé en France et au Royaume-Uni, ou pour le Tournesol en France et en Allemagne (Figure 5-12)[78].

[77] À l'exception de « Reste de l'Europe ».

[78] L'hypothèse de TK+ se basant essentiellement sur une prolongation des tendances 1995-2015 pour les régions européennes conduit pour certaines régions et en particulier la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni et le Reste de l'Europe a la prise en compte d'une certaine stagnation de rendements. Le résultat de cette hypothèse conduit donc pour certains produits à une moindre augmentation de rendements sous cette hypothèse que lorsqu'on applique les projections d'évolution technique basées sur la FAO (2018).

Figure 5-12. Niveaux de rendement des cultures majoritaires dans les différentes régions européennes : rendement « 2010 », rendement « bas » 2050 de référence (TK-/CO2-), et rendement 2050 sous les hypothèses TK+/CO2- (t/ha)



5.4.3. Hypothèse alternative d'une plus grande sensibilité des rendements européens au déficit hydrique à l'horizon 2050

Un des paramètres clefs du CC 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 5.1.1). 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, il nous a semblé intéressant de tester la sensibilité 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 CC, l'impact des variations des précipitations annuelles sur la base des résultats de l'analyse quantitative réalisée dans le cadre de cette étude (*cf.* Section 5.1.2). 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.

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 (*cf.* méthode présentée dans la Section 1.1.2 dans le Chapitre 1). 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. 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 (i) sur la part de la surface irriguée dans la surface récoltée totale en 2050 et (ii) 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.

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[79].

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.

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 5-7).

[79] 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.

Tableau 5-7. 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)	Été (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/)

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, correspond à une baisse équivalente de la consommation de la plante (transpiration).

Ainsi, pour les situations où la pluviométrie diminue[80] :

$$Rdt_pluv_corr_{i,r,2050} = Rdt_pluv_{i,r,2050} * \left(1 + (delta_pluvio_{k,r} \quad * \ \alpha_i)\right)$$

k : cultures pluviales d'hiver ou d'été
r = France, l'Europe du Sud, l'Europe de l'Est et l'Europe centrale

$Rdt_pluv_corr_{i,r,2050}$ les rendements pluviaux corrigés sous l'impact d'un impact accentué du déficit hydrique, $Rdt_pluv_{i,r,2050}$ le rendement pluvial estimé dans le scénario de référence 2050, $delta_pluvio_{k,r}$ la variation de la pluviométrie selon les périodes de croissance des cultures d'hiver et d'été :

$$delta_pluvio_{k,r} \quad = \frac{pluvio_{k,r,2050} - pluvio_{k,r,1996-2015}}{pluvio_{k,r,1996-2015}} \qquad \text{ici} < 0$$

α_i, le facteur de réduction du rendement (0 > ou > 1 selon la sensibilité de chaque culture) (Doorenbos et Kassam, 1979).

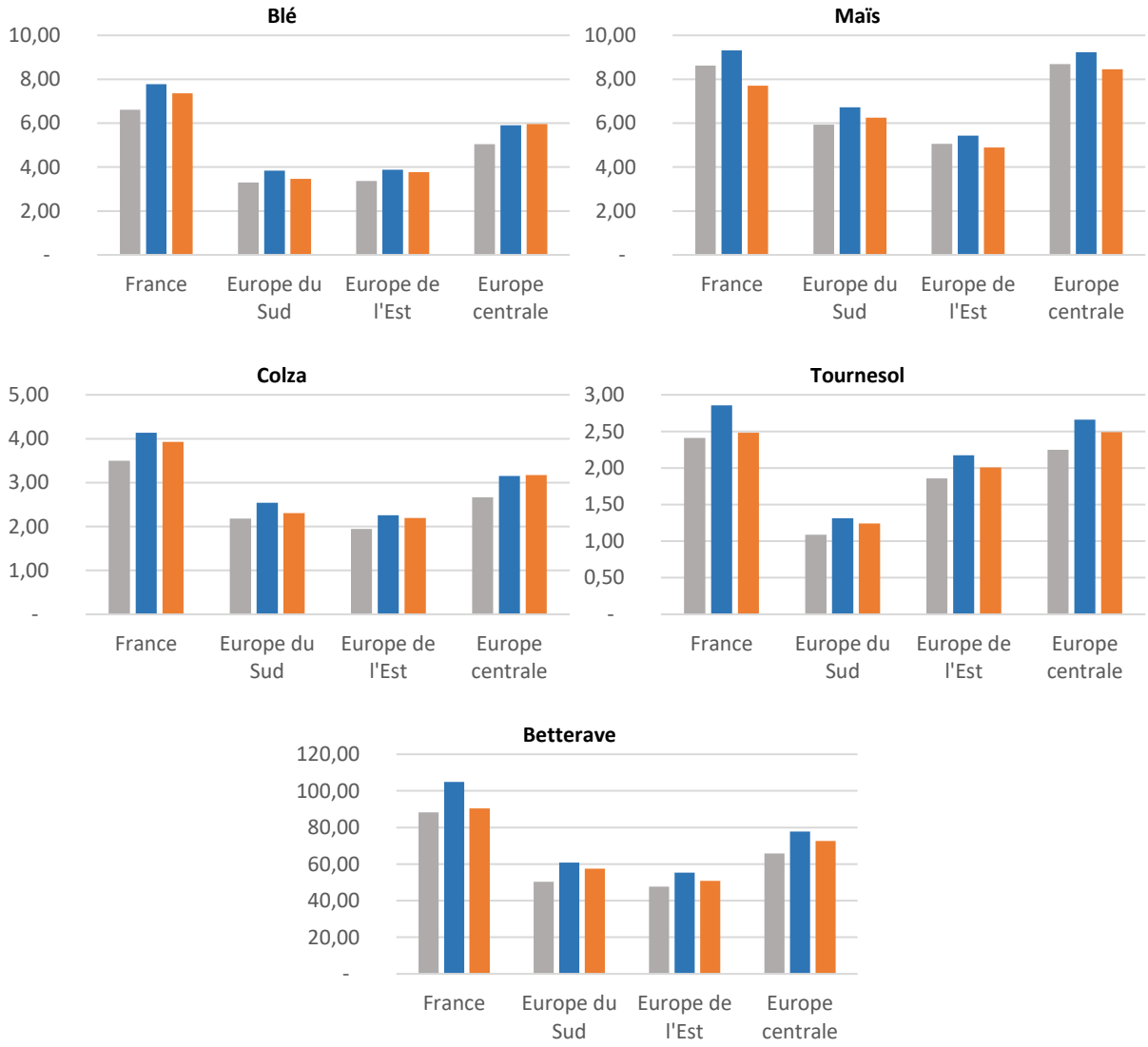
Ce calcul est réalisé pour chaque culture disposant d'un rendement pluvial en 2050[81].

La Figure 5-13 compare les rendements pluviaux de référence en 2050 avec les rendements pluviaux alternatifs sous hypothèse d'un impact accentué du déficit hydrique, pour les principales grandes cultures et pour les quatre régions européennes concernées par l'analyse.

[80] Les rendements pluviaux des cultures d'hiver en Europe centrale n'ont pas été corrigés car la pluviométrie augmenterait légèrement dans cette zone sur la période mars à juin.

[81] 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.

Figure 5-13. Rendements pluviaux « 2010 » (barres grises) et rendements pluviaux 2050 de référence (barres bleues) et sous hypothèse d'une sensibilité accrue au déficit hydrique (barres orange) pour les cultures majoritaires dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (tonnes/ha)



Enfin et en troisième lieu, 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. Les parts actuelles (« 2010 ») des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales varient fortement selon les régions européennes. Dans les quatre régions concernées ici, ces parts sont égales à 7 % en France, 18 % en Europe du Sud, 6 % en Europe de l'Est et 2 % en Europe centrale. Au total, en Europe, 8 % des surfaces cultivées sont irriguées en "2010" (Tableau 5-8).

Nous faisons ici l'hypothèse alternative que ces parts diminuent de moitié entre « 2010 » et 2050 dans les quatre régions contraintes, alors qu'elles se maintiendraient entre « 2010 » et 2050 dans les scénarios de référence[82].

[82] Pour information, la FAO (2018) suppose que, dans son scénario BAU, la part des surfaces irriguées dans les surfaces cultivées totales augmenterait 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.

Tableau 5-8. Surfaces irriguées et pluviales cultivées en « 2010 » (en milliers d'ha)

	Surfaces Irriguées (1000 ha)	Surfaces Pluviales (1000 ha)	Surfaces totales Cultivées (1000 ha)	Part surfaces Irriguées (%)
France	1 382	17 910	19 292	7%
Allemagne	529	11 559	12 088	4%
Royaume-Uni	63	6 008	6 072	1%
Pologne	93	11 622	11 715	1%
Europe du Sud	6 609	29 363	35 972	18%
Europe de l'Est	1 135	19 125	20 260	6%
Europe Centrale	134	6 383	6 517	2%
Reste de l'Europe	657	14 518	15 175	4%
Total Europe	10 603	116 489	127 092	8%
Canada-USA	16 559	176 675	193 234	9%
Brésil-Argentine	4 044	112 100	116 143	3%
Reste de l'Amérique	10 109	58 658	68 767	15%
Ex-URSS	15 482	186 465	201 947	8%
Chine	54 022	68 515	122 537	44%
Inde	60 580	108 862	169 442	36%
Reste de l'Asie	46 040	125 917	171 957	27%
Proche et Moyen-Orient	13 780	43 403	57 183	24%
Afrique du Nord	7 384	20 899	28 283	26%
Afrique de l'Ouest	1 913	96 577	98 490	2%
Afrique ECS	4 796	129 338	134 134	4%
Océanie	1 512	46 407	47 919	3%
Reste du monde	191	2 081	2 273	8%
Total Monde	247 014	1 292 385	1 539 399	16%

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[83]. 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 différent selon que les régimes alimentaires évoluent de façon tendancielle ou favorable à la santé.

La Figure 5-14 compare les rendements moyens en 2050 des 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.

La Figure 5-15 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 %).

[83] *Cf.* Section 3 du rapport du volet d'analyses bibliographiques.

Figure 5-14. Rendements moyens « 2010 » (barres grises) et rendements moyens « bas » de référence (barres bleues) et sous hypothèse d'une sensibilité accrue au déficit hydrique (barres orange) en 2050 pour les principales grandes cultures dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (tonne/ha)

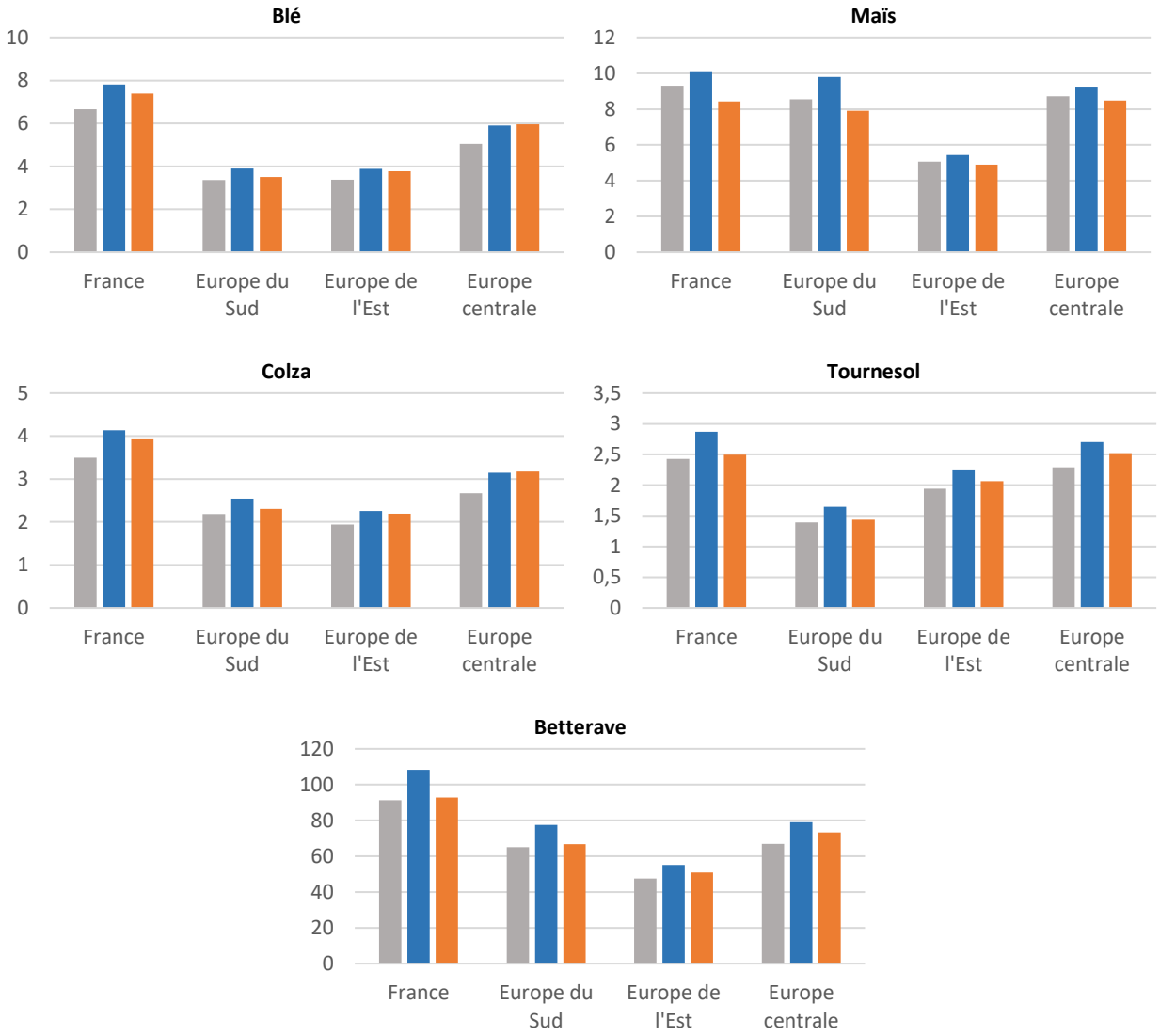
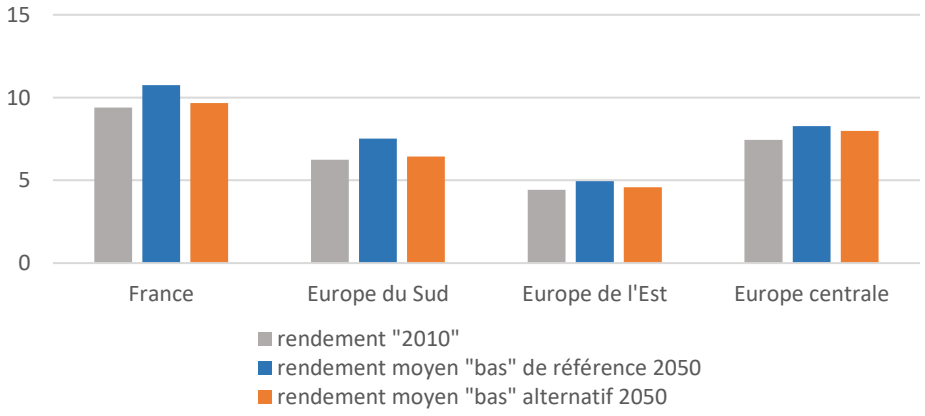


Figure 5-15. Rendements moyens « 2010 » et rendement moyen 2050 de référence sous hypothèse d'une sensibilité accrue au déficit hydrique pour l'ensemble des cultures (prairies permanentes) dans les quatre régions européennes concernées par l'analyse de sensibilité (tonne/ha)



Annexes du Chapitre 5.

5.A. Choix des données climatiques permettant de caractériser T° et P en 2050

Deux sources de données climatiques ont été identifiées et expertisées par Serge Planton pour caractériser T° et P à l'horizon 2050 : les données du GIEC et celles de la Banque mondiale[84].

Concernant la température (T°) et les précipitations (P), les projections fournies par le GIEC sur son *Data Distribution Center*[85] ne permettent pas directement de caractériser les variations de ces deux paramètres pour chaque région « AE2050 » entre la situation « 2010 » et l'horizon 2050. En premier lieu, elles sont agrégées à l'échelle de 26 zones géographiques qui ne correspondent ni aux régions « AE2050 », ni à un découpage administratif (Figure 5.A.1). La correspondance entre les deux découpages géographiques n'est pas immédiate et nécessite un travail de formulation d'hypothèses pour attribuer des valeurs à chaque région « AE2050 ». La difficulté de l'exercice tient au fait que certaines zones « GIEC » englobent plusieurs régions « AE2050 » et que certaines régions « AE2050 » englobent plusieurs zones « GIEC ». De plus les zones « GIEC » incluent les mers et les océans alors que les régions « AE2050 » ne sont que des agrégats de surfaces émergées. En second lieu, les variations de T° et de P projetées à l'horizon 2046-2065 (le plus proche de 2050) se rapportent à la période de référence 1986-2005, ce qui traduit une évolution du climat sur une période de 60 ans, plus longue que la période considérées dans AE2050. Utiliser les variations fournies par le GIEC reviendrait donc à « amplifier » le signal du CC.

Dans le but d'améliorer l'intégration des connaissances scientifiques sur le CC dans les processus de prise de décision, la Banque mondiale a créé le *Climate Change Knowledge Portal* (CCKP), plateforme en ligne qui met à disposition des informations, données et outils relatifs au CC aux échelles mondiale, régionale et nationale. À partir des données géo-spatialisées obtenues au pas de temps mensuel et pour les quatre RCP dans le cadre du CMIP5 (*cf.* Encadré 5.A.1), la Banque Mondiale a recalculé des valeurs moyennes par pays pour quatre fenêtres climatologiques futures de 20 années[86]. Le Tableau 5.A.1 compare les caractéristiques de données accessibles *via* le portail CCKP et *via* le *Data Distribution Center* du GIEC. Les données de la Banque mondiale présentent l'avantage d'être agrégées à l'échelle des pays. Elles sont de plus disponibles pour l'horizon 2040-2059. Avant de conclure à l'utilisation des données de la Banque mondiale dans AE2050, la fiabilité[87] des estimations de T° et de P moyennes, données nécessaires pour nos projections, a été évaluée et validée par Serge Planton pour l'usage qui en est fait dans la présente étude, à partir de l'analyse du document « *Metadata of the Climate Change Knowledge Portal* »[88]. En effet, le processus de construction de la base et un contrôle de qualité ont été effectués par le NCAR (*National Center for Atmospheric Research*)[89]. De plus, le document « *Metadata of the Climate Change Knowledge Portal* » explicite le mode de passage des données géo-spatialisées à l'échelle des pays : les données de CMIP5 ont été d'abord projetées par interpolation bilinéaire sur une grille commune de 1° par 1°, et c'est sur cette grille qu'ont été calculées les moyennes par pays et par période. Les données de T° et de P annuelles moyennes de la Banque mondiale ont donc été retenues[90].

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

[85] http://www.ipcc-data.org/documents/ar5/extremes/

[86] La température moyenne à la surface du globe présente naturellement une grande variabilité aux échelles interannuelle et décennale. Les tendances calculées sur des séries inférieures à 20 ans sont donc très sensibles à la date de début et de fin de la période considérée, et ne reflètent généralement pas les tendances climatiques de long terme.

[87] Rubrique disclaimer du portail : « Information in the CCKP is provided for informational purposes only and does not constitute legal or scientific advice or service. The World Bank makes no warranties or representations, express or implied as to the accuracy or reliability of the CCKP or the data contained therein. A user of the CCKP should seek qualified expert for specific diagnosis and analysis of a particular project. »

[88] *Metadata of the Climate Change Knowledge Portal 2018* : https://climateknowledgeportal.worldbank.org/themes/custom/wb_cckp/resources/data/Metadata.pdf

[89] NCAR: http://ncar.ucar.edu

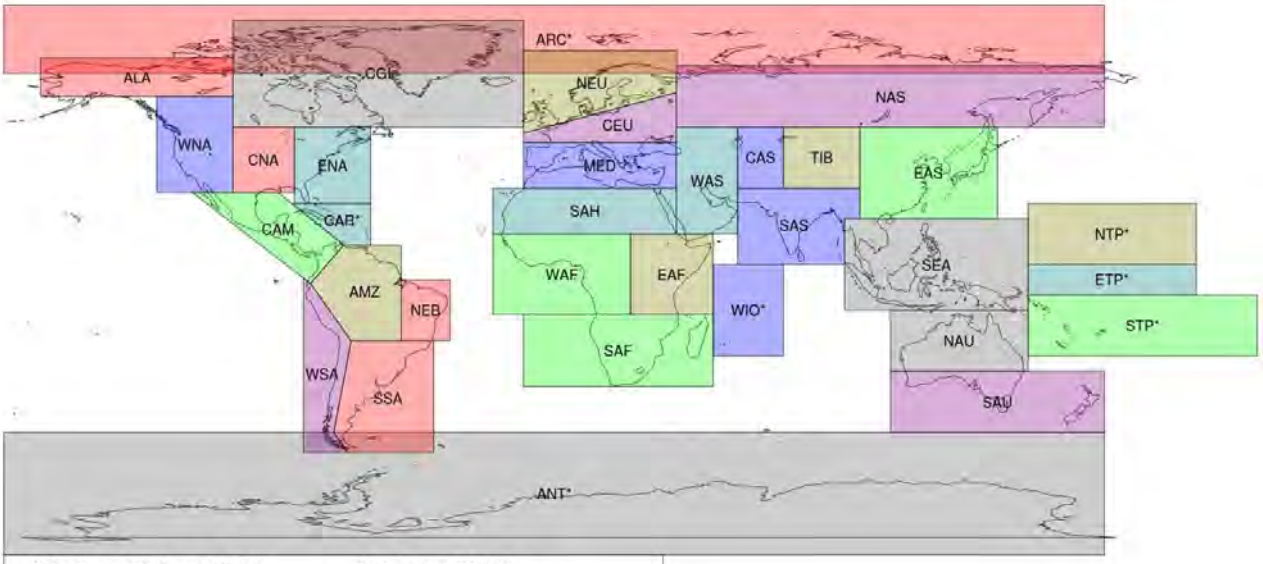
[90] Notons que contrairement aux estimations de T° et de P moyennes jugées robustes, les données relatives aux évènements extrêmes (qui n'auraient de toute façon pas pu être exploitées dans le cadre de cette étude) ont été jugées par Serge Planton comme insuffisamment robustes.

Tableau 5.A.1 – Caractéristiques des données extraites du portail *Climate Change Knowledge Portal* en comparaison avec les données rendues disponibles par le GIEC

	Climate Change Knowledge Portal de la Banque Mondiale https://climateknowledgeportal.worldbank.org/	*Data Distribution Center* du GIEC http://www.ipcc-data.org/documents/ar5/extremes/
Scénarios disponibles	RCP2.6 ; RCP4.5 ; RCP6.0 ; RCP8.5	RCP2.6 ; RCP4.5[91] ; RCP6.0 ; RCP8.5
Horizons temporels futurs	Moyenne 2020-2039 Moyenne 2040-2059 Moyenne 2060-2079 Moyenne 2080-2099	« 2035 » (= période 2016-2035) « 2065 » (= période 2046-2065) « 2100 » (= période 2081-2100)
Variables disponibles	T° mensuelles (moyennes, minimales et maximales) : valeurs absolues et variation par rapport à 1986-2005 P mensuelles moyennes : valeurs absolues et variation par rapport à 1986-2005	Variation de T° en °C (médiane et dispersion des différents modèles) par rapport à 1986-2005 Variation de P en % (min, max, médiane et dispersion des différents modèles) par rapport à 1986-2005
Période historique	1901-2016*	/
Découpage géographique	Pays	26 régions terrestres et océaniques

* La mise à disposition de données historiques de T° et de P mensuelles moyennes par le CCKP permet de recalculer des variations de T° et de P par rapport à une période de référence différente de celle du GIEC (1986-2005).

Figure 5.A.1 – Découpage géographique adopté dans le 5e rapport d'évaluation du GIEC



ALA : Alaska/N.W. Canada [ALA:1]
AMZ : Amazon [AMZ:7]
CAM : Central America/Mexico [CAM:6]
CAR* : small islands regions Caribbean
CAS : Central Asia [CAS:20]
CEU : Central Europe [CEU:12]
CGI : Canada/Greenland/Iceland [CGI:2]
CNA : Central North America [CNA:4]
EAF : East Africa [EAF:16]
EAS : East Asia [EAS:22]
ENA : East North America [ENA:5]
MED : South Europe/Mediterranean [MED:13]
NAS : North Asia [NAS:18]
NAU : North Australia [NAU:25]
NEB : North-East Brazil [NEB:8]
NEU : North Europe [NEU:11]
SAF : Southern Africa [SAF:17]
SAH : Sahara [SAH:14]
SAS : South Asia [SAS:23]
SAU : South Australia/New Zealand [SAU:26]
SEA : Southeast Asia [SEA:24]
SSA : Southeastern South America [SSA:10]
TIB : Tibetan Plateau [TIB:21]
WAF : West Africa [WAF:15]
WAS : West Asia [WAS:19]
WNA : West North America [WNA:3]
WSA : West Coast South America [WSA:9]
ANT* : Antarctica
ARC* : Arctic
NTP* : Pacific Islands region[2]
STP* : Southern Topical Pacific
ETP* : Pacific Islands region[3]
WIO* : West Indian Ocean

Source : http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/ar5_regions.html

[91] Les données du RCP4.5 sont celles présentées dans le rapport AR5.

Encadré 5.A.1. CMIP5 : https://cmip.llnl.gov/cmip5/

Le projet CMIP5 est la 5ème phase d'un protocole expérimental étudiant standard développé dans le cadre du WCRP (World Climate Research Program) pour l'étude des modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère. Il vise à réaliser des simulations climatiques de façon coordonnée entre différents groupes de recherche au niveau international.
Chaque centre travaille sur les climats passées et futurs en utilisant ses propres modèles climatiques et simule année après année, de 1850 à 2300 les CC futurs selon différents scénario RCP d'émissions. Le projet permet ainsi d'estimer l'incertitude liée à l'imperfection des modèles et donc d'évaluer la vraisemblance des modèles de climat. Cela permet de comprendre les différences entre les projections climatiques issues des différents modèles et par conséquent d'améliorer la compréhension du climat. Cette 5ème phase a rassemblé près de 30 centres climatiques du monde entier et une cinquantaine de modèles climatiques. Les résultats de ces recherches sont pris en compte dans le rapport AR5 du GIEC.

Sources : Wikipédia et Météo France

NB : Les données CMIP5 utilisées par le *Climate Change Knowledge Portal* sont issus de 35 modèles (liste p.7 du document Metadata). Les projections des variables températures et précipitations sont basées sur les 16 de ces modèles qui fournissent des résultats de simulations pour l'ensemble des 4 scénarios RCP.

5.B. Processus d'ajustement des projections FAO (2012) pour estimer les effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements

Cette annexe présente le mode de projection retenu pour estimer la variation des rendements sous le seul effet des évolutions techniques « soutenues », à l'issu de l'analyse comparative des projections de rendements obtenues en appliquant les taux de croissances annuels moyens estimés pour chaque couple « culture X région » par Alexandratos et Bruinsma (2012) avec les projections de rendements obtenues en appliquant le taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005 ou le taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015.

Table des illustrations

Tableau 1 : Projections de rendements des plantes et des produits sucriers 106
Tableau 2 : Projections de rendements du maïs 107
Tableau 3 : Projections de rendements du blé 108
Tableau 4 : Projections de rendements du colza 109
Tableau 5 : Projections de rendements du tournesol 110
Tableau 6 : Projections de rendements du soja 111
Tableau 7 : Projections de rendements du riz 112
Tableau 8 : Projections de rendements des fibres 113
Tableau 9 : Projections de rendements des fruits et légumes 114
Tableau 10 : Projections de rendements du fruit du palmier à huile 115
Tableau 11 : Projections de rendements des céréales secondaires 116
Tableau 12 : Projections de rendements des autres oléoprotéagineux 117
Tableau 13 : Projections de rendements des légumineuses 118
Tableau 14 : Projections de rendements des racines et tubercules 119
Tableau 15 : Projections de rendements des autres produits végétaux 120
Figure 1 : Projections de rendements pour la France 121
Figure 2 : Projections de rendements pour l'Allemagne 123
Figure 3 : Projections de rendements pour le Royaume-Uni 125
Figure 4 : Projections de rendements pour la Pologne 127
Figure 5 : Projections de rendements pour l'Europe du sud 129
Figure 6 : Projections de rendements pour l'Europe de l'Est 131
Figure 7 : Projections de rendements pour l'Europe Centrale 133
Figure 8 : Projections de rendements pour le reste de l'Europe 135
Figure 9 : Projections de rendements pour l'ex-URSS 137
Figure 10 : Projections de rendements pour le Canada et les Etats-Unis 139
Figure 11 : Projections de rendements pour le Brésil et l'Argentine 141
Figure 12 : Projections de rendements pour le reste de l'Amérique 143
Figure 13 : Projections de rendements pour la Chine 145
Figure 14 : Projections de rendements pour l'Inde 147
Figure 15 : Projections de rendements pour le reste de l'Asie 149
Figure 16 : Projections de rendements pour le Proche et Moyen-Orient 151
Figure 17 : Projections de rendements pour l'Afrique du Nord 153
Figure 18 : Projections de rendements pour l'Afrique de l'Ouest 155
Figure 19 : Projections de rendements pour l'Afrique de l'Est, Centrale et du Sud 157
Figure 20 : Projections de rendements pour l'Océanie 159
Figure 21 : Projections de rendements pour le reste du monde 161

Tableau 5.B.1 – Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des plantes et des produits sucriers

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	91,4	143,0	1995-2015	35036
Germany	68,7	114,7	1995-2015	26309
United Kingdom	68,1	116,5	1995-2015	7829
Poland	53,3	106,5	1995-2015	10832
South Europe	65,1	111,5	1995-2015	9619
East Europe	47,5	95,9	1995-2015	4557
Central Europe	66,9	115,6	1995-2015	9187
Rest of Europe	67,4	80,0	FAO (2012)-UE27	16619
Canada, USA	64,8	77,8	FAO (2012)	54409
Brazil, Argentina	78,3	117,2	FAO (2012)	736244
Rest of America	69,0	103,0	FAO (2012)	195387
Former Soviet Union	32,5	67,2	1995-2015	50652
China	64,2	90,1	FAO (2012)	123361
India	68,0	105,1	FAO (2012)	306571
Rest of Asia	62,0	90,0	FAO (2012)	225271
Near and Middle East	53,9	87,5	ANMO	26661
North Africa	79,7	94,4	ANMO	26017
West Africa	42,4	64,1	FAO (2012)	5924
ECS Africa	56,3	80,4	FAO (2012)	68993
Oceania	74,4	90,6	FAO (2012)	31524
Rest of the World	24,9	29,6	FAO (2012)	588

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.2 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du maïs

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	9,3	10,7	1995-2015	15058,7
Germany	9,7	13,7	1995-2015	4594,6
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	6,4	8,5	1995-2015	1938,3
South Europe	8,6	12,7	1995-2015	18857,0
East Europe	5,1	8,2	1995-2015	25622,9
Central Europe	8,7	10,2	1995-2015	4327,0
Rest of Europe	11,2	13,0	FAO (2012)-UE27	1103,9
Canada, USA	9,7	14,5	1995-2015	331537,6
Brazil, Argentina	4,6	6,7	FAO (2012)	73776,2
Rest of America	2,9	4,2	FAO (2012)	35995,2
Former Soviet Union	4,9	9,3	1995-2015	22230,8
China	5,5	6,4	FAO (2012)	178184,2
India	2,4	4,5	FAO (2012)	20068,4
Rest of Asia	3,7	4,7	FAO (2012)	46465,0
Near and Middle East	6,6	10,1	ANMO	7048,9
North Africa	6,4	8,7	ANMO	7445,5
West Africa	1,7	3,8	FAO (2012)	15507,0
ECS Africa	2,0	3,8	FAO (2012)	42868,5
Oceania	6,7	7,8	FAO (2012)	578,6
Rest of the World	3,2	3,7	FAO (2012)	1343,1

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.3 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du blé

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	6,7	7,8	1995-2015	37511
Germany	7,4	8,9	1995-2015	24027
United Kingdom	7,8	8,3	1995-2015	14737
Poland	4,1	6,8	1995-2015	9539
South Europe	3,4	5,1	1995-2015	16171
East Europe	3,4	5,7	1995-2015	16240
Central Europe	5,1	7,2	1995-2015	8079
Rest of Europe	5,6	7,2	FAO (2012)-UE27	15879
Canada, USA	3,0	3,8	FAO (2012)	83461
Brazil, Argentina	3,0	3,7	FAO (2012)	18931
Rest of America	3,6	4,4	FAO (2012)	8710
Former Soviet Union	2,1	3,4	1995-2015	103816
China	4,8	5,8	FAO (2012)	115905
India	2,9	5,0	FAO (2012)	82786
Rest of Asia	2,5	4,2	FAO (2012)	32397
Near and Middle East	2,2	3,4	ANMO	40326
North Africa	2,7	2,8	ANMO	18262
West Africa	1,5	2,5	FAO (2012)	149
ECS Africa	2,1	3,2	FAO (2012)	6094
Oceania	1,8	2,3	FAO (2012)	24145
Rest of the World	2,3	3,0	FAO (2012)	759

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.4 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du colza

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	3,5	5,4	1975-2005	5268,4
Germany	3,7	5,2	1975-2005	5301,2
United Kingdom	3,6	4,3	1975-2005	2300,0
Poland	2,5	4,6	1995-2015	2195,8
South Europe	2,2	3,7	1995-2015	172,8
East Europe	1,9	4,3	1995-2015	1784,0
Central Europe	2,7	4,5	1995-2015	1688,4
Rest of Europe	2,3	3,0	FAO (2012)-UE27	1912,7
Canada, USA	1,9	3,5	1995-2015	14293,9
Brazil, Argentina	1,5	2,9	FAO (2012)	99,7
Rest of America	2,0	3,8	FAO (2012)	161,3
Former Soviet Union	1,3	3,0	1995-2015	3091,8
China	1,8	3,1	1995-2015	13406,2
India	1,2	2,2	FAO (2012)	7329,3
Rest of Asia	0,9	1,7	FAO (2012)	743,6
Near and Middle East	2,3	2,4	ANMO	458,9
North Africa	2,3	2,8	ANMO	43,0
West Africa	-	-	-	-
ECS Africa	1,3	1,6	FAO (2012)	88,5
Oceania	1,1	1,5	FAO (2012)	2064,7
Rest of the World	1,2	1,5	FAO (2012)	52,8

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.5 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du tournesol

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	2,4	2,5	1995-2015	1744
Germany	2,1	2,1	2010	52
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	1,7	2,5	1995-2015	5
South Europe	1,4	2,0	1995-2015	1432
East Europe	1,9	2,7	FAO (2012)-UE27	4411
Central Europe	2,3	3,5	1995-2015	324
Rest of Europe	-	-	-	-
Canada, USA	1,6	2,3	FAO (2012)	1244
Brazil, Argentina	1,6	1,8	FAO (2012)	2884
Rest of America	1,2	1,4	FAO (2012)	561
Former Soviet Union	1,3	1,9	1995-2015	14913
China	2,3	2,7	FAO (2012)	2189
India	0,6	1,0	FAO (2012)	673
Rest of Asia	1,0	1,3	FAO (2012)	1092
Near and Middle East	1,9	3,7	ANMO	1342
North Africa	1,3	1,4	ANMO	93
West Africa	-	-	-	-
ECS Africa	1,1	1,6	FAO (2012)	1690
Oceania	1,2	1,7	FAO (2012)	46
Rest of the World	1,5	2,0	FAO (2012)	365

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.6 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du soja

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	2,7	3,2	1995-2015	122
Germany	1,5	1,5	2010	2
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	1,5	4,6	1995-2015	0
South Europe	3,2	3,2	2010	682
East Europe	2,5	4,7	1995-2015	655
Central Europe	2,4	2,7	1995-2015	136
Rest of Europe	-	-	-	-
Canada, USA	2,9	3,8	FAO (2012)	92771
Brazil, Argentina	2,7	3,5	FAO (2012)	111158
Rest of America	2,2	2,9	FAO (2012)	10583
Former Soviet Union	1,5	3,1	1995-2015	3086
China	1,7	2,4	FAO (2012)	14850
India	1,2	1,7	FAO (2012)	11638
Rest of Asia	1,4	2,0	FAO (2012)	2540
Near and Middle East	2,6	2,7	ANMO	260
North Africa	2,8	2,5	ANMO	33
West Africa	0,8	1,7	FAO (2012)	466
ECS Africa	1,3	2,4	FAO (2012)	1025
Oceania	1,9	2,5	FAO (2012)	56
Rest of the World	1,5	2,0	FAO (2012)	80

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.7 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du riz

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	5,7	5,7	2010	127
Germany	-	-	-	-
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	-	-	-	-
South Europe	6,7	8,3	1995-2015	2890
East Europe	5,1	5,1	2010	128
Central Europe				
Rest of Europe	-	-	-	-
Canada, USA	7,8	8,3	FAO (2012)	9796
Brazil, Argentina	4,6	6,4	FAO (2012)	13897
Rest of America	4,6	6,4	FAO (2012)	13387
Former Soviet Union	4,3	7,6	1995-2015	1880
China	6,6	7,6	FAO (2012)	198853
India	3,4	5,2	FAO (2012)	145845
Rest of Asia	4,2	5,2	FAO (2012)	288329
Near and Middle East	4,6	7,1	ANMO	3198
North Africa	9,5	10,9	ANMO	5215
West Africa	2,0	3,6	FAO (2012)	11796
ECS Africa	2,6	4,7	FAO (2012)	9007
Oceania	8,7	9,3	FAO (2012)	342
Rest of the World	-	-	-	-

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.8 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des fibres

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	1,2	0,9	1995-2015	81
Germany	2,4	3,3	1995-2015	6
United Kingdom	1,4	1,7	1995-2015	15
Poland	2,1	3,2	1995-2015	37
South Europe	2,7	3,1	1995-2015	1095
East Europe	1,6	2,4	1995-2015	70
Central Europe	3,2	3,2	2010	4
Rest of Europe	4,0	5,1	FAO (2012)-UE27	58
Canada, USA	2,3	2,8	FAO (2012)	8937
Brazil, Argentina	2,4	3,0	FAO (2012)	5887
Rest of America	1,7	2,1	FAO (2012)	1251
Former Soviet Union	2,1	2,3	1995-2015	5043
China	3,3	4,2	FAO (2012)	23072
India	1,5	1,8	FAO (2012)	20689
Rest of Asia	1,4	1,7	FAO (2012)	17441
Near and Middle East	3,5	3,3	ANMO	3242
North Africa	2,4	2,4	ANMO	457
West Africa	1,0	1,3	FAO (2012)	2382
ECS Africa	0,7	1,0	FAO (2012)	2156
Oceania	3,9	5,0	FAO (2012)	1328
Rest of the World	1,6	2,0	FAO (2012)	6

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.9 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des fruits et légumes

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	12,9	11,6	1995-2015	14876
Germany	21,0	28,0	1995-2015	6044
United Kingdom	21,5	32,5	1995-2015	3126
Poland	15,2	21,4	1995-2015	8922
South Europe	15,0	22,0	1995-2015	77562
East Europe	8,4	10,9	1995-2015	12727
Central Europe	15,2	20,2	1995-2015	3489
Rest of Europe	30,5	37,6	FAO (2012)-UE27	10874
Canada, USA	26,7	33,1	FAO (2012)	66457
Brazil, Argentina	17,3	22,9	FAO (2012)	61692
Rest of America	14,3	19,3	FAO (2012)	95732
Former Soviet Union	14,4	29,4	1995-2015	54209
China	19,0	29,4	FAO (2012)	673856
India	12,8	20,6	FAO (2012)	172023
Rest of Asia	12,2	18,1	FAO (2012)	149610
Near and Middle East	16,8	21,4	ANMO	97749
North Africa	17,5	25,9	ANMO	53474
West Africa	6,0	11,9	FAO (2012)	37612
ECS Africa	7,7	14,3	FAO (2012)	65252
Oceania	15,1	18,5	FAO (2012)	11338
Rest of the World	5,0	6,1	FAO (2012)	1354

* Modalités de projection :

- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.10 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement du fruit du palmier à huile

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	-	-	-	-
Germany	-	-	-	-
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	-	-	-	-
South Europe	-	-	-	-
East Europe	-	-	-	-
Central Europe	-	-	-	-
Rest of Europe	-	-	-	-
Canada, USA	-	-	-	-
Brazil, Argentina	11,6	17,8	FAO (2012)	1239
Rest of America	15,8	24,1	FAO (2012)	11733
Former Soviet Union	-	-	-	-
China	13,7	20,6	FAO (2012)	660
India	-	-	-	-
Rest of Asia	18,6	28,1	FAO (2012)	196064
Near and Middle East	-	-	-	-
North Africa	-	-	-	-
West Africa	3,3	9,6	FAO (2012)	13933
ECS Africa	9,7	28,2	FAO (2012)	3383
Oceania	18,4	18,4	FAO (2012)	2668
Rest of the World	-	-	-	-

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.11 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des céréales secondaires

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	5,9	6,8	1995-2015	13841
Germany	5,7	7,2	1995-2015	16726
United Kingdom	5,7	6,4	1995-2015	6613
Poland	3,0	4,3	1995-2015	16100
South Europe	2,7	3,5	1995-2015	12546
East Europe	2,8	4,6	1995-2015	4758
Central Europe	4,4	6,3	1995-2015	4936
Rest of Europe	4,0	4,5	FAO (2012)-UE27	14585
Canada, USA	3,3	3,7	FAO (2012)	25431
Brazil, Argentina	3,2	3,8	FAO (2012)	9038
Rest of America	3,0	3,5	FAO (2012)	10255
Former Soviet Union	2,0	3,2	1995-2015	44022
China	2,4	3,0	FAO (2012)	7849
India	1,0	1,2	FAO (2012)	20128
Rest of Asia	1,1	1,3	FAO (2012)	2669
Near and Middle East	2,0	3,0	ANMO	15652
North Africa	1,6	3,2	ANMO	6591
West Africa	0,8	1,6	FAO (2012)	22719
ECS Africa	0,9	1,6	FAO (2012)	21351
Oceania	2,0	2,2	FAO (2012)	12003
Rest of the World	1,7	1,9	FAO (2012)	232

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.12 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des autres oléoprotéagineux

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	1,5	2,7	1995-2015	138
Germany	0,9	0,9	2010	9
United Kingdom	1,8	1,8	2010	66
Poland	1,1	2,0	1995-2015	29
South Europe	2,7	3,6	1995-2015	13348
East Europe	0,9	0,9	2010	52
Central Europe	0,7	0,7	2010	57
Rest of Europe	1,0	1,0	2010	37
Canada, USA	2,4	3,4	FAO (2012)	2703
Brazil, Argentina	4,3	5,8	FAO (2012)	4237
Rest of America	3,0	4,0	FAO (2012)	3118
Former Soviet Union	0,8	2,1	1995-2015	675
China	3,2	3,8	FAO (2012)	19636
India	1,8	2,3	FAO (2012)	20280
Rest of Asia	3,8	4,6	FAO (2012)	45157
Near and Middle East	1,6	2,1	ANMO	3073
North Africa	1,1	1,4	ANMO	3527
West Africa	1,1	1,9	FAO (2012)	9002
Oceania	4,7	6,1	FAO (2012)	2936
ECS Africa	0,7	1,3	FAO (2012)	7602
Rest of the World	-	-	-	-

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.13 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des légumineuses

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	3,9	3,9	2010	1230
Germany	2,7	2,7	2010	257
United Kingdom	3,0	3,7	1995-2015	703
Poland	2,2	2,4	1995-2015	321
South Europe	1,2	1,2	2010	706
East Europe	1,9	2,4	1995-2015	243
Central Europe	2,3	2,1	1995-2015	155
Rest of Europe	2,3	2,8	FAO (2012)-UE27	232
Canada, USA	1,9	2,4	FAO (2012)	7078
Brazil, Argentina	0,9	1,4	FAO (2012)	3822
Rest of America	0,9	1,4	FAO (2012)	2925
Former Soviet Union	1,6	2,3	1995-2015	3008
China	1,5	2,0	FAO (2012)	4277
India	0,6	1,7	FAO (2012)	16318
Rest of Asia	1,0	1,7	FAO (2012)	7910
Near and Middle East	1,1	2,1	ANMO	2369
North Africa	1,2	1,7	ANMO	823
West Africa	0,5	1,2	FAO (2012)	5460
Oceania	1,2	1,4	FAO (2012)	2157
ECS Africa	0,8	1,8	FAO (2012)	8684
Rest of the World	1,1	1,3	FAO (2012)	32

* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

Tableau 5.B.14 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des racines et tubercules

Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	45,1	59,4	1995-2015	7141
Germany	43,3	60,2	1995-2015	11219
United Kingdom	43,8	45,8	1995-2015	6254
Poland	19,1	34,0	1995-2015	8888
South Europe	22,5	35,3	1995-2015	6819
East Europe	14,9	17,6	1995-2015	5452
Central Europe	29,9	47,2	1995-2015	2150
Rest of Europe	36,4	47,5	FAO (2012)-UE27	15780
Canada, USA	40,3	52,5	FAO (2012)	24604
Brazil, Argentina	15,4	20,7	FAO (2012)	31853
Rest of America	10,8	15,1	FAO (2012)	23537
Former Soviet Union	14,6	23,2	1995-2015	65180
China	17,8	24,2	FAO (2012)	162916
India	21,5	32,4	FAO (2012)	47442
Rest of Asia	17,2	25,3	FAO (2012)	94376
Near and Middle East	27,6	31,9	ANMO	12099
North Africa	25,9	38,1	ANMO	9909
West Africa	9,7	17,4	FAO (2012)	128183
ECS Africa	8,6	15,6	FAO (2012)	106575
Oceania	12,8	16,3	FAO (2012)	4137
Rest of the World	10,7	14,0	FAO (2012)	310

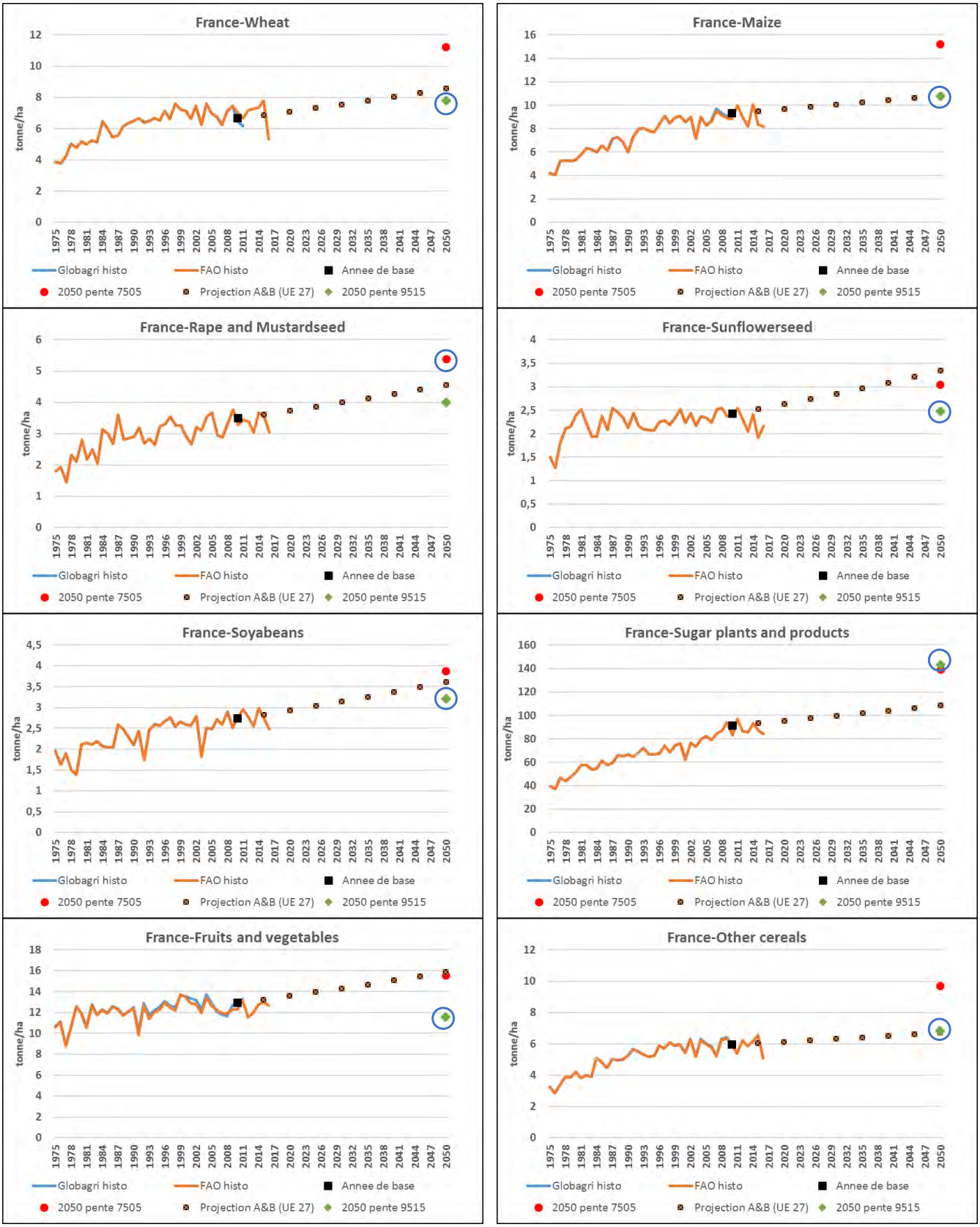
* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

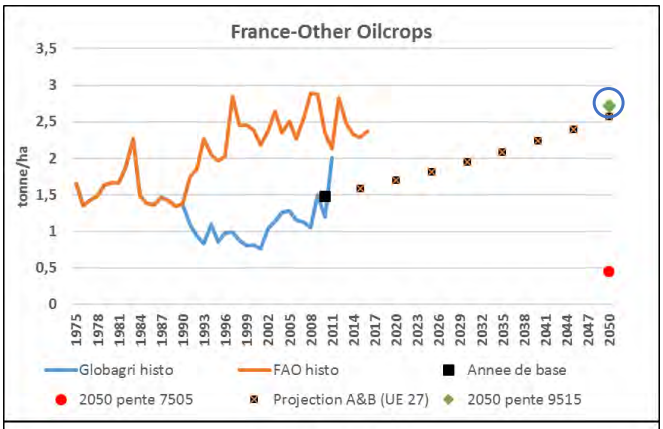
Tableau 5.B.15 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur le rendement des autres produits végétaux

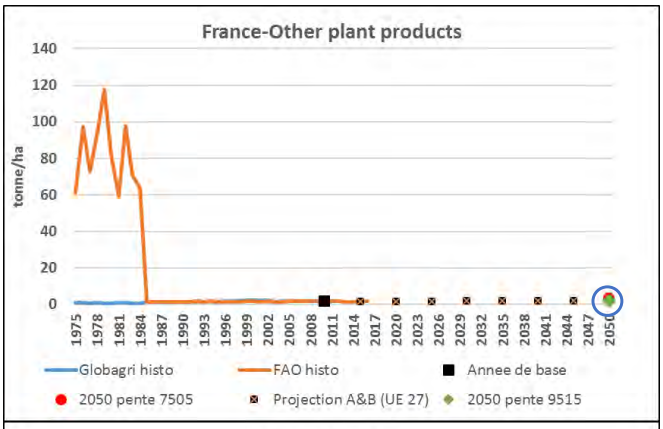
Rendements en t/ha	2010	2050	Choix de la projection *	Production 2010 (1000 t)
France	1,7	2,2	1995-2015	48
Germany	2,6	3,5	1995-2015	13
United Kingdom	-	-	-	-
Poland	0,5	0,5	2010	14
South Europe	0,8	0,8	1995-2015	782
East Europe	1,4	0,9	1995-2015	186
Central Europe	2,8	2,2	1995-2015	24
Rest of Europe	1,1	1,3	FAO (2012)-UE27	2
Canada, USA	4,1	5,0	FAO (2012)	2274
Brazil, Argentina	1,0	1,5	FAO (2012)	3993
Rest of America	0,7	1,0	FAO (2012)	3278
Former Soviet Union	2,1	3,7	1995-2015	302
China	2,3	3,3	FAO (2012)	5726
India	1,3	2,0	FAO (2012)	6135
Rest of Asia	1,1	1,6	FAO (2012)	8365
Near and Middle East	1,9	2,2	ANMO	2794
North Africa	0,9	1,0	ANMO	500
West Africa	0,6	1,0	FAO (2012)	5103
ECS Africa	0,6	1,1	FAO (2012)	2489
Oceania	0,9	1,1	FAO (2012)	250
Rest of the World	2,5	3,1	FAO (2012)	13

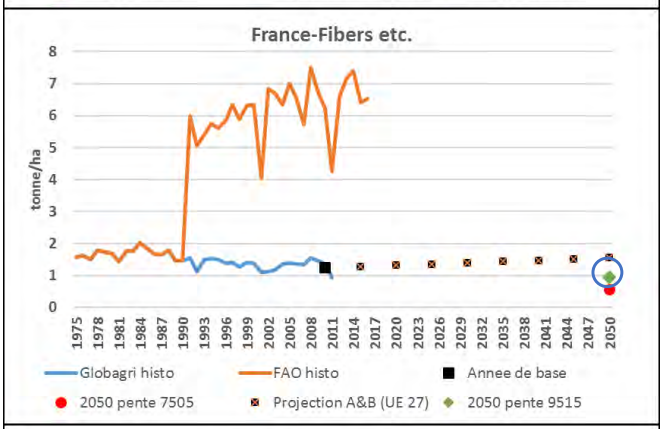
* Modalités de projection :
- FAO (2012) : taux de croissance annuel moyen estimé pour la région par Alexandratos et Bruinsma (2012)
- FAO (2012)-UE27 : taux de croissance annuel moyen estimé pour l'Europe par FAO (2012) appliqué à la sous-région européenne
- ANMO : projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient
- 1975-2005 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1975-2005
- 1995-2015 : projection du taux d'évolution moyen du rendement sur la période 1995-2015
- 2010 : rendement supposé constant entre 2010 et 2050

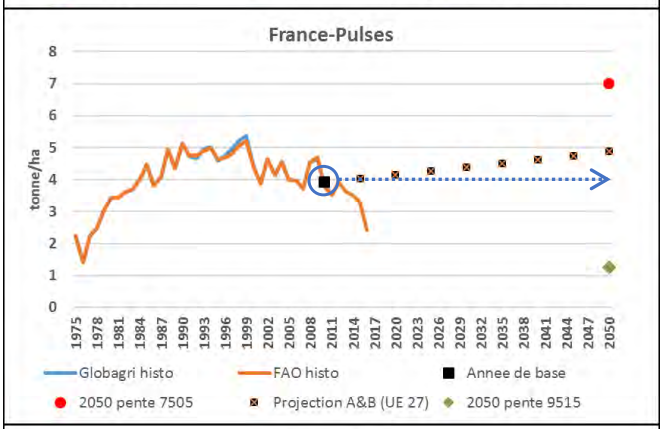
Figure 5.B.1 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour la France

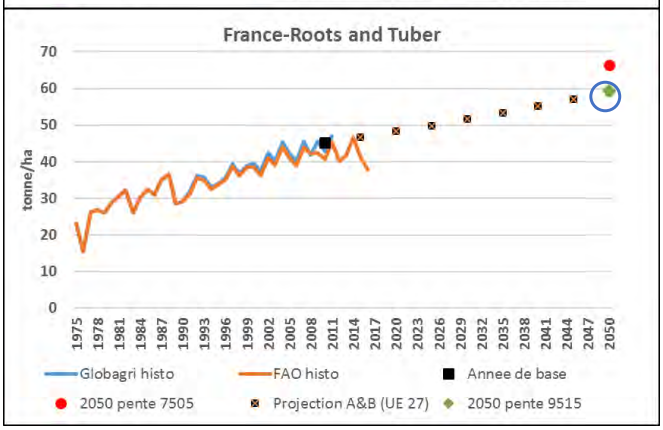



France-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


France-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


France-Fibers etc.
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


France-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


France-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

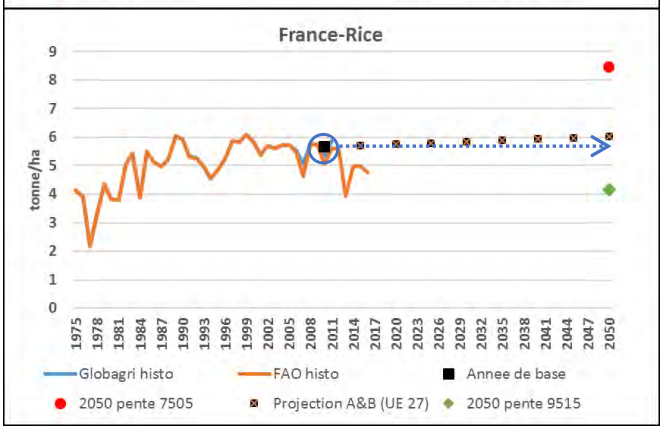
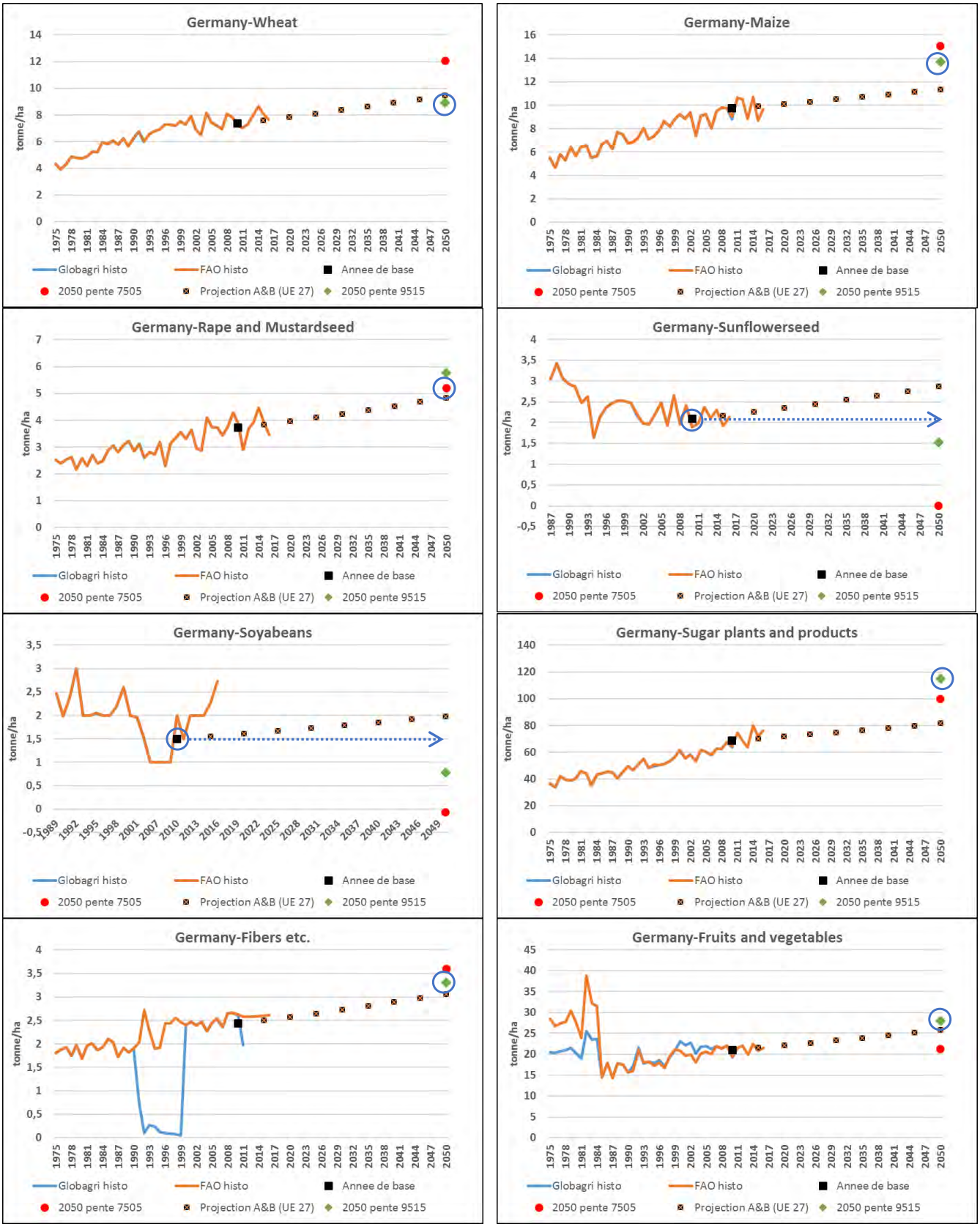
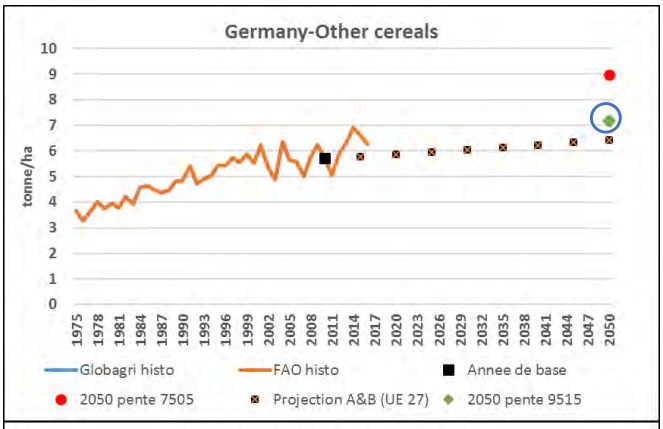
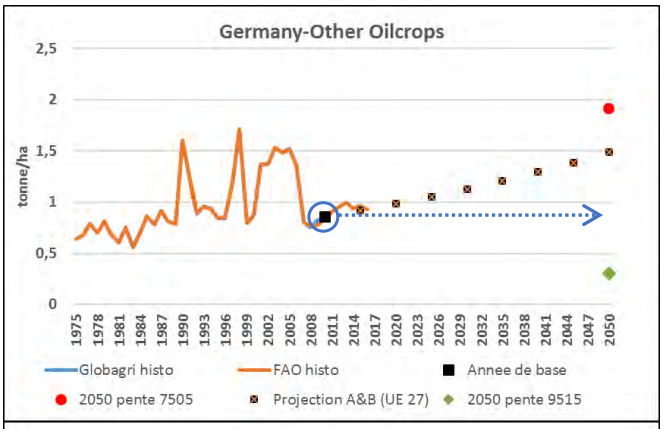
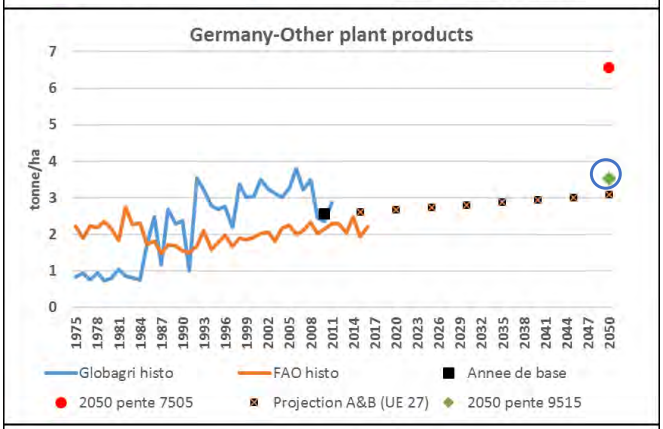

France-Rice
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

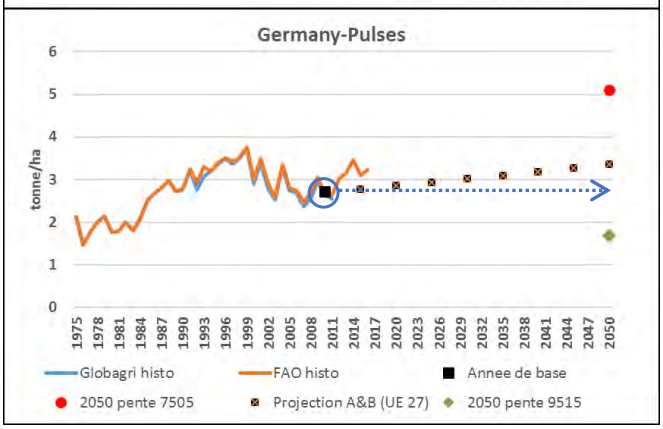
Figure 5.B.2 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Allemagne




Germany-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Germany-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Germany-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Germany-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

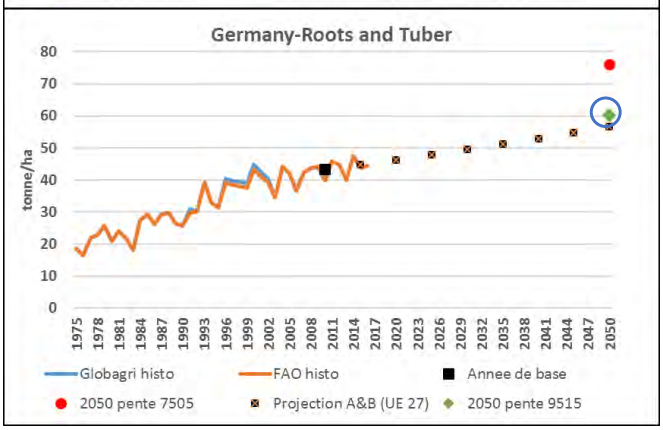
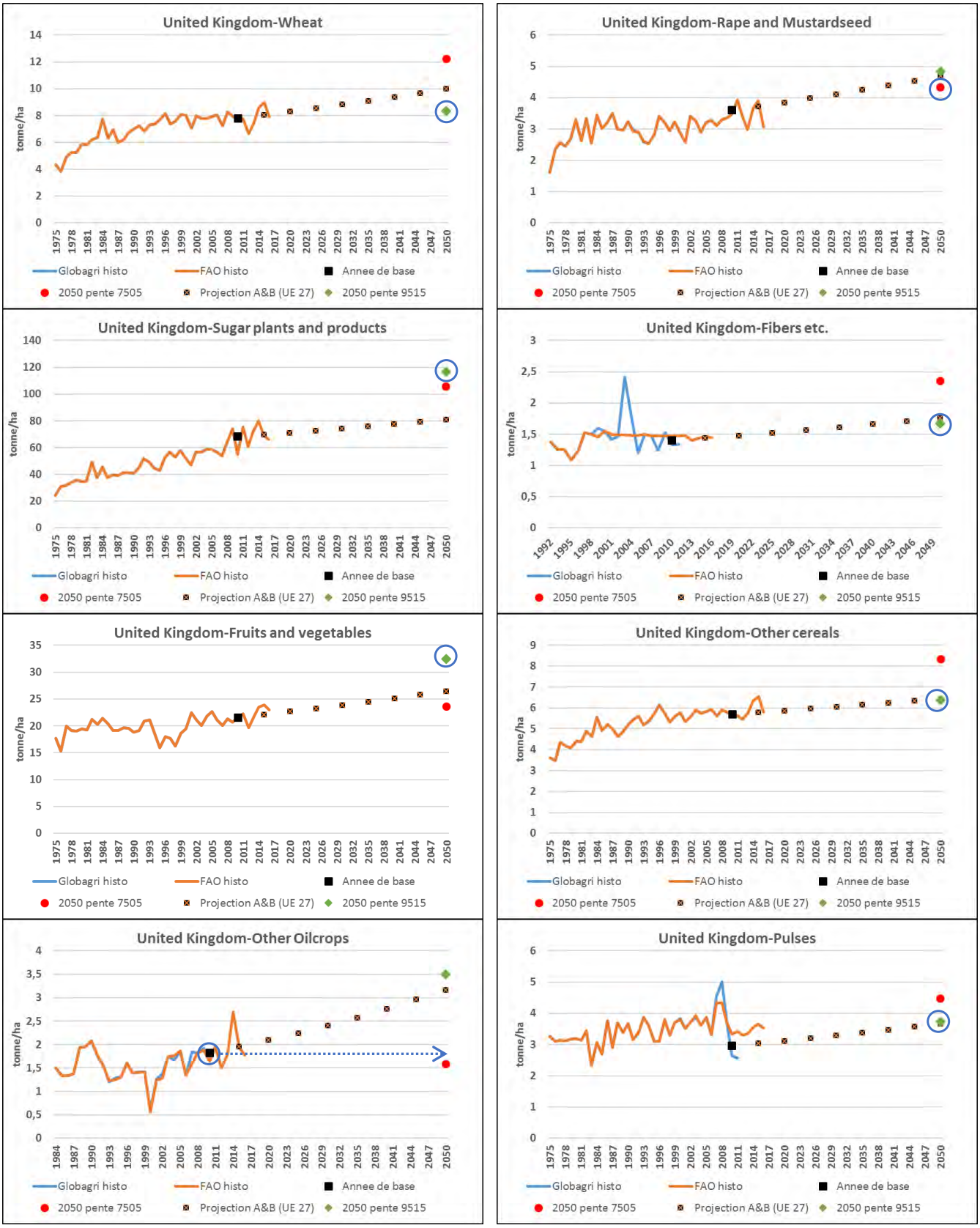

Germany-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

Figure 5.B.3 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le Royaume-Uni



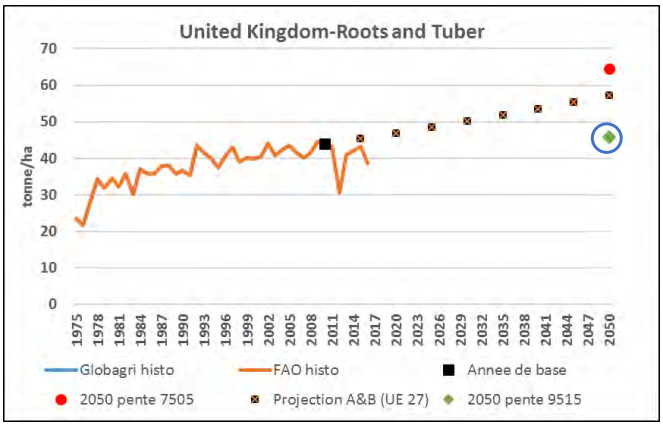
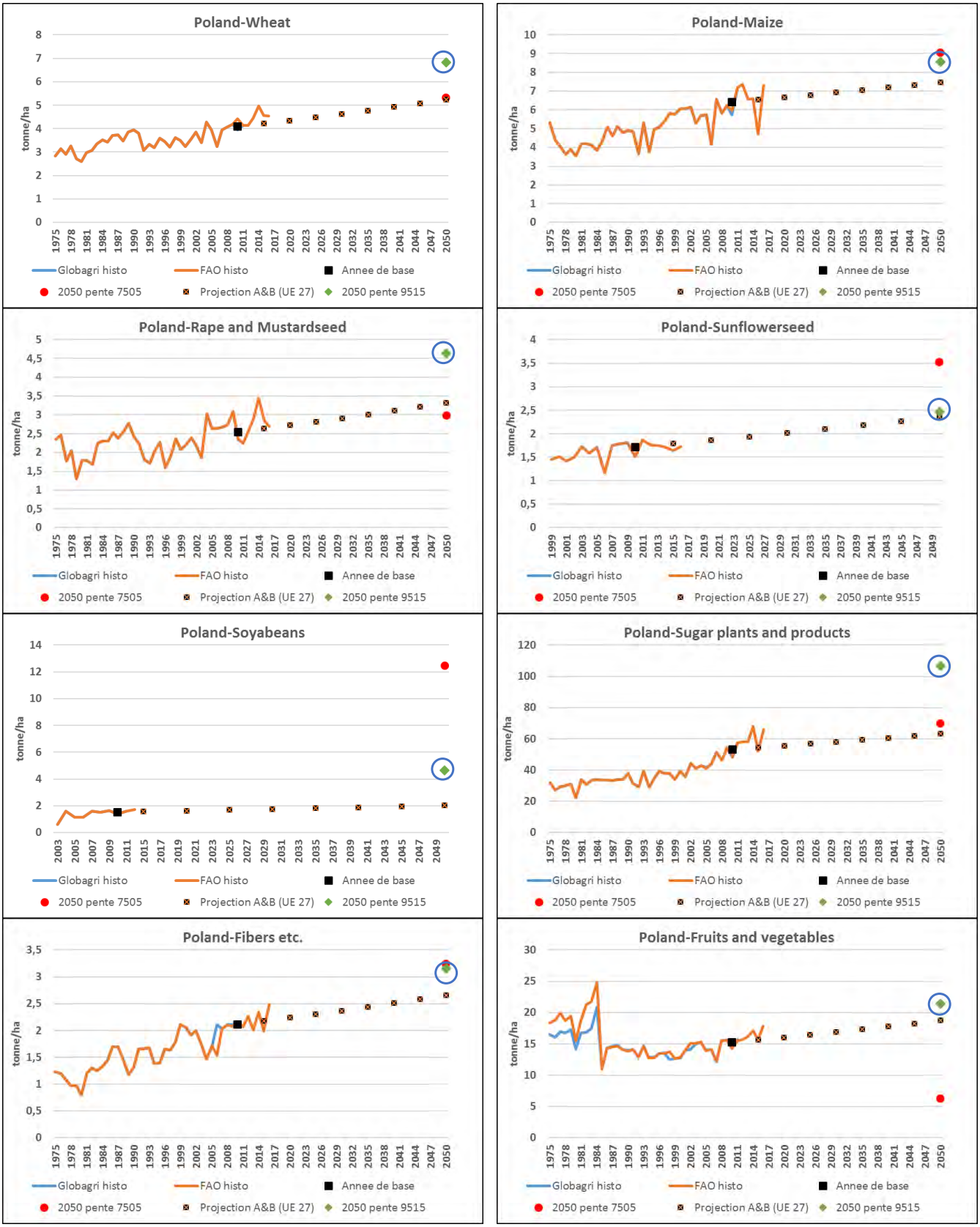
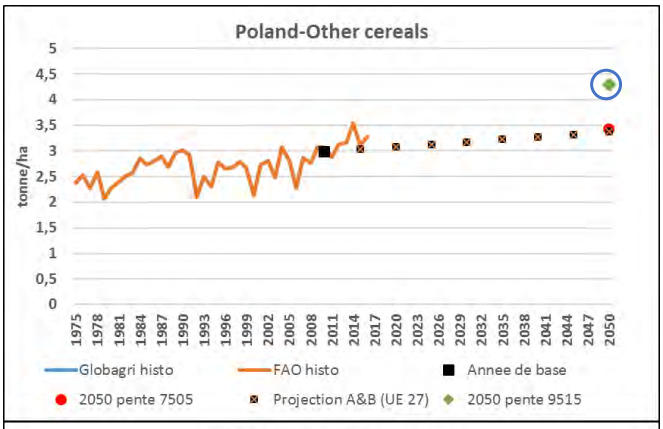
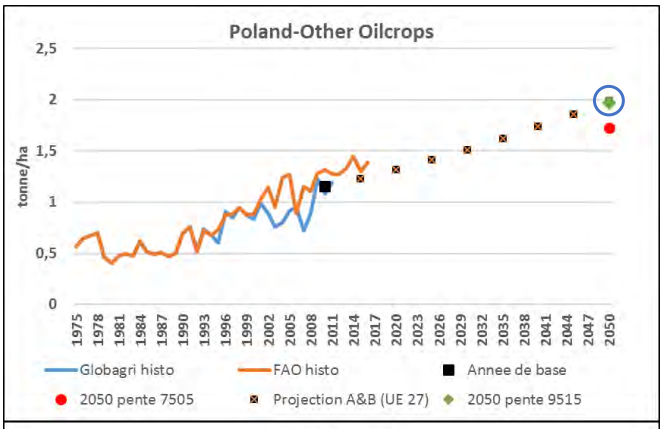
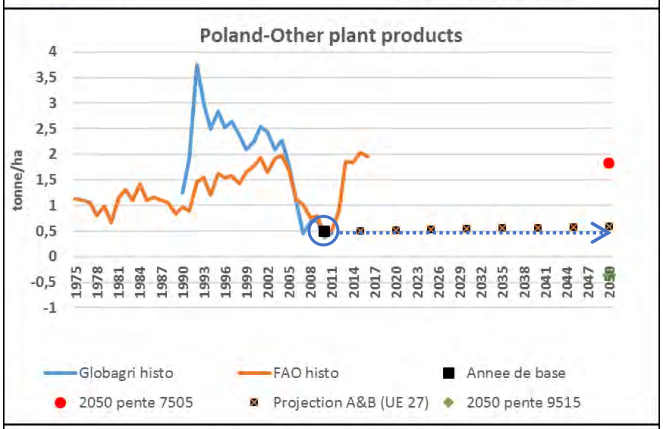

United Kingdom-Roots and Tuber
tonne/ha
70
60
50
40
30
20
10
0
1975
1978
1981
1984
1987
1990
1993
1996
1999
2002
2005
2008
2011
2014
2017
2020
2023
2026
2029
2032
2035
2038
2041
2044
2047
2050
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

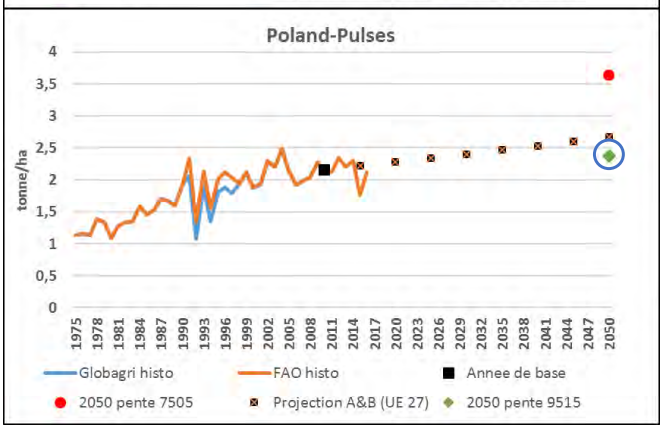
Figure 5.B.4 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour la Pologne




Poland-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Poland-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Poland-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Poland-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

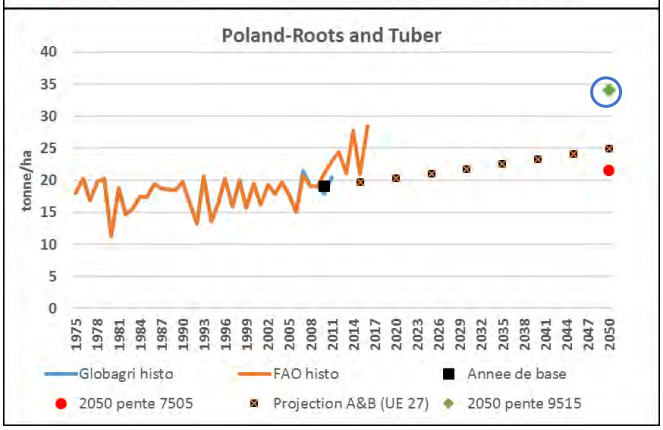
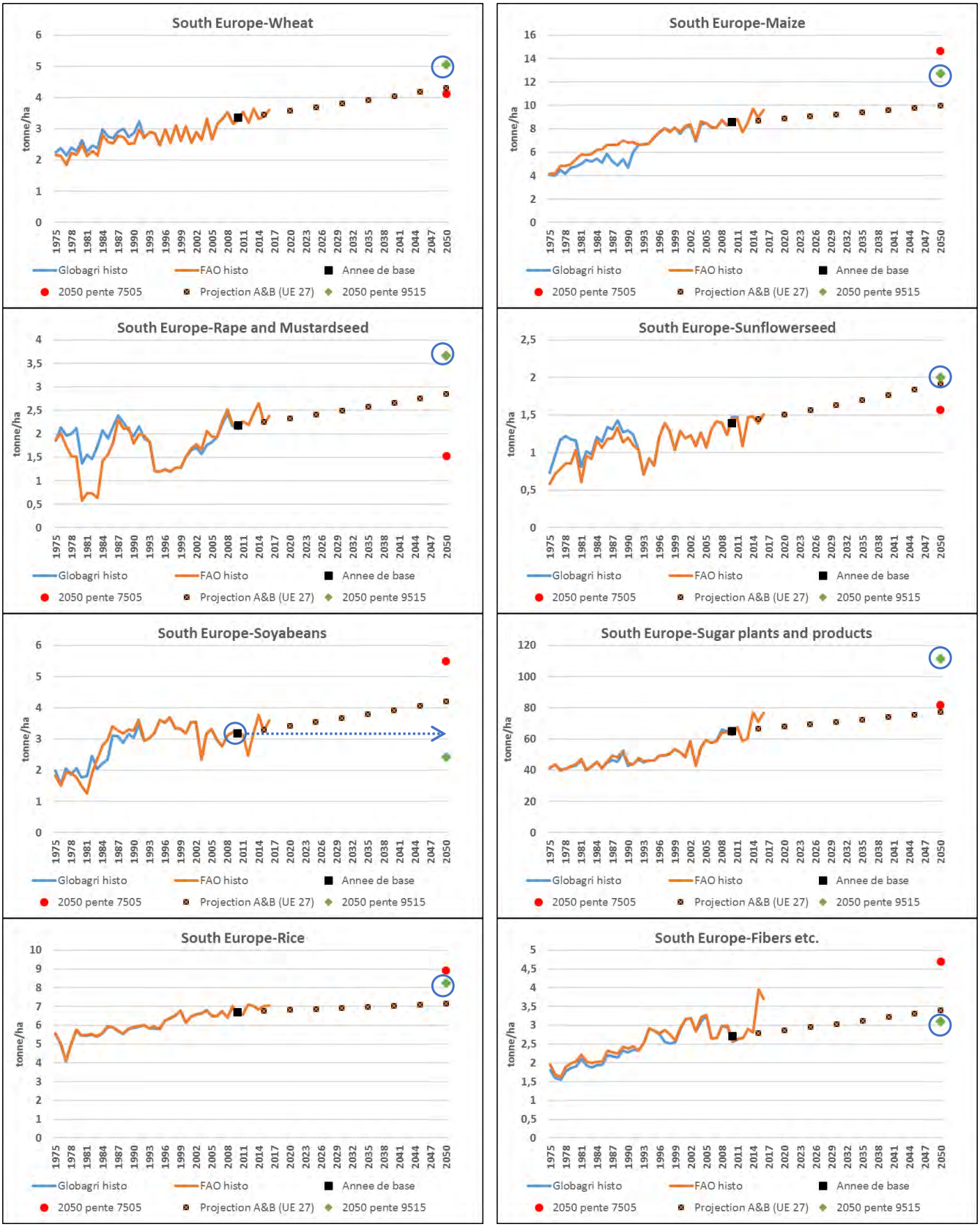
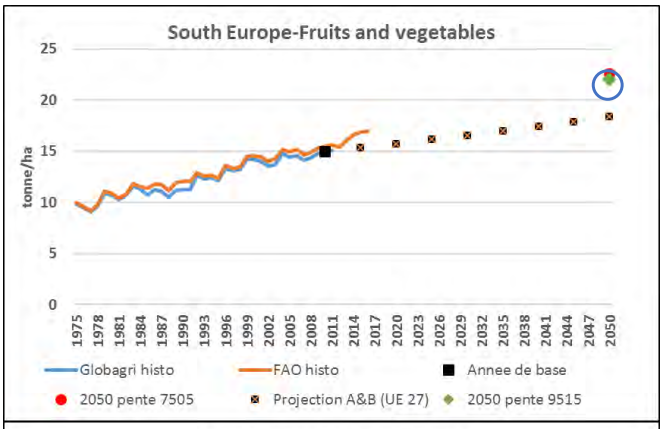
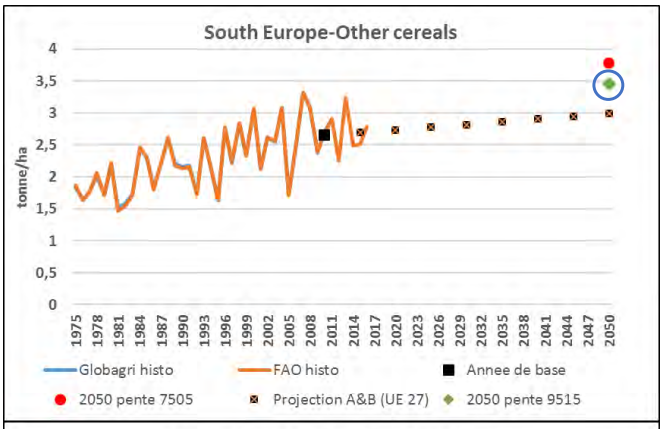
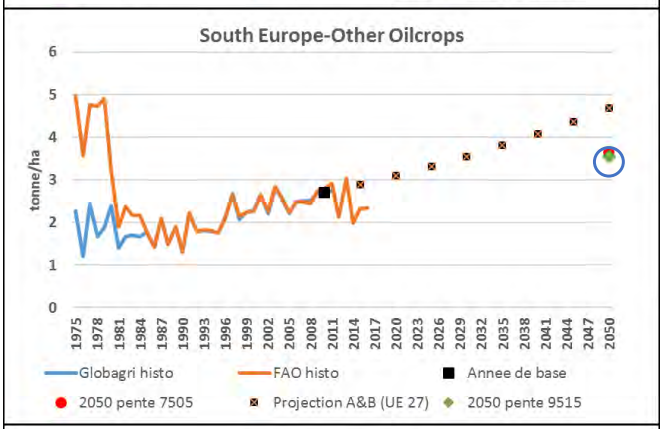

Poland-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

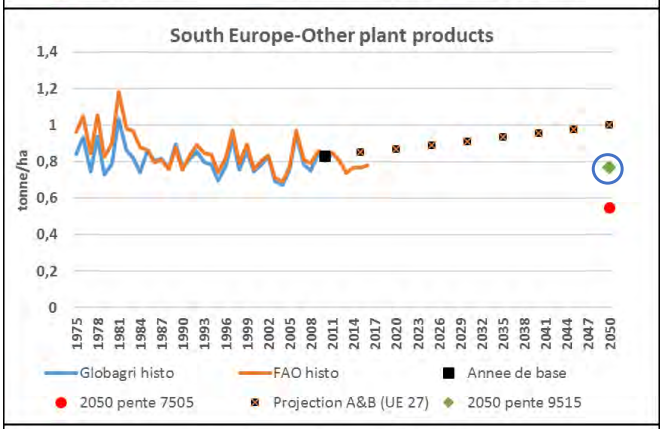
Figure 5.B.5 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Europe du sud

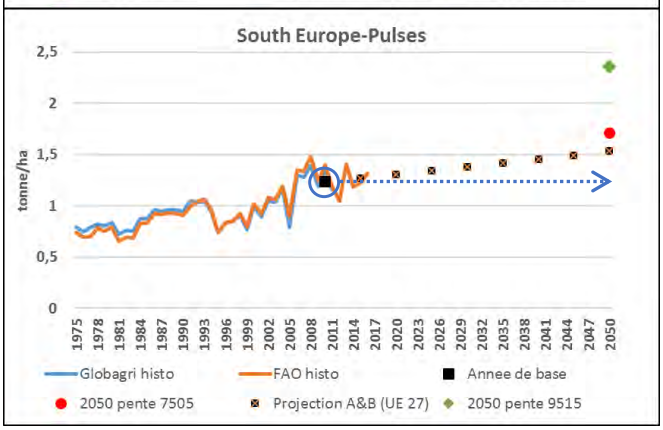



South Europe-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


South Europe-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


South Europe-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


South Europe-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


South Europe-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

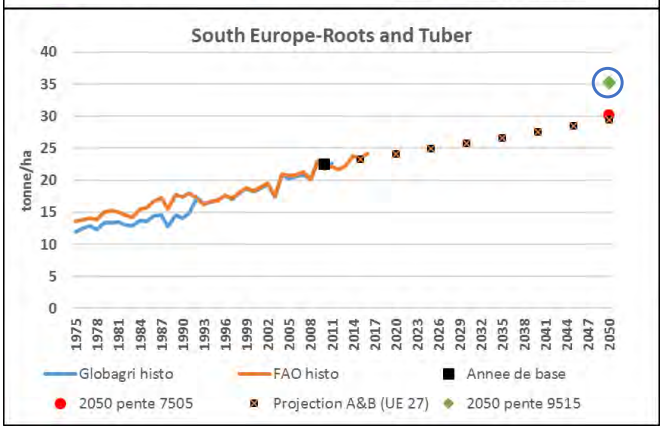
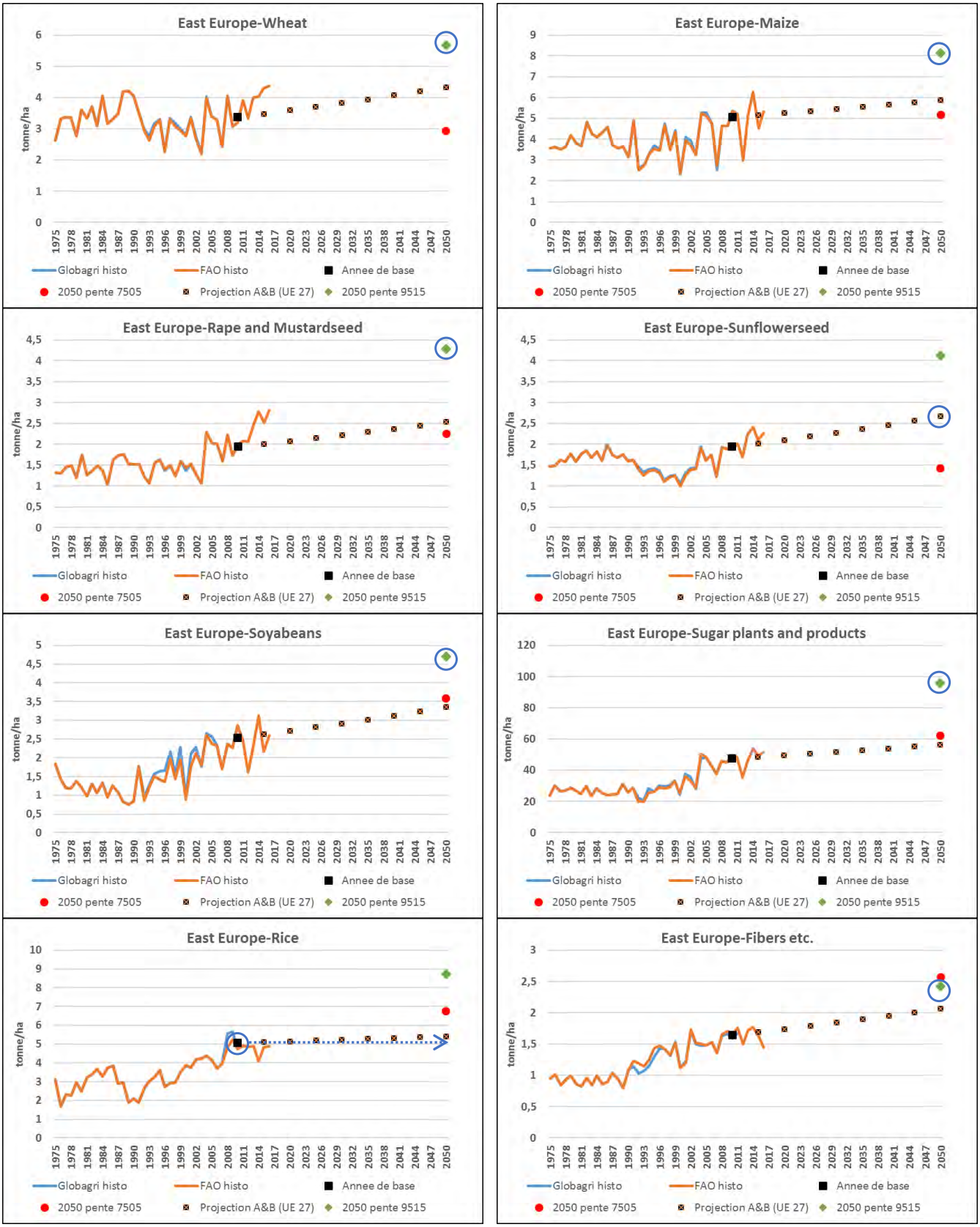
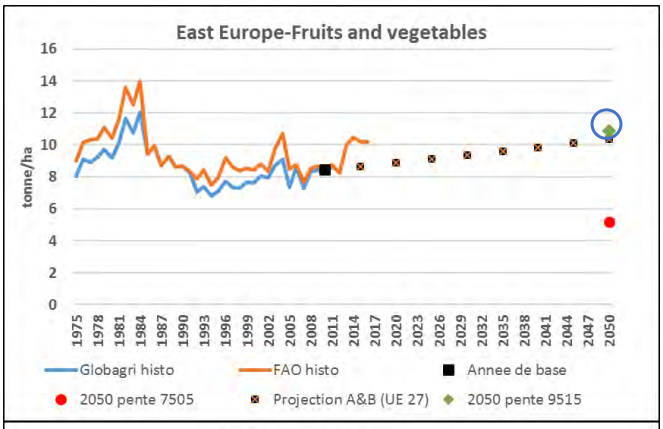
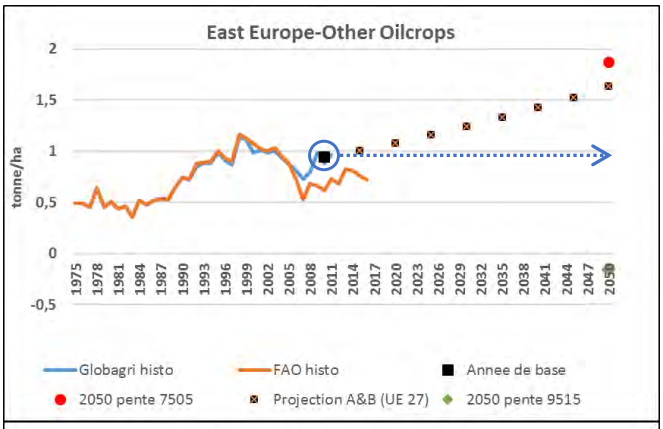
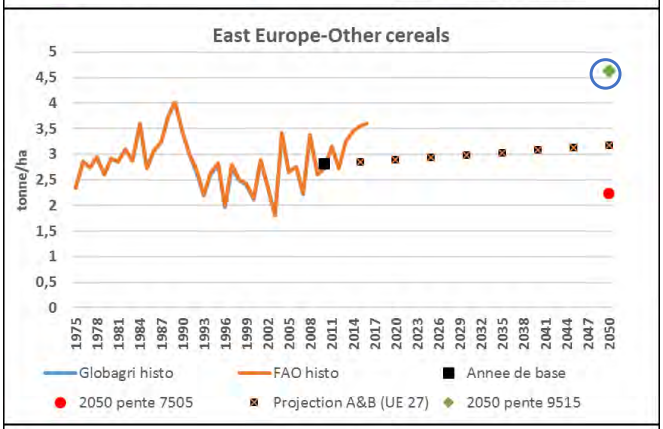

South Europe-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

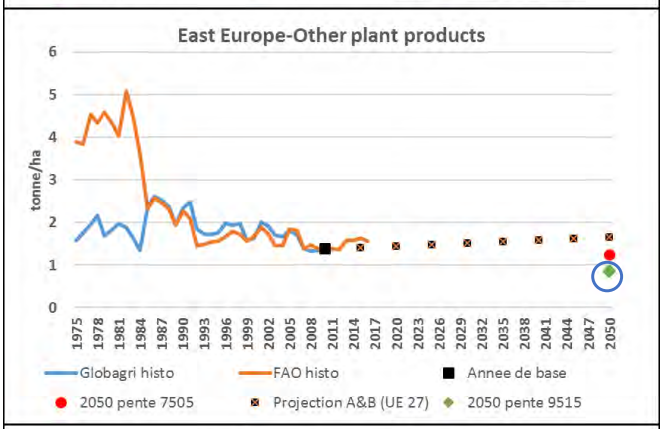
Figure 5.B.6 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Europe de l'Est

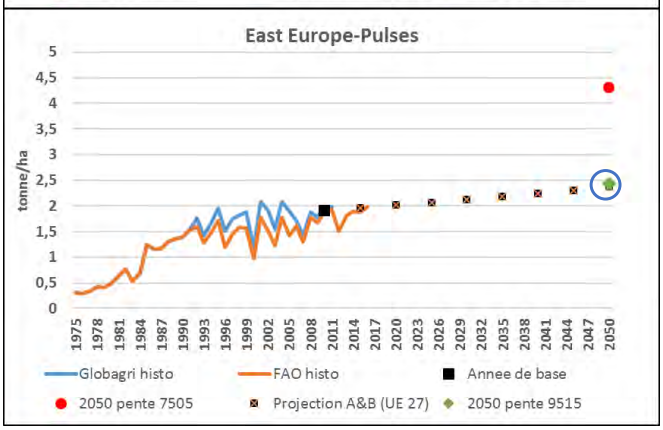



East Europe-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


East Europe-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


East Europe-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


East Europe-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


East Europe-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

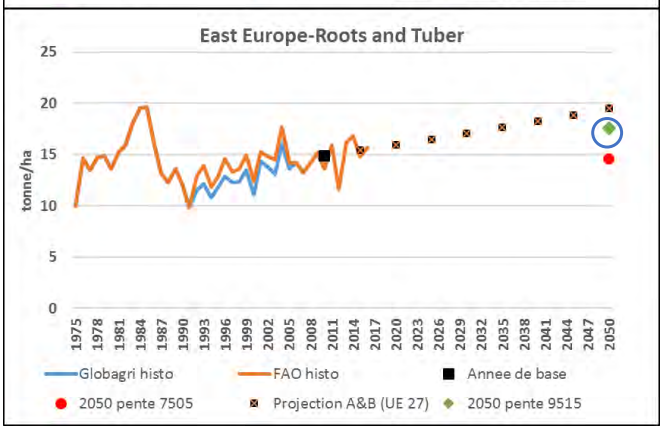
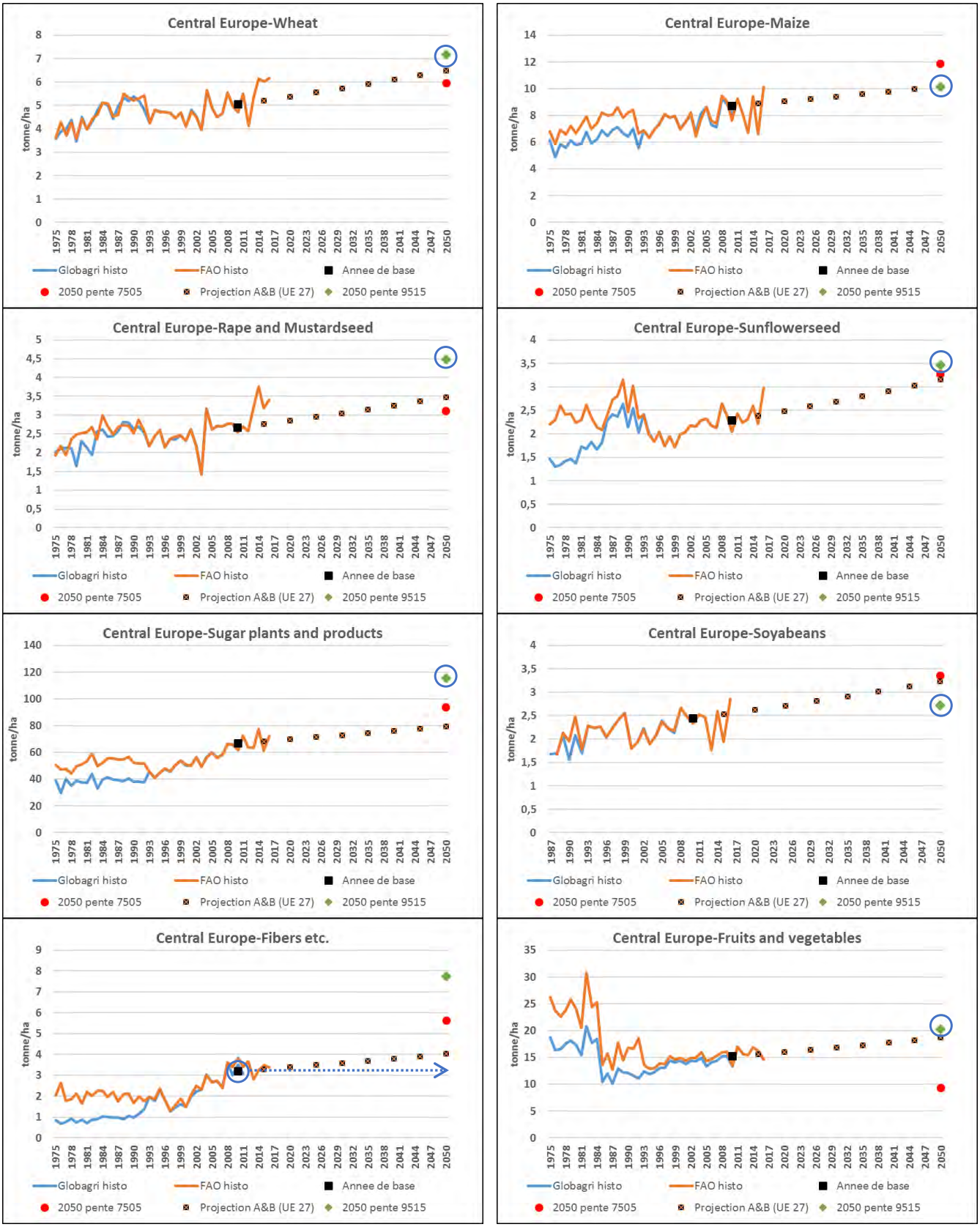
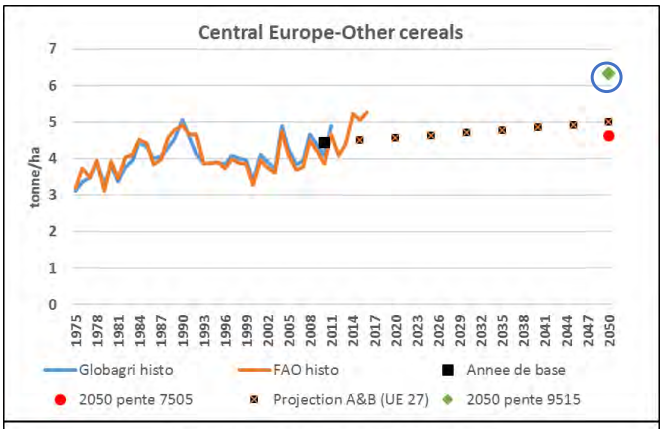
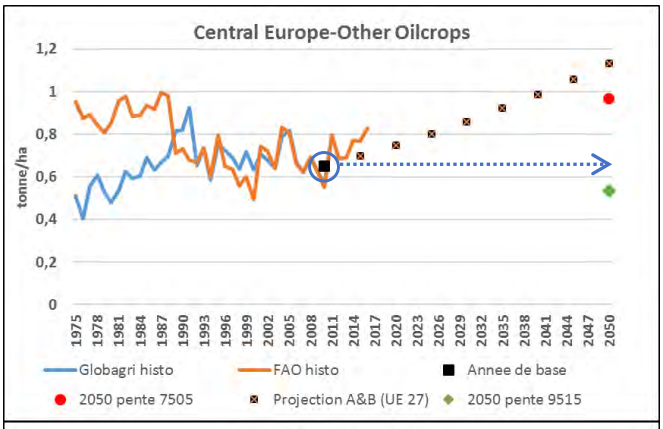
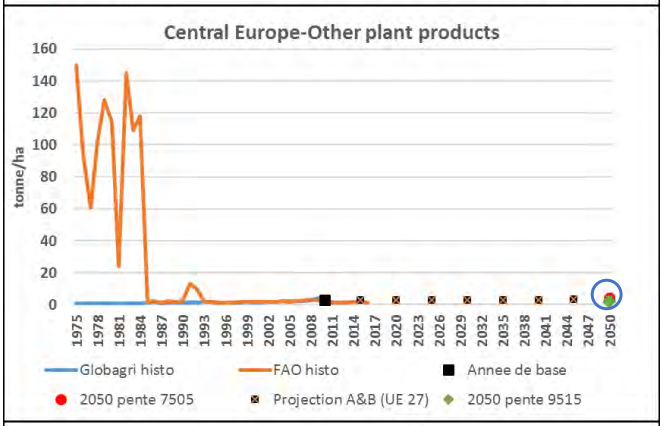

East Europe-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

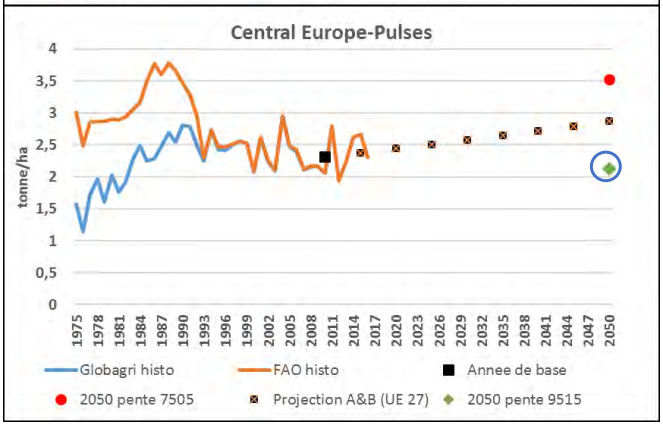
Figure 5.B.7 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Europe Centrale




Central Europe-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Central Europe-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Central Europe-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Central Europe-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

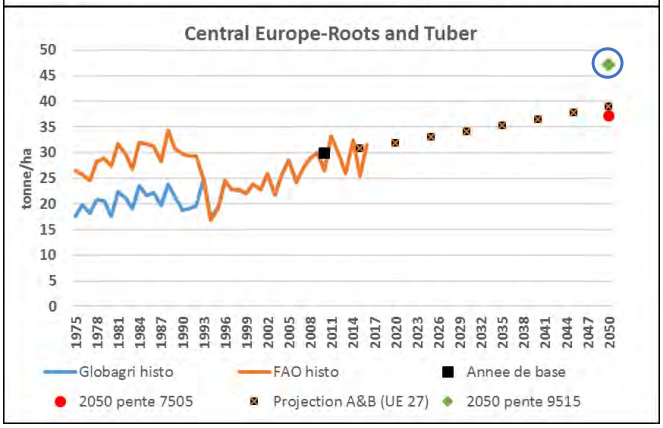
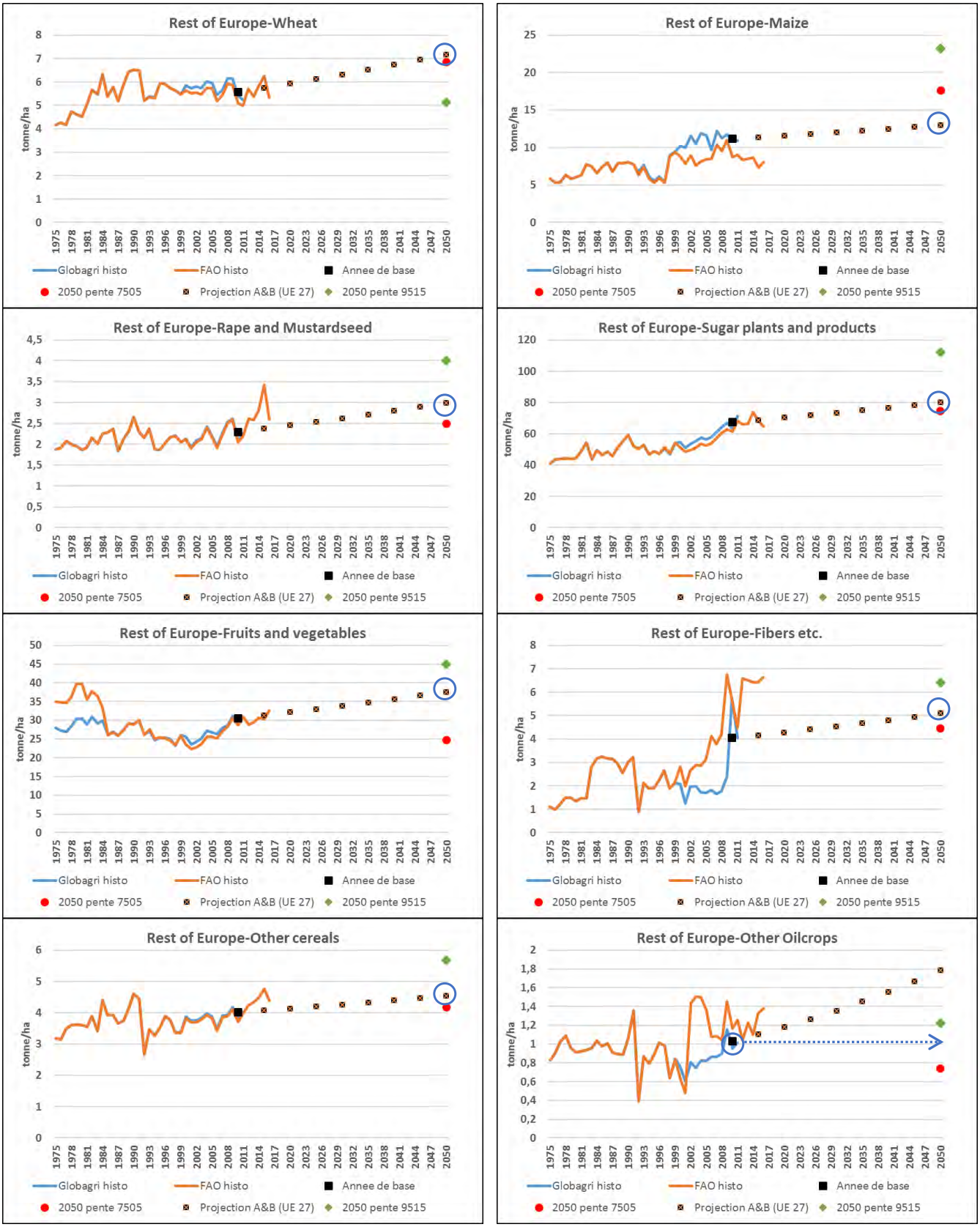
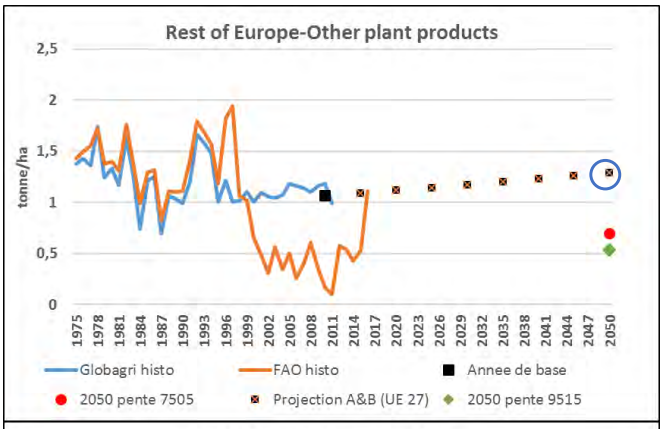
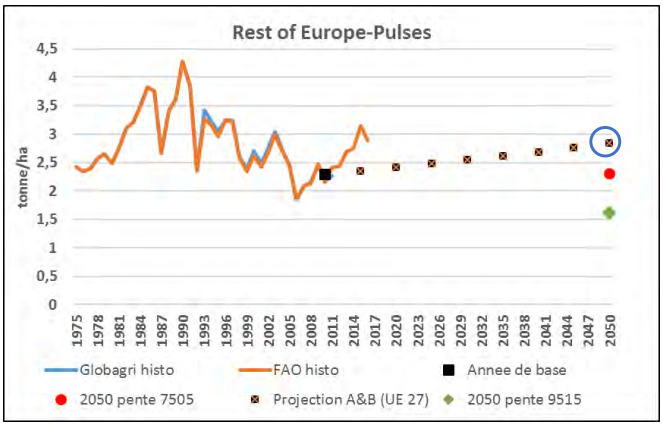

Central Europe-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

Figure 5.B.8 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le reste de l'Europe




Rest of Europe-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515


Rest of Europe-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

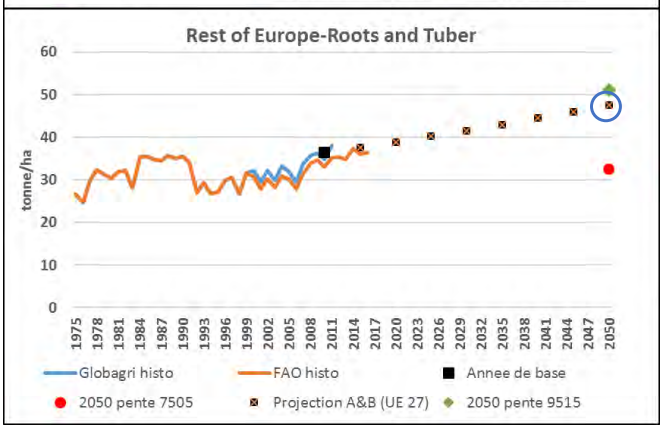
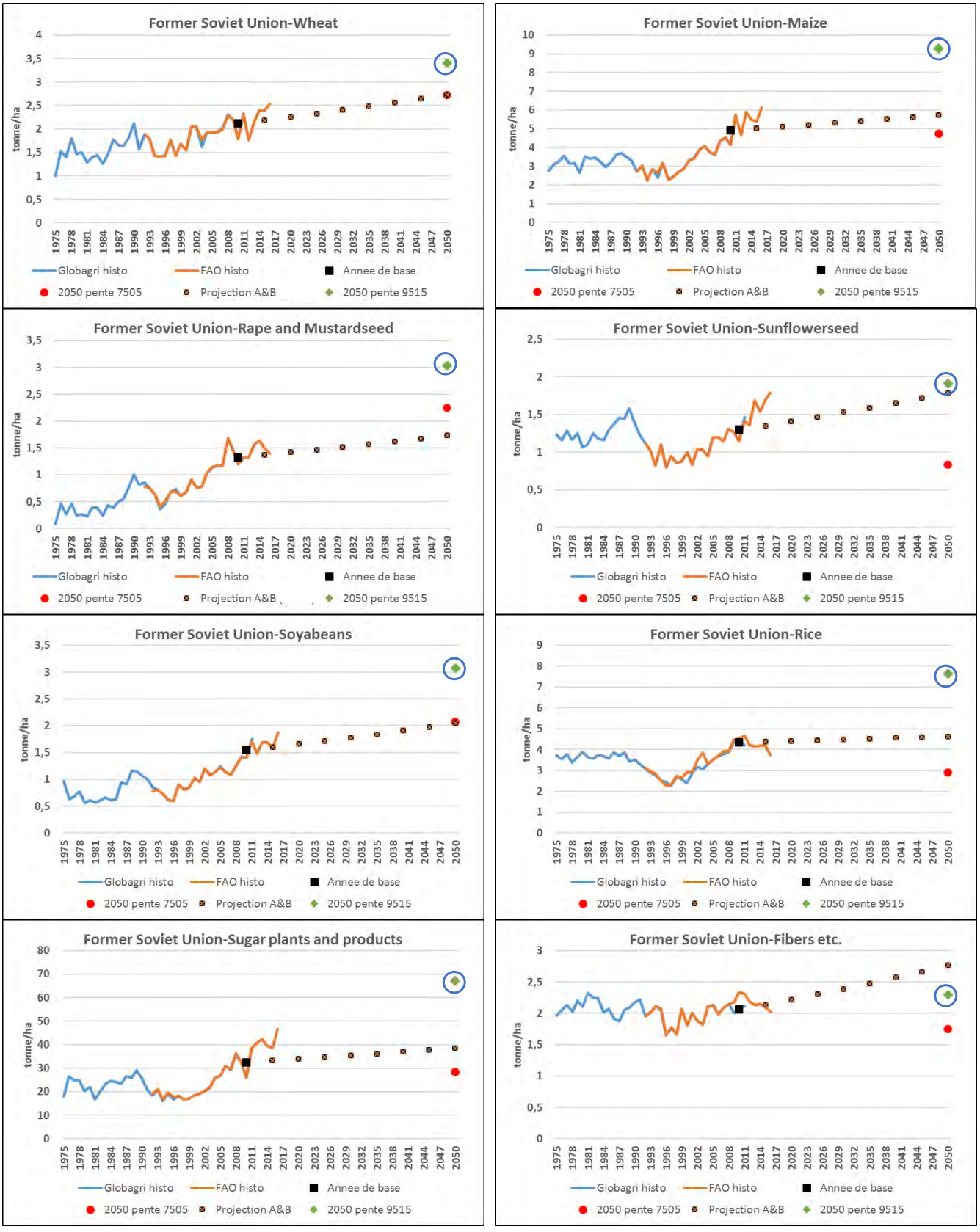
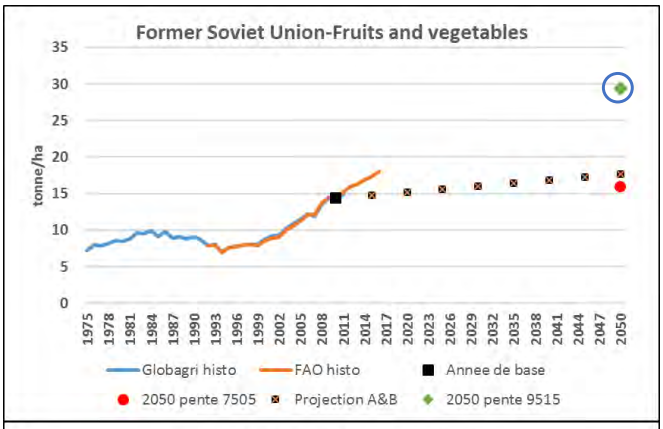
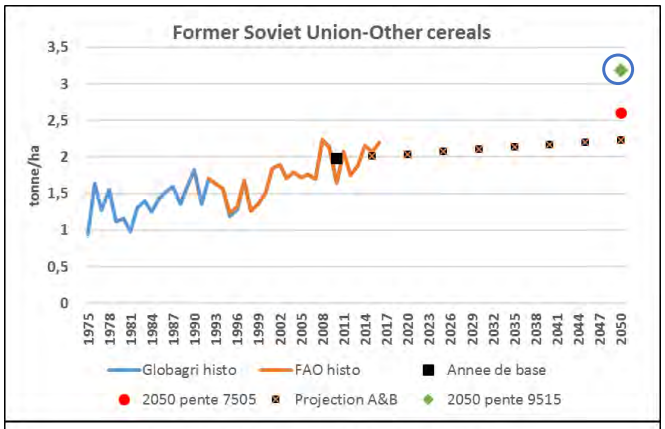
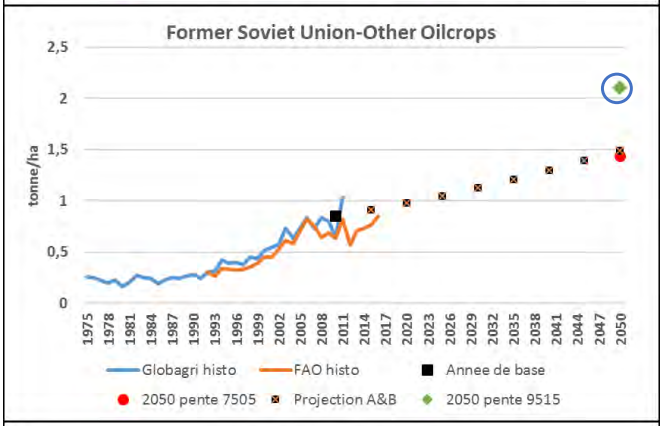

Rest of Europe-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B (UE 27)
2050 pente 9515

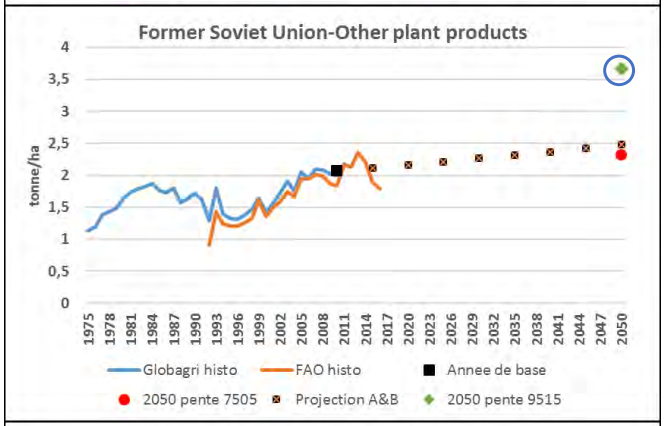
Figure 5.B.9 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'ex-URSS

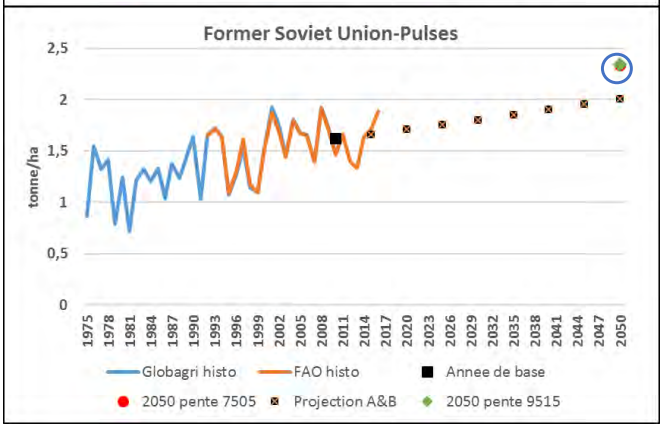



Former Soviet Union-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Former Soviet Union-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Former Soviet Union-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Former Soviet Union-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Former Soviet Union-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

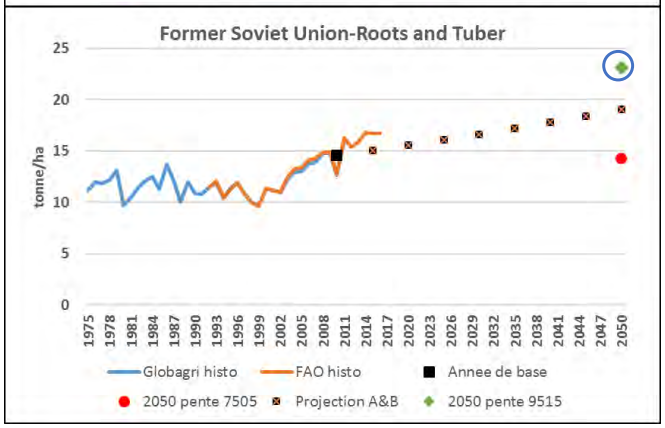
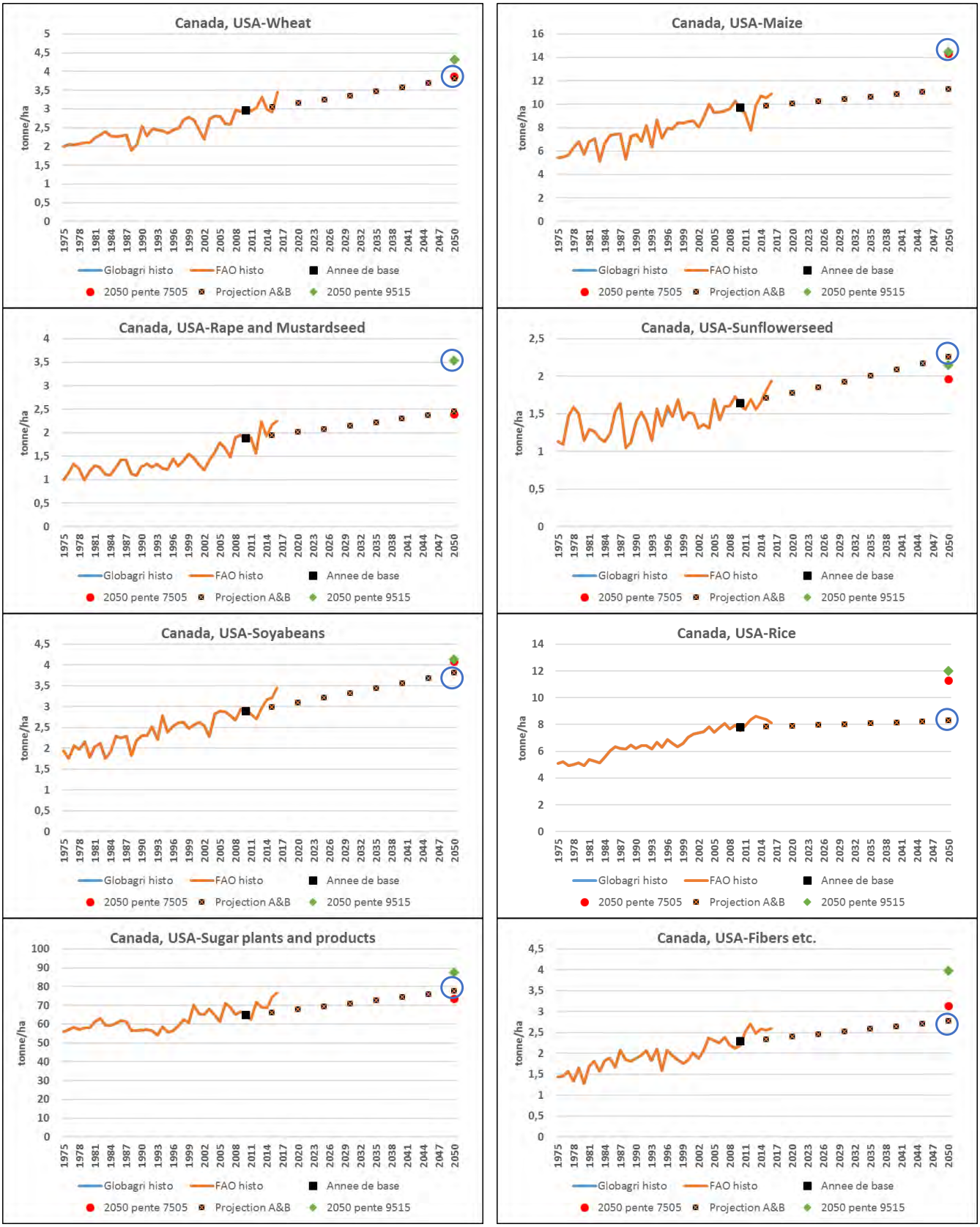
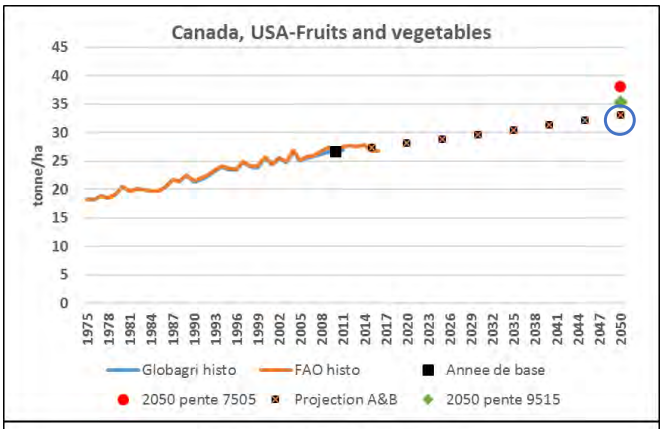
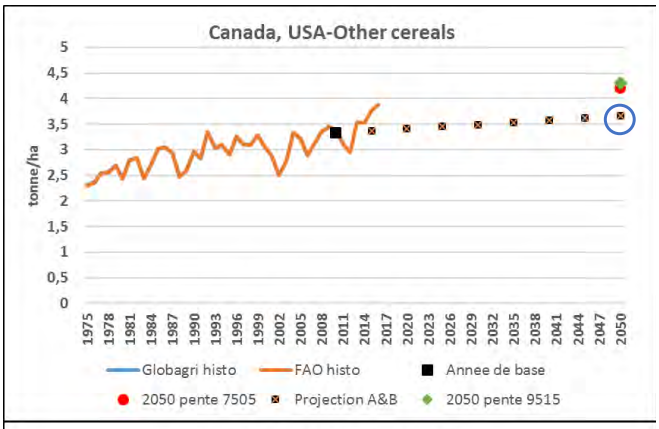
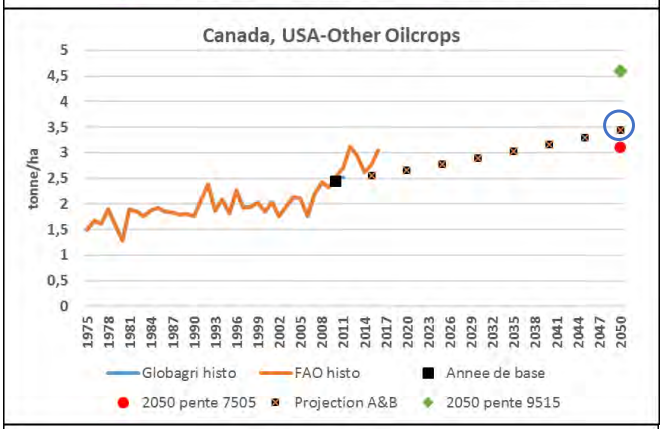

Former Soviet Union-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

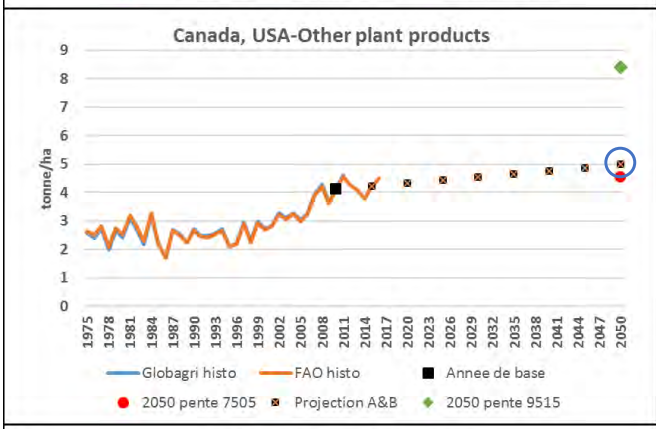
Figure 5.B.10 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le Canada et les États-Unis

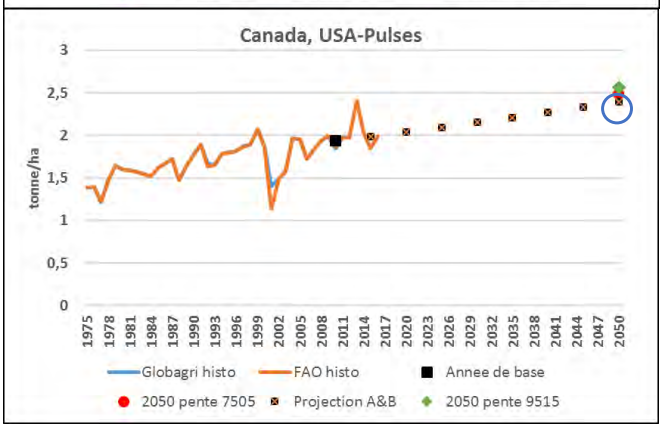



Canada, USA-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Canada, USA-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Canada, USA-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Canada, USA-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Canada, USA-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

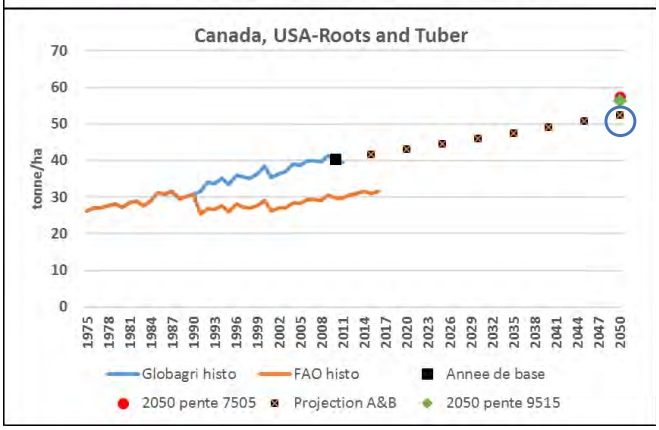
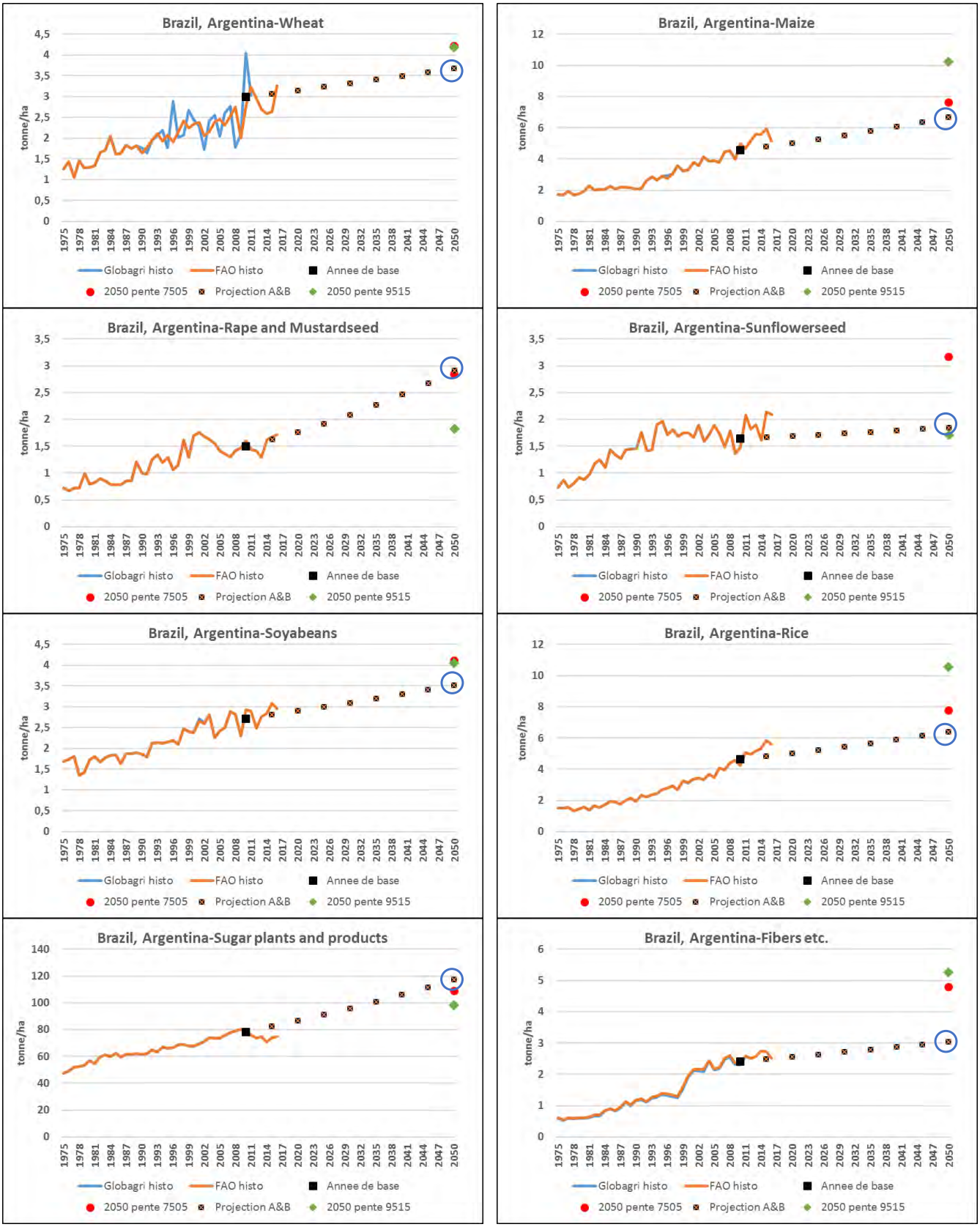
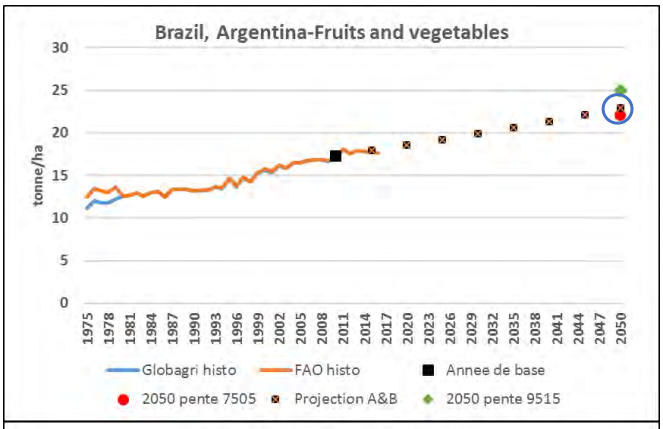
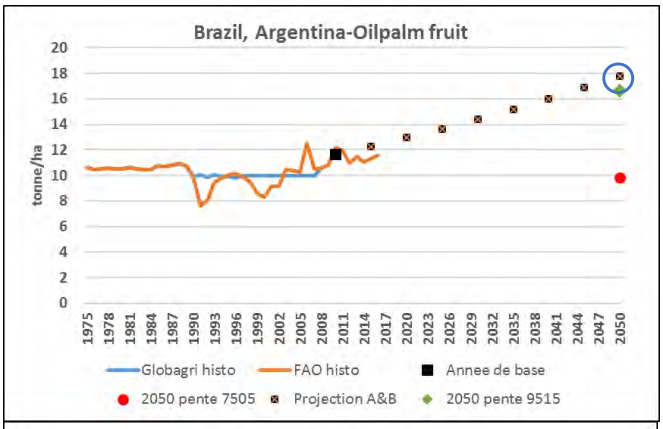
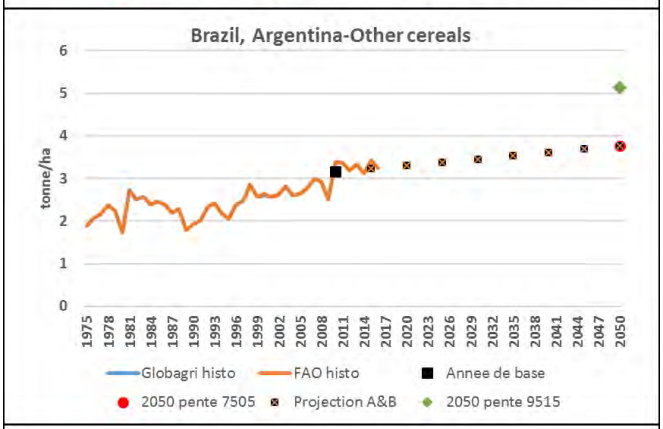

Canada, USA-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

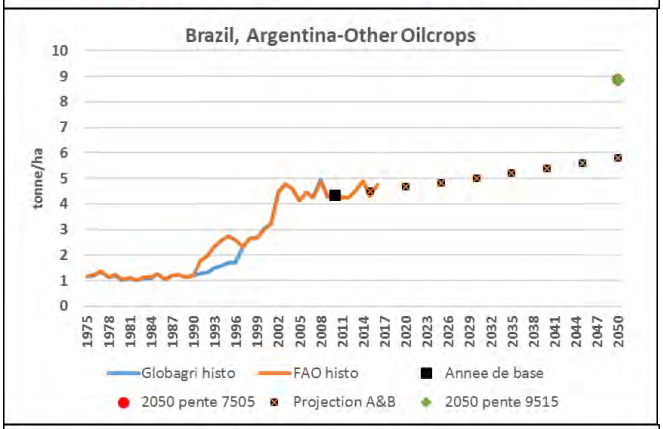
Figure 5.B.11 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le Brésil et l'Argentine

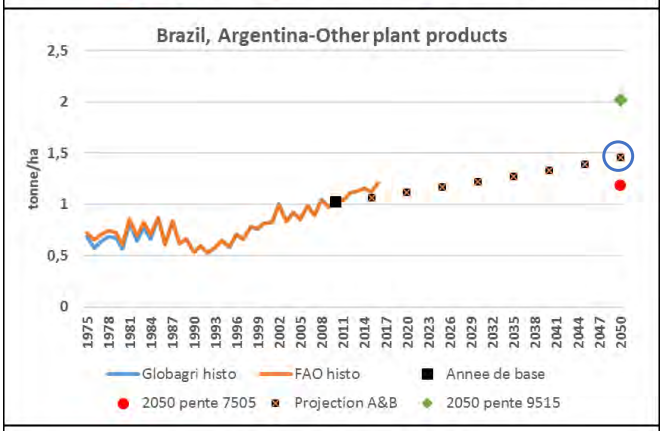


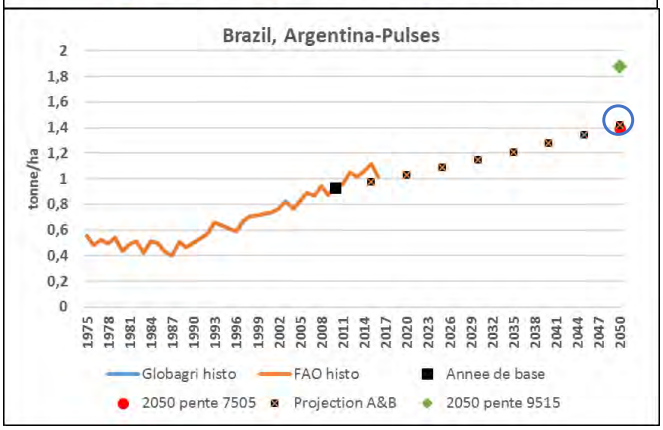

Brazil, Argentina-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Brazil, Argentina-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Brazil, Argentina-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Brazil, Argentina-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Brazil, Argentina-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Brazil, Argentina-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

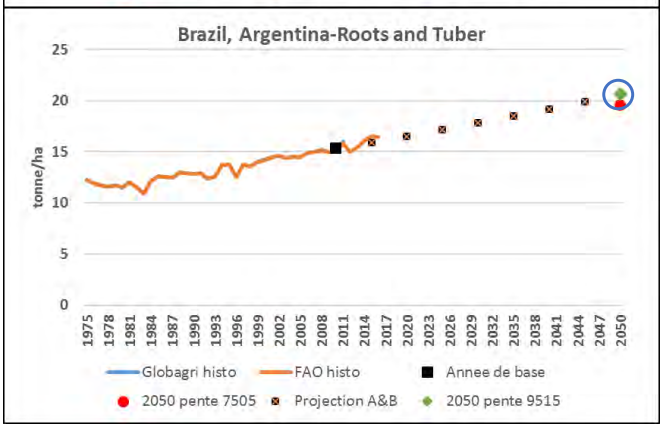
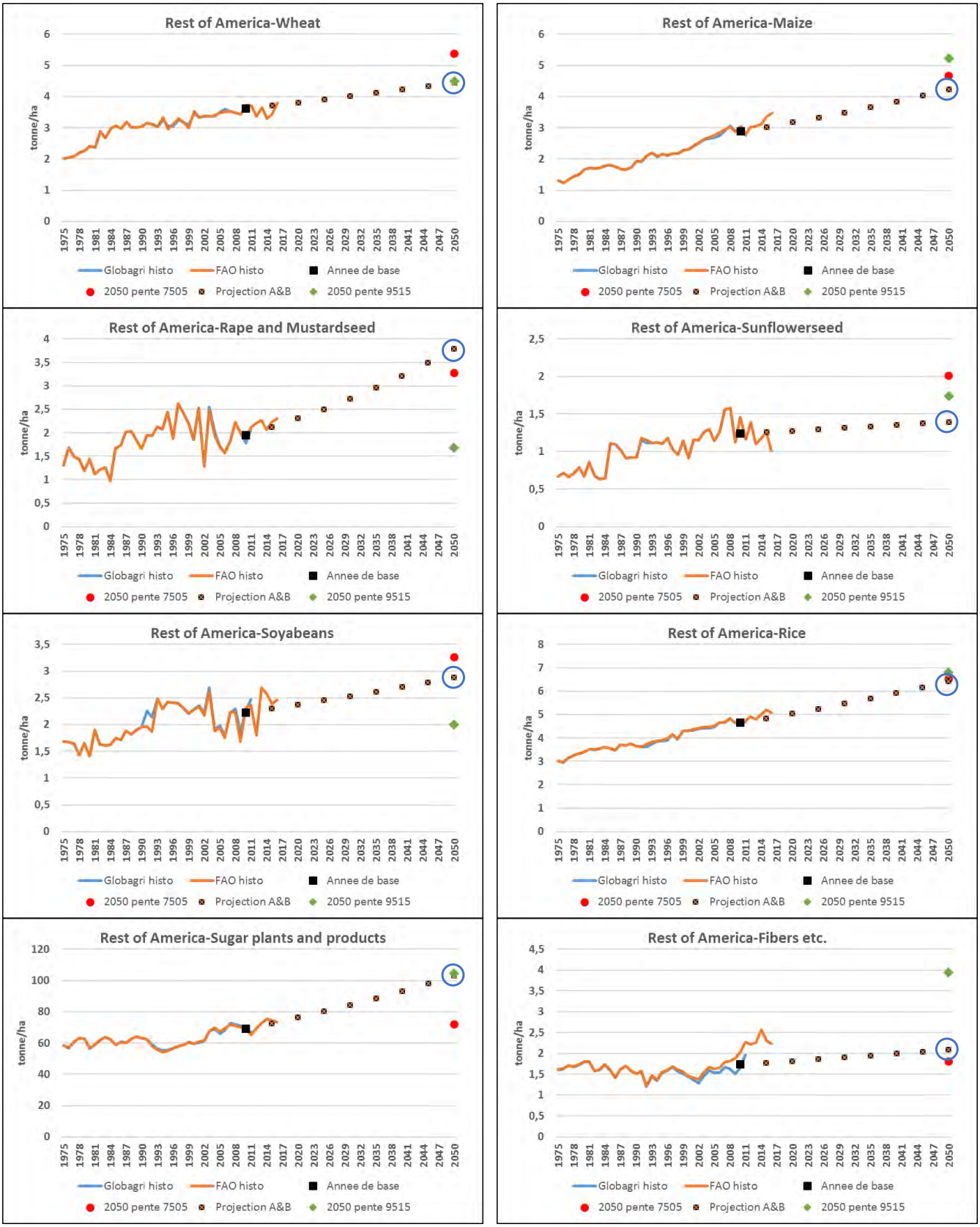
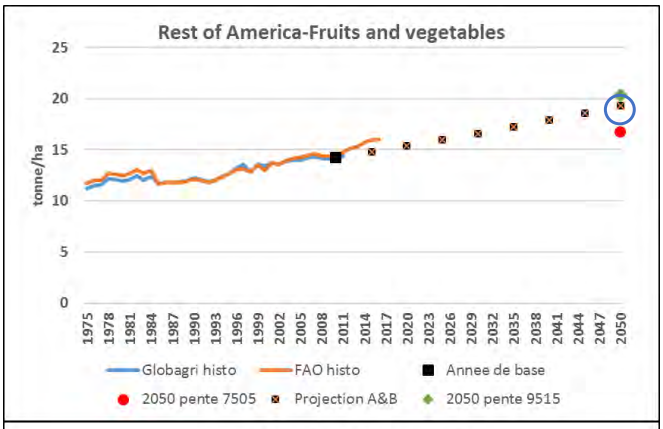
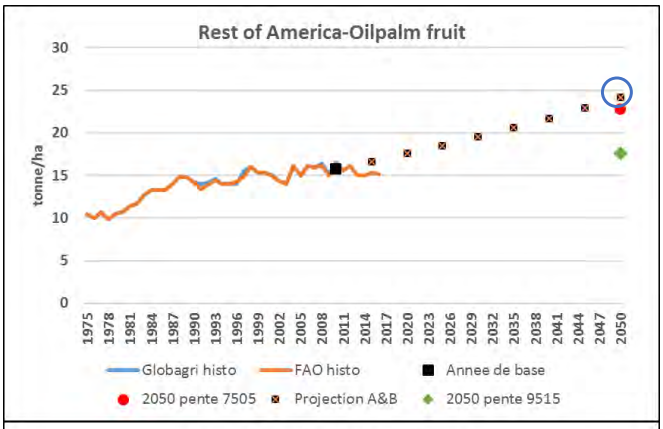
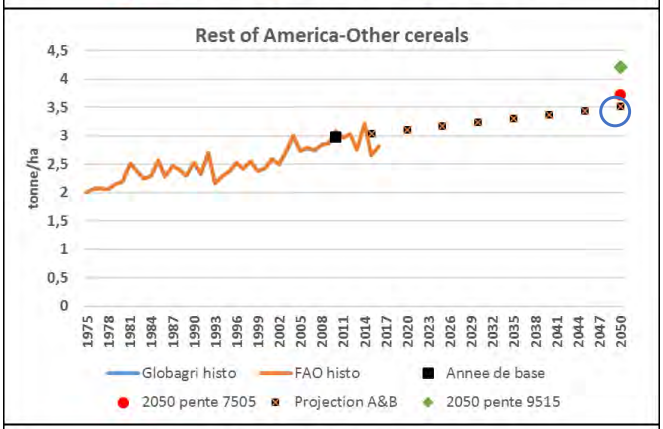

Brazil, Argentina-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

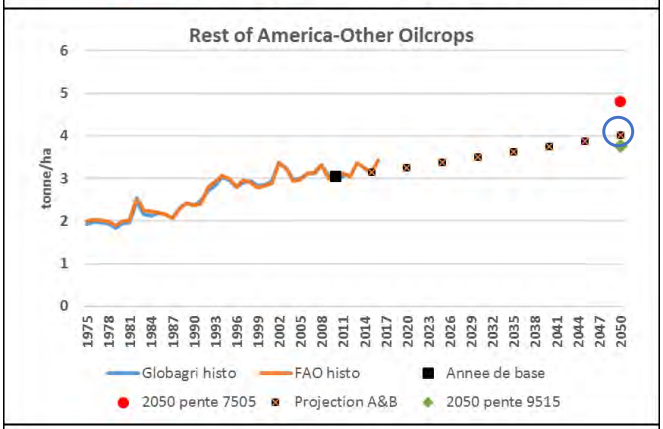
Figure 5.B.12 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le reste de l'Amérique

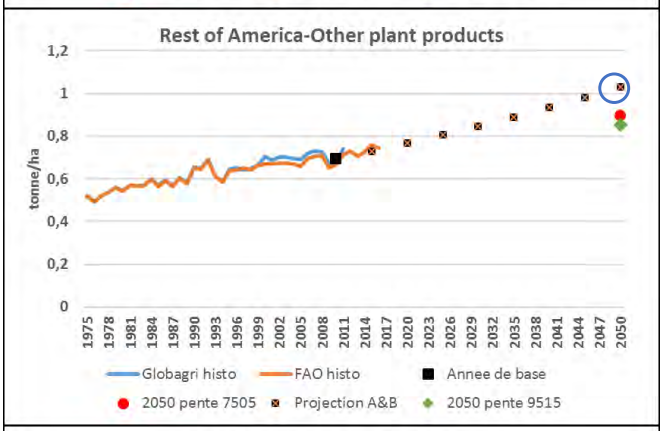


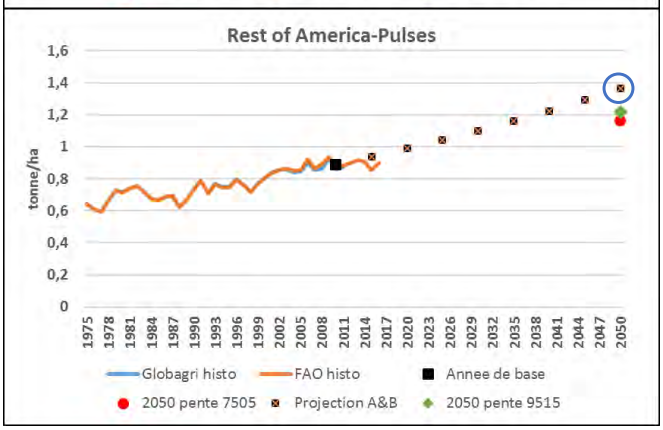

Rest of America-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of America-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of America-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of America-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of America-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of America-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

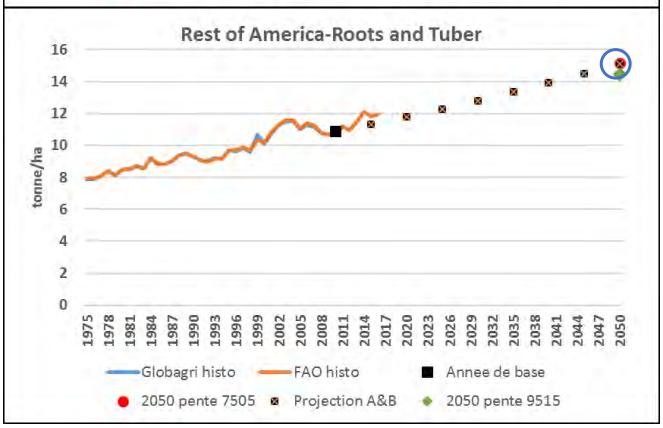
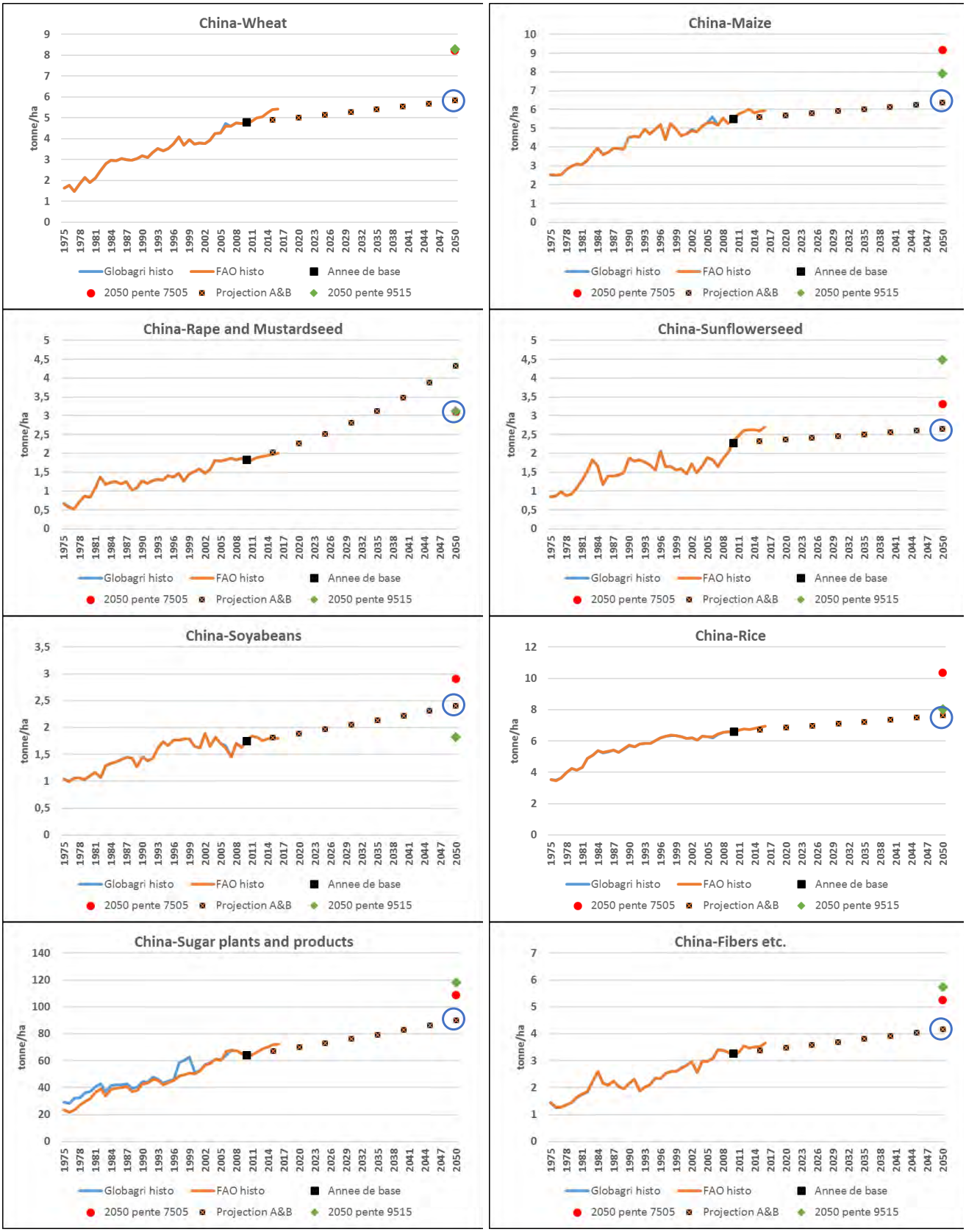
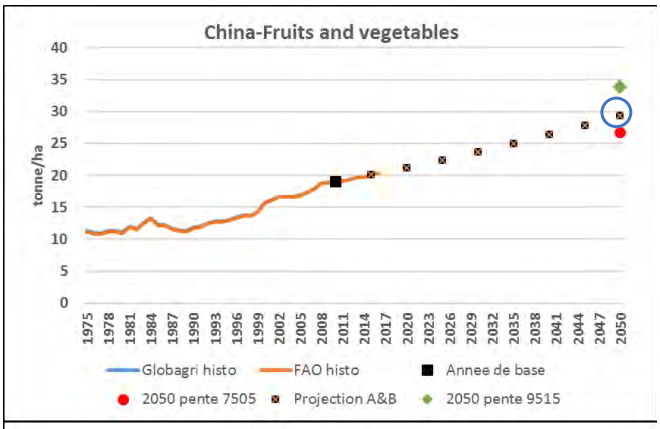
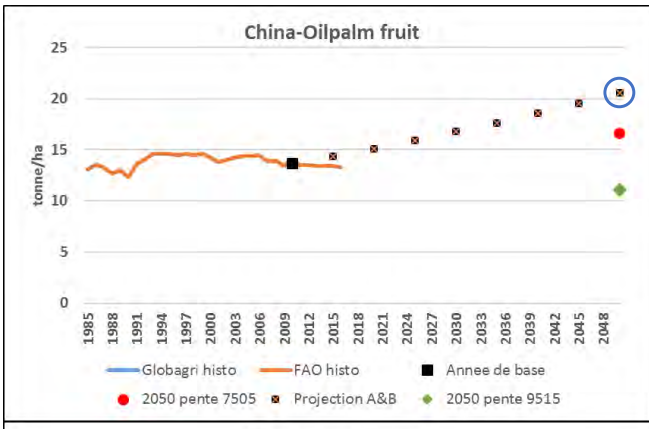
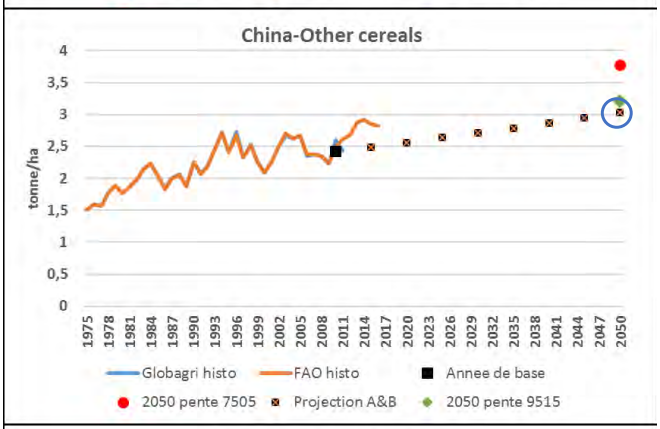

Rest of America-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

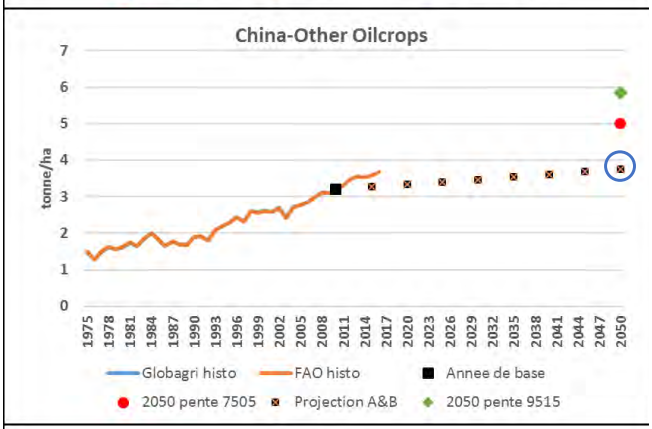
Figure 5.B.13 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour la Chine

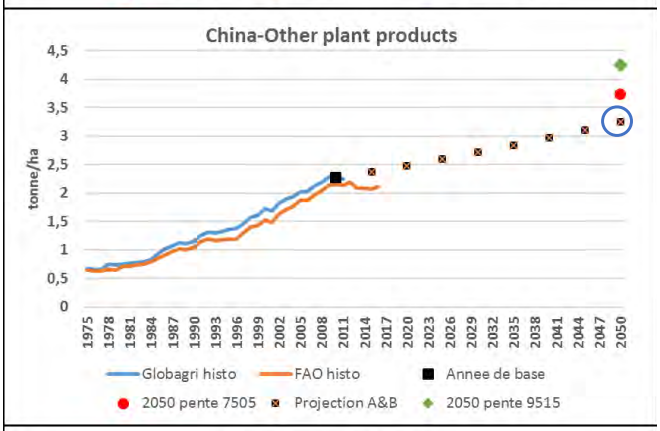


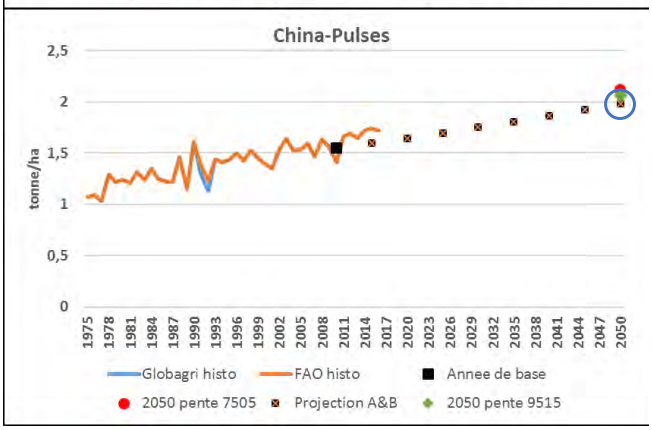

China-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


China-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


China-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


China-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


China-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


China-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

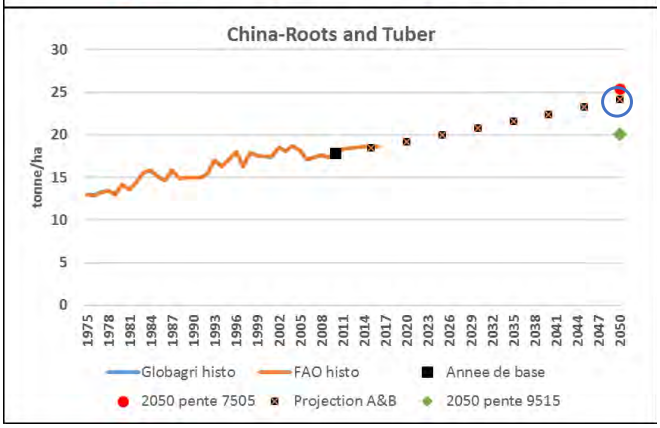
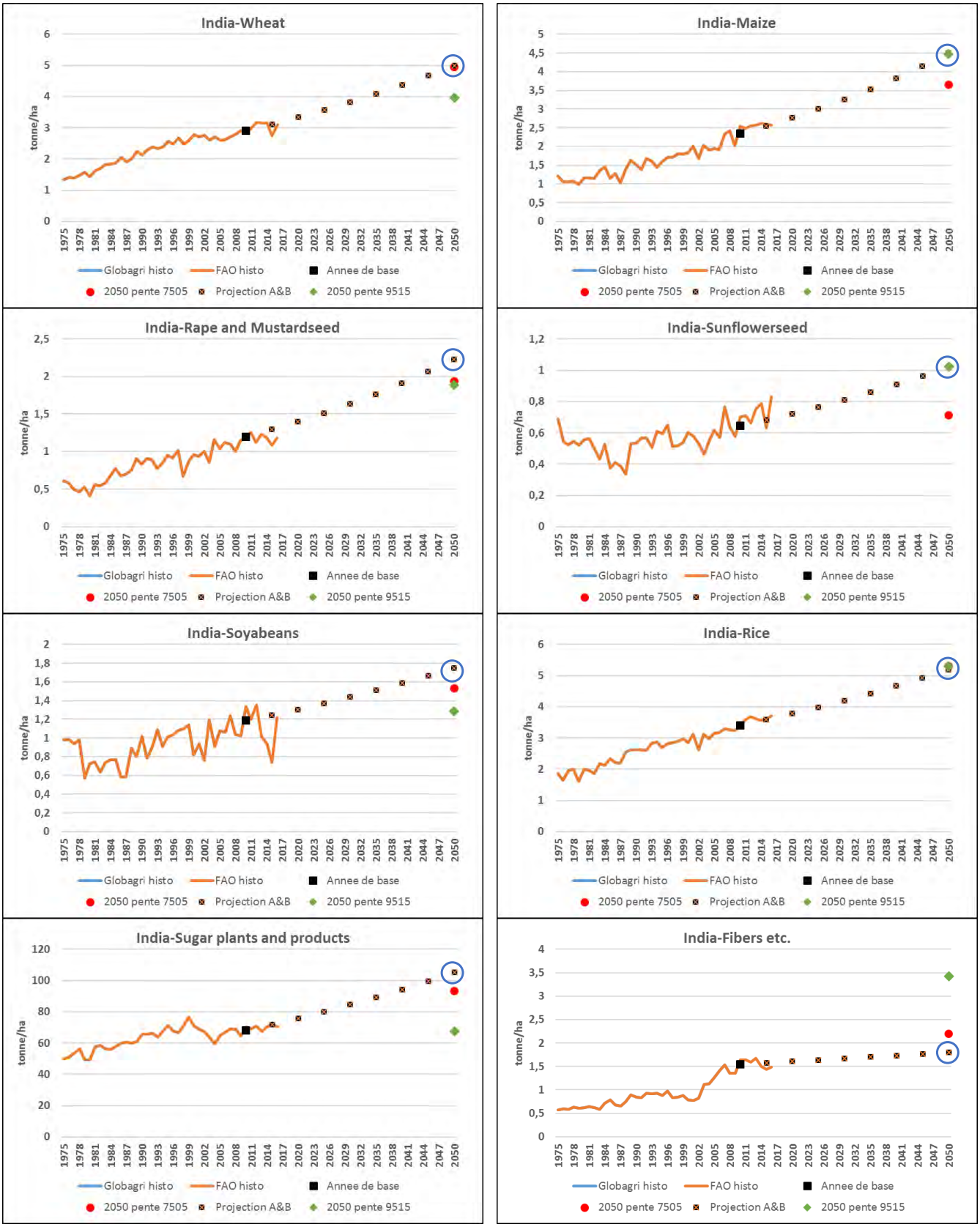
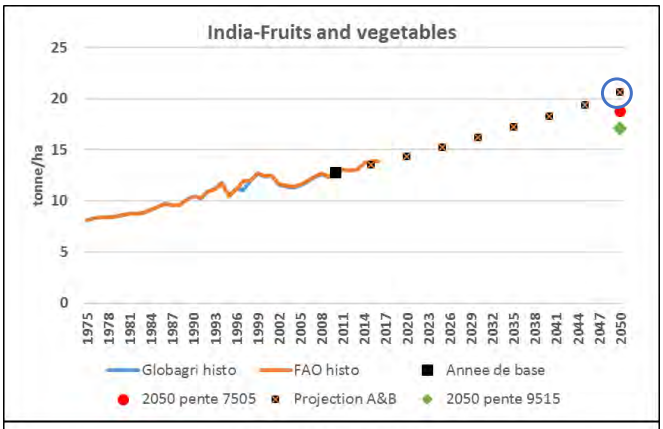
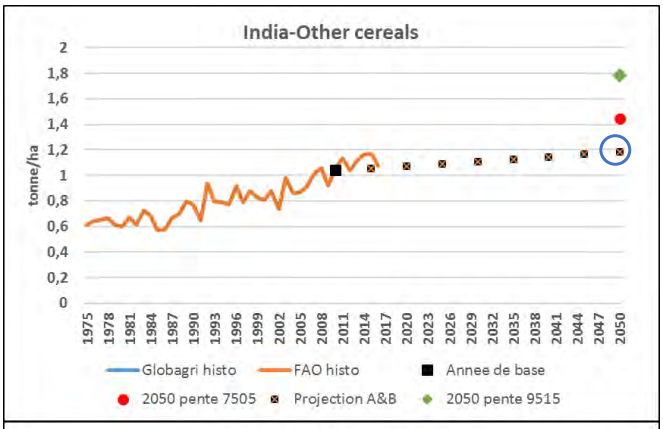
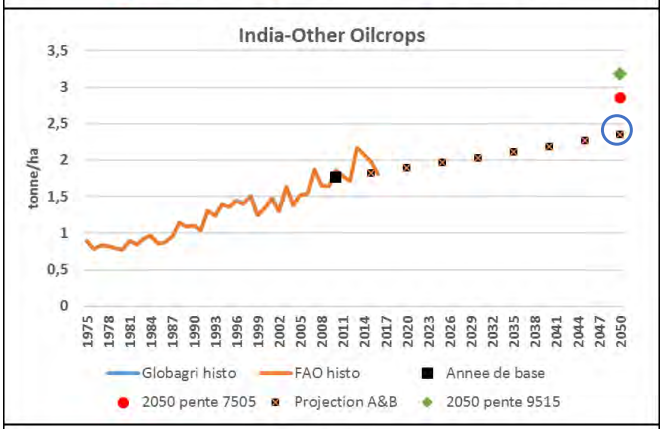

China-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

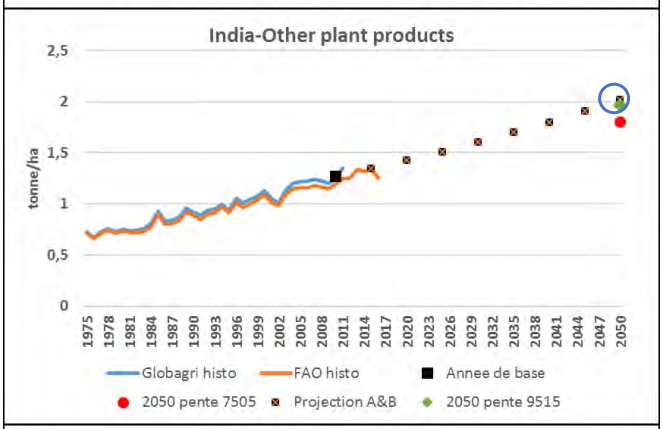
Figure 5.B.14 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Inde

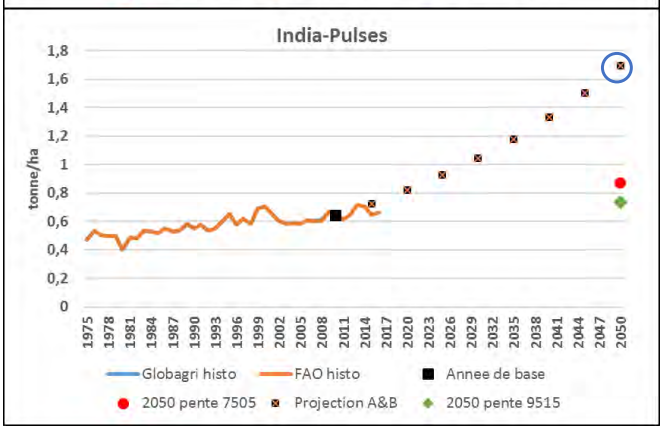



India-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


India-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


India-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


India-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


India-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

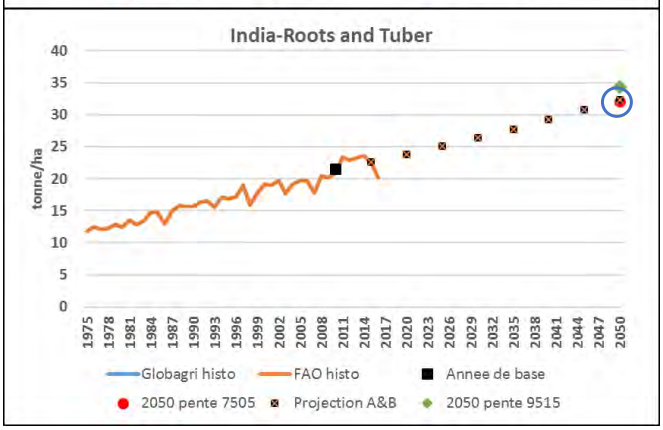
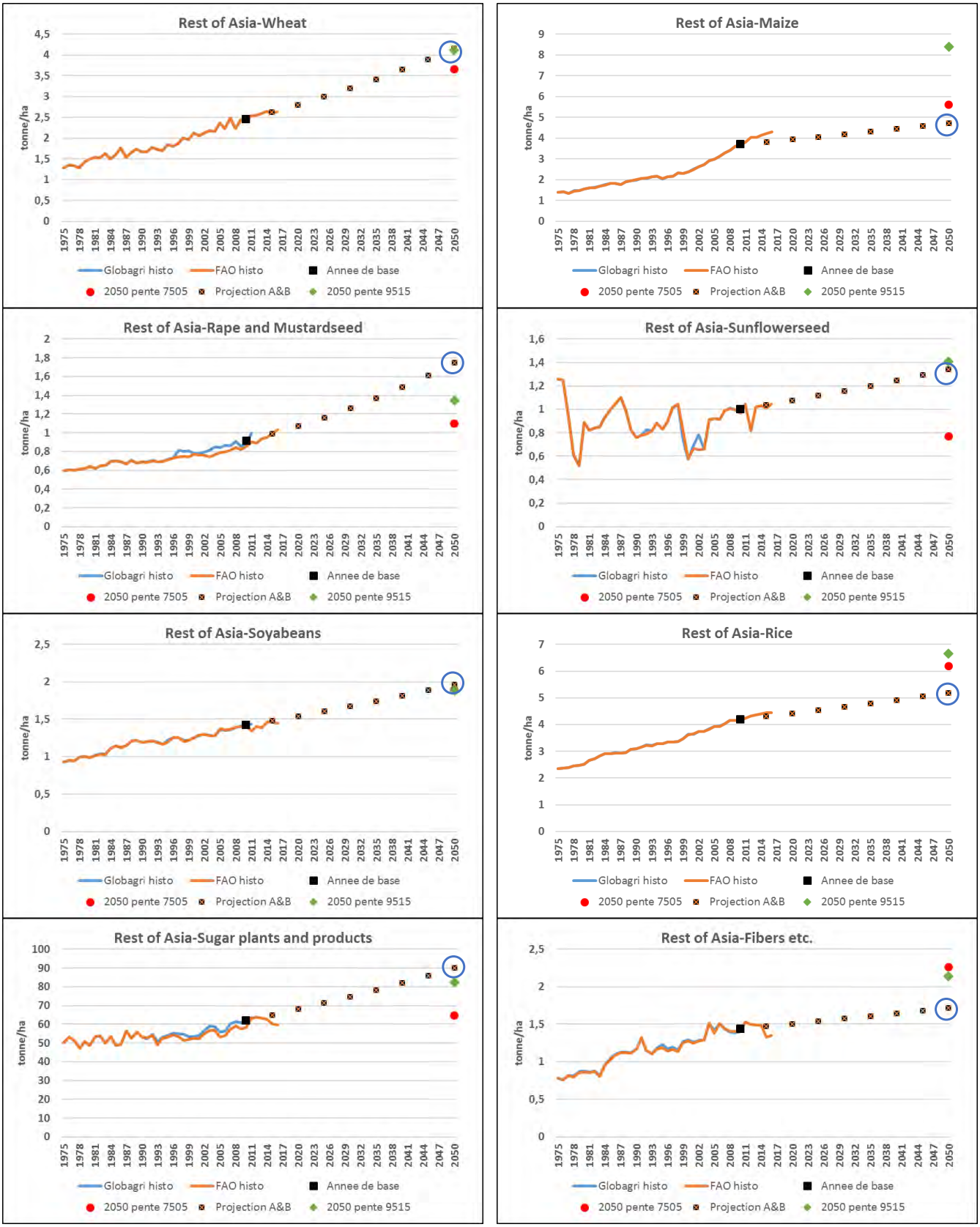
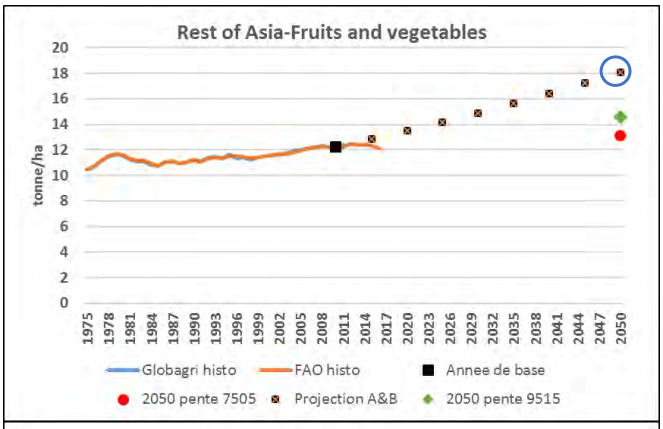
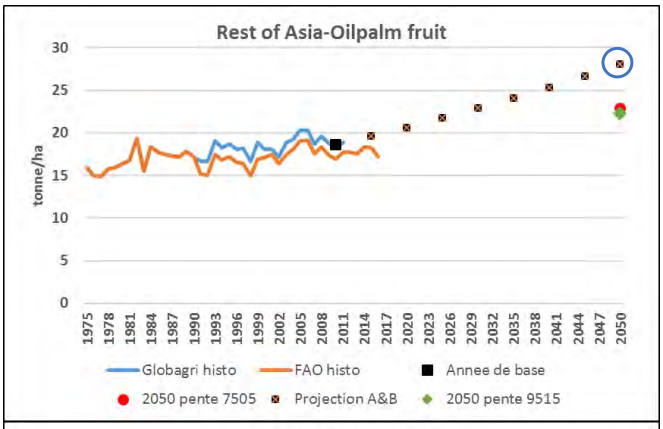
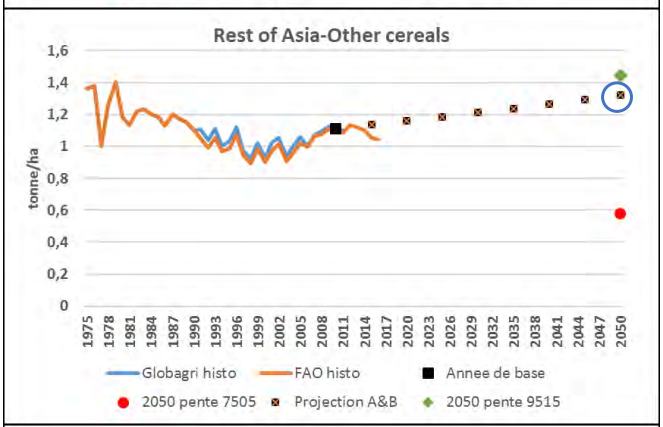

India-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

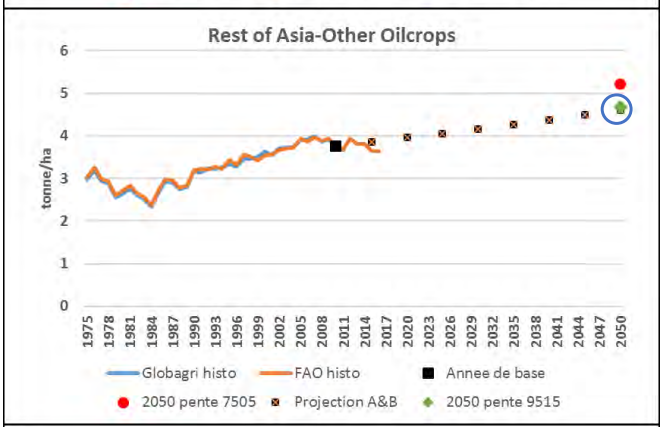
Figure 5.B.15 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le reste de l'Asie

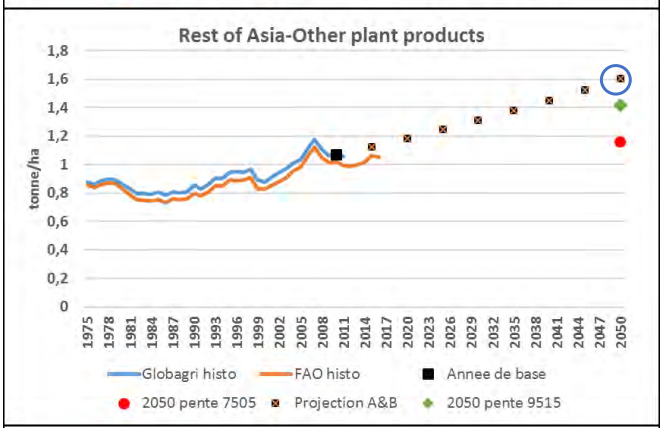


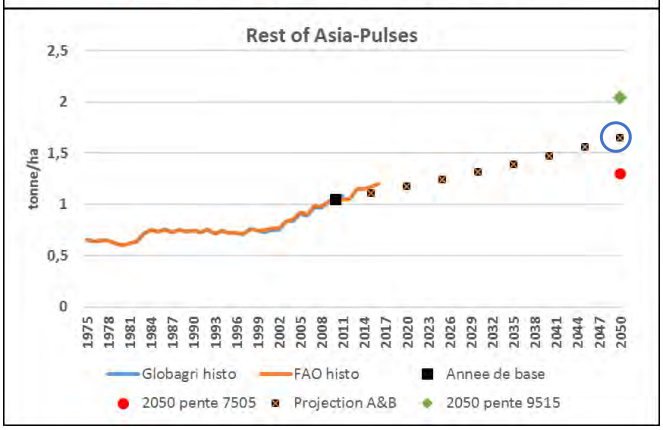

Rest of Asia-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of Asia-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of Asia-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of Asia-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of Asia-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of Asia-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

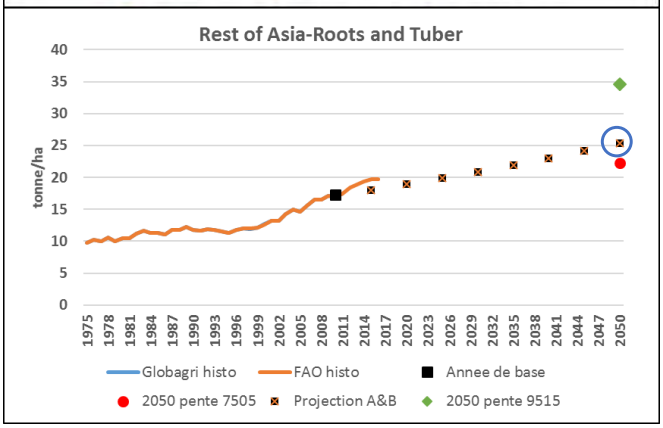
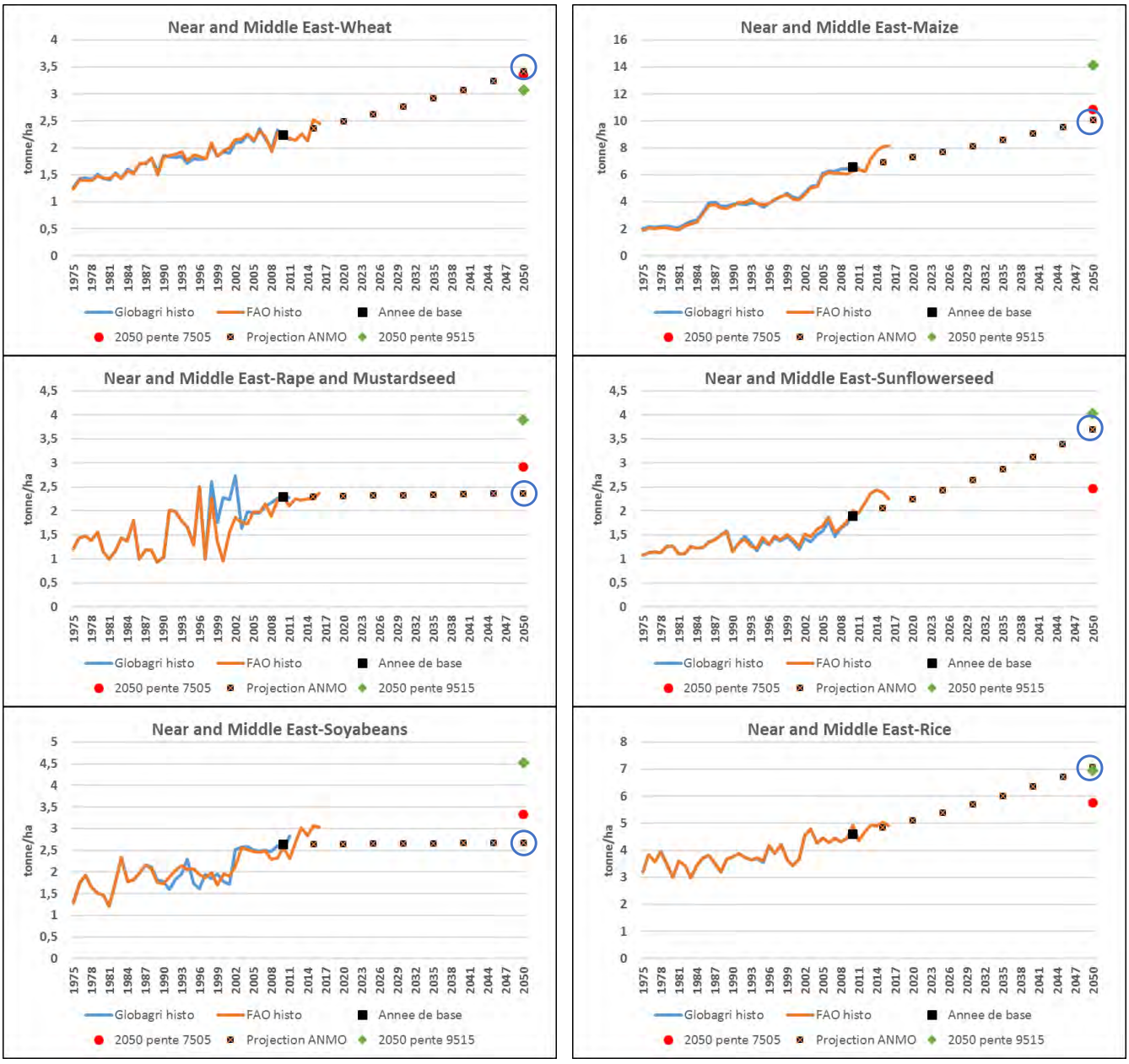
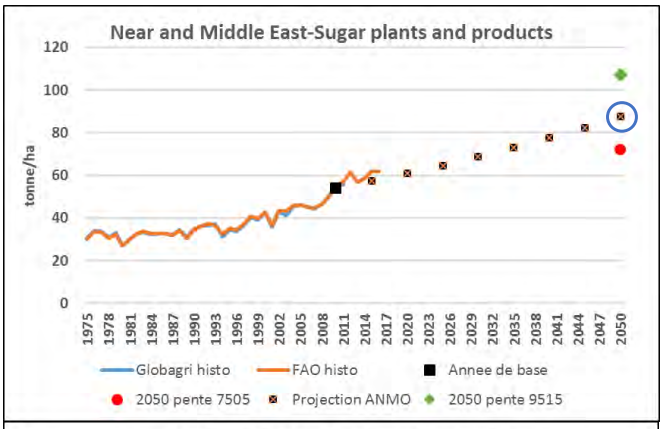
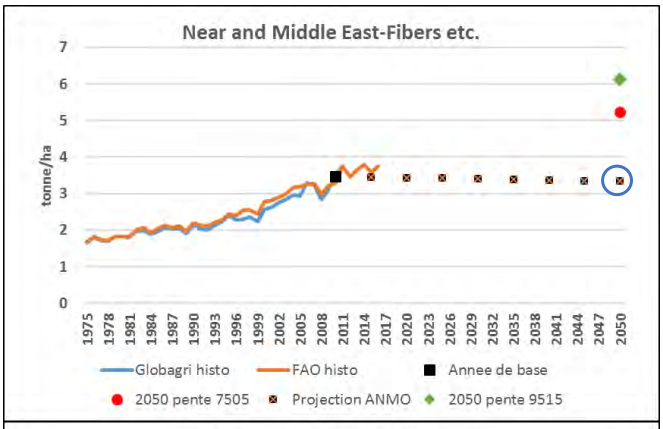

Rest of Asia-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

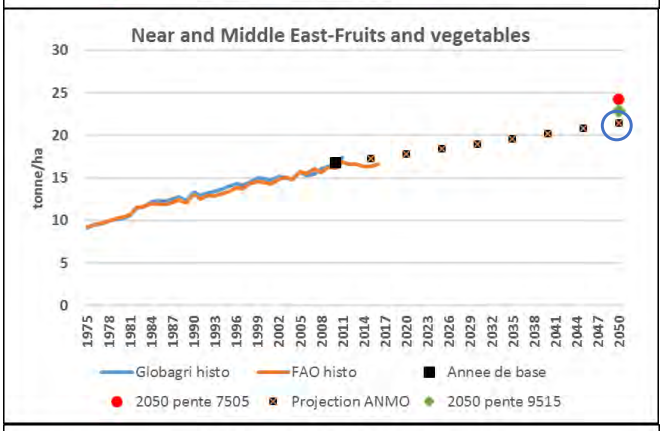
Figure 5.B.16 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le Proche et Moyen-Orient

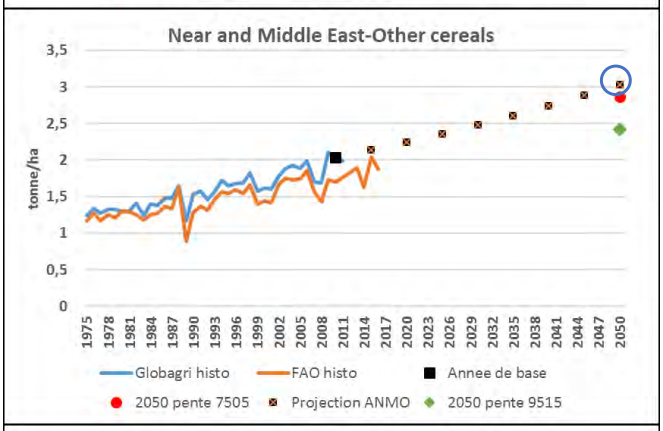
NB : pour la région Proche et Moyen-Orient, l'effet des évolutions techniques « modérées » a systématiquement été caractérisé à partir des projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient (Le Mouël et Schmitt (2018).

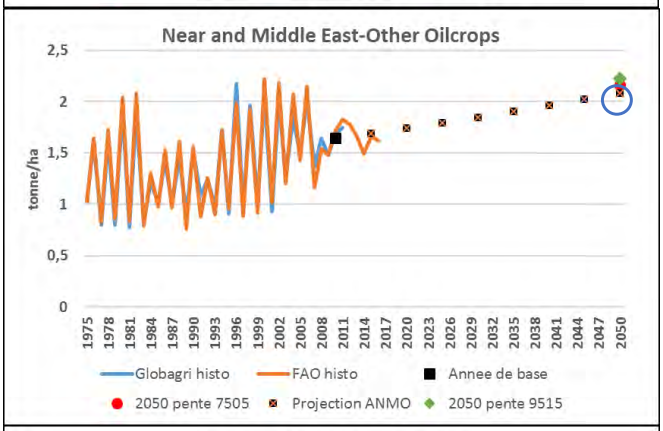


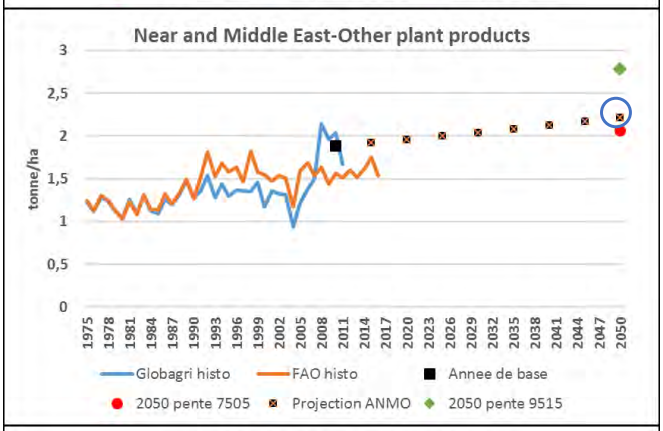

Near and Middle East-Sugar plants and products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

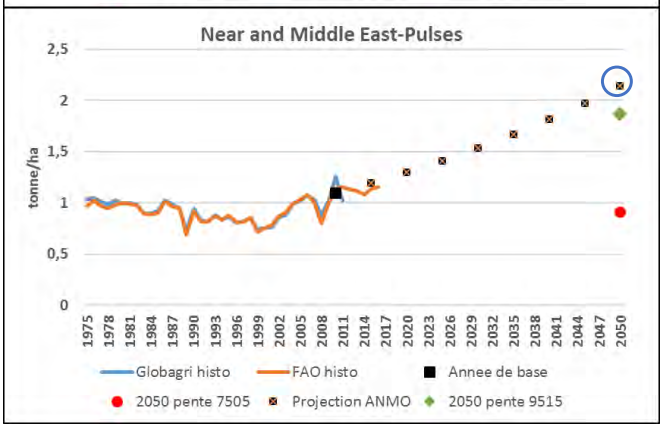

Near and Middle East-Fibers etc.
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


Near and Middle East-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


Near and Middle East-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


Near and Middle East-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


Near and Middle East-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


Near and Middle East-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

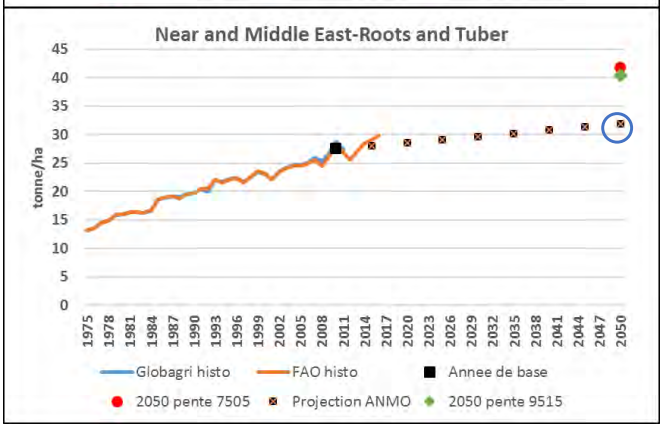
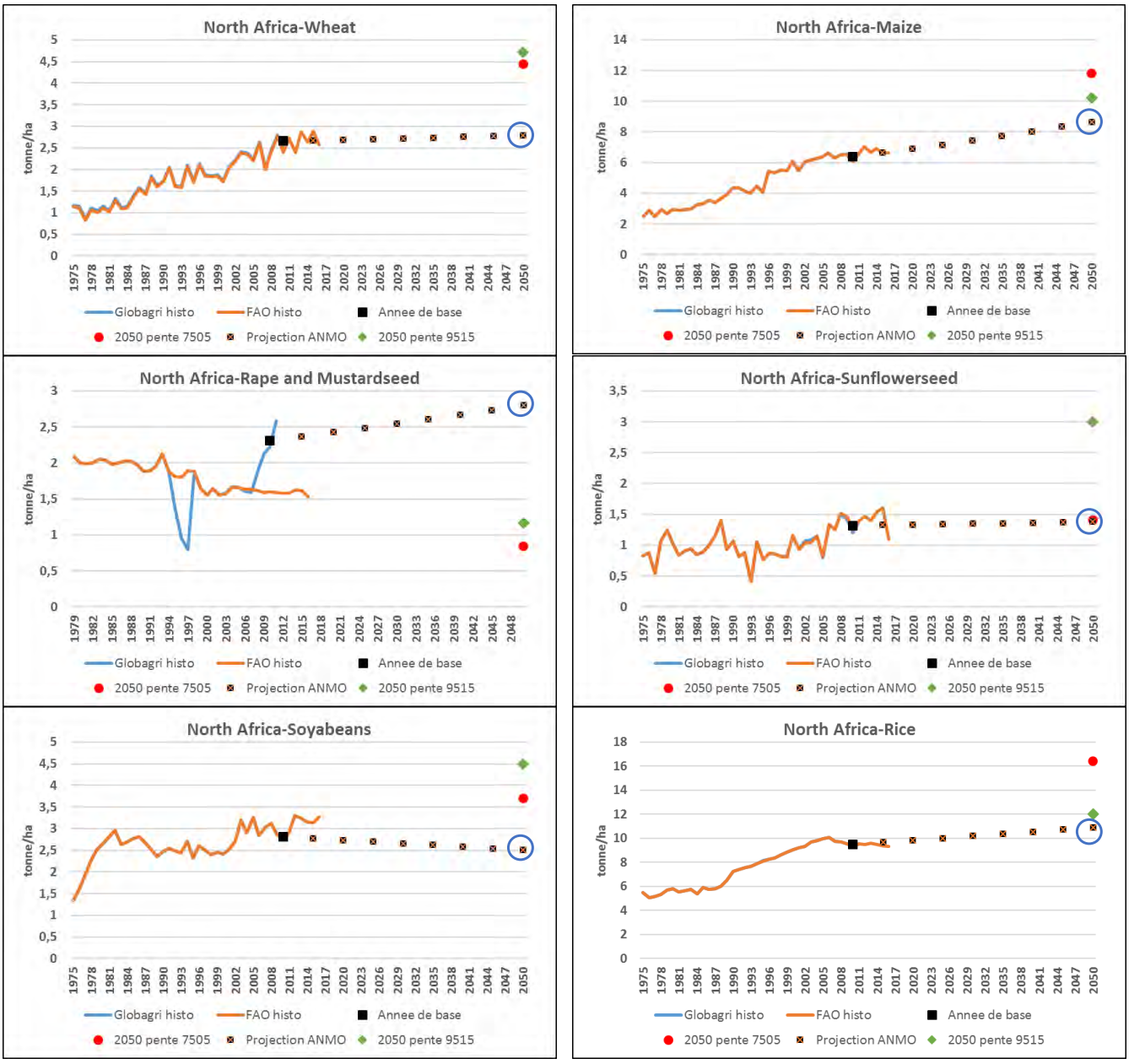
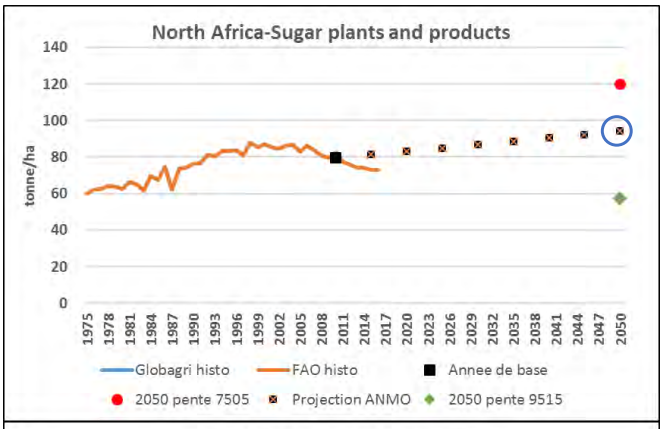
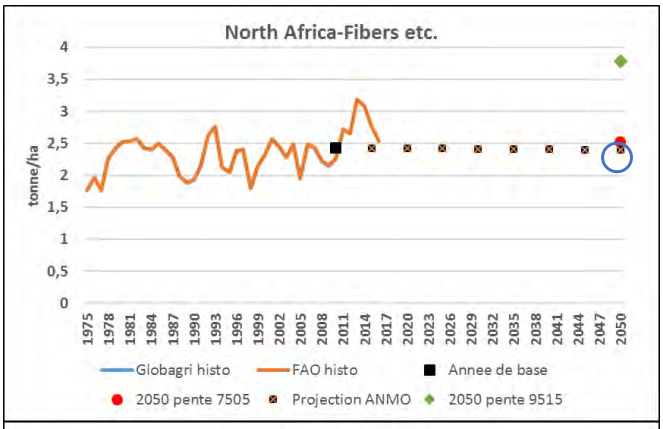

Near and Middle East-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

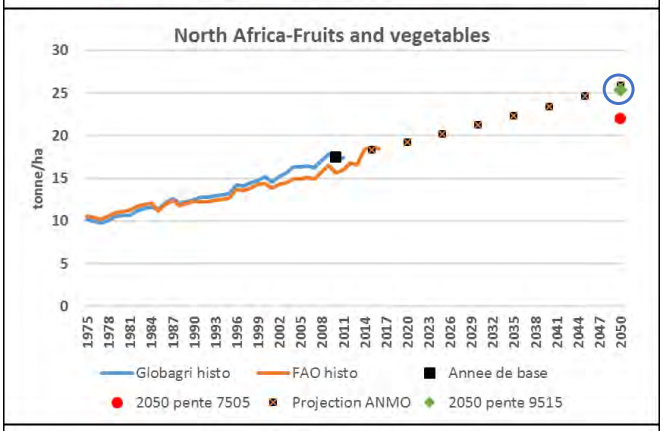
Figure 5.B.17 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Afrique du Nord

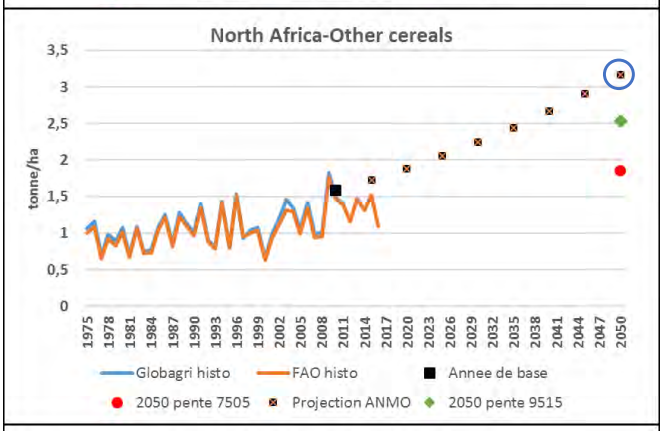
NB : pour la région Afrique du Nord, l'effet des évolutions techniques « modérées » a systématiquement été caractérisé à partir des projections de rendements calculées dans l'étude Inra sur la sécurité alimentaire en Afrique du Nord et Moyen-Orient (Le Mouël et Schmitt (2018).

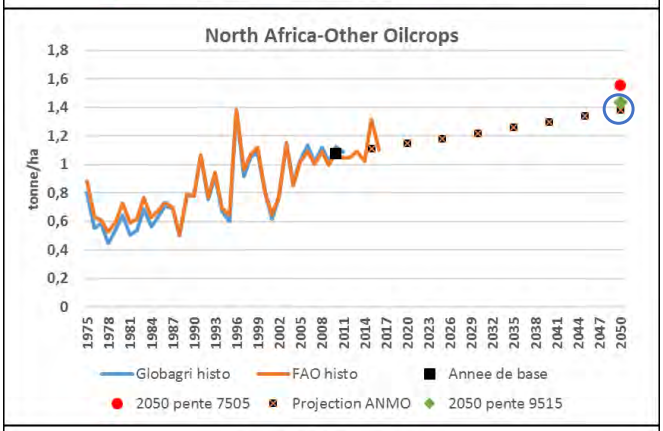


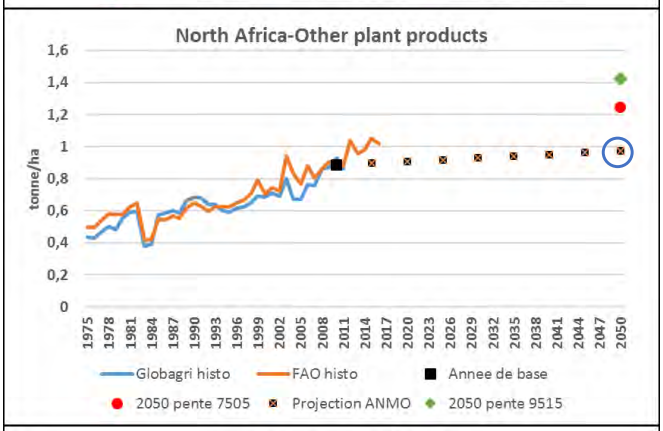

North Africa-Sugar plants and products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

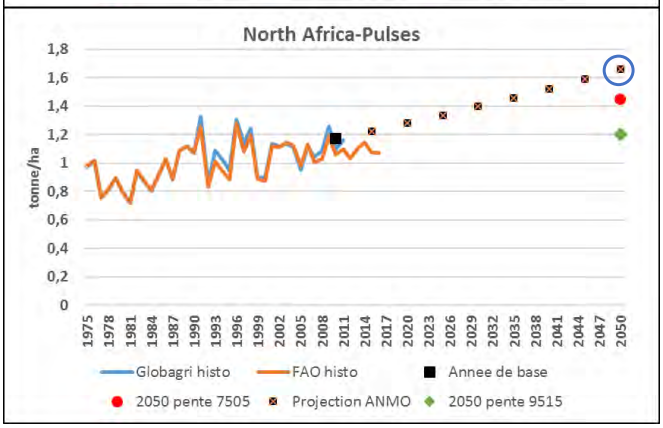

North Africa-Fibers etc.
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


North Africa-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


North Africa-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


North Africa-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


North Africa-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515


North Africa-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

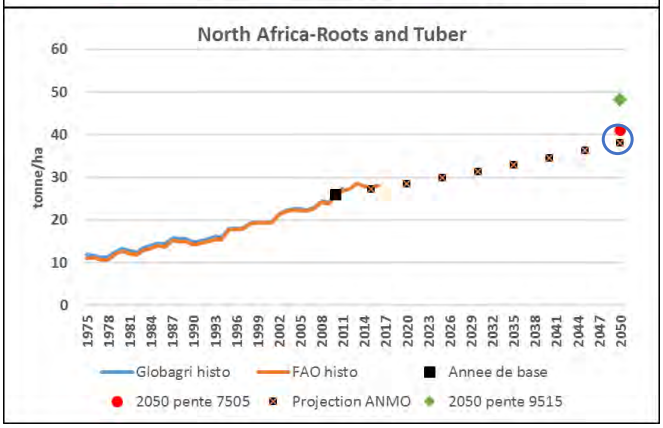
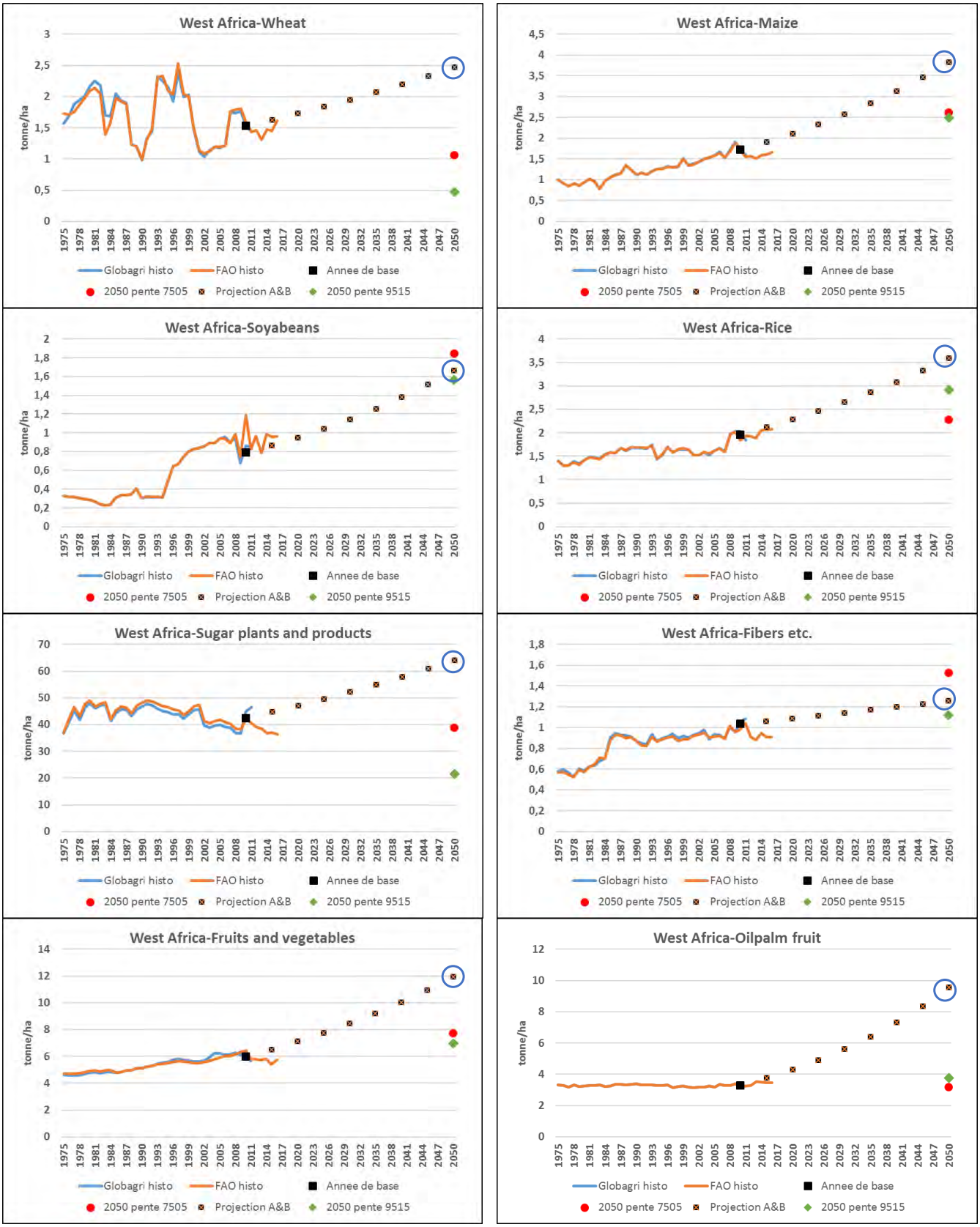
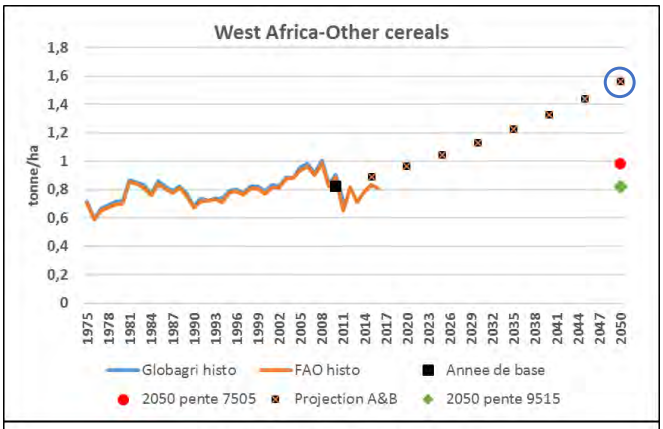
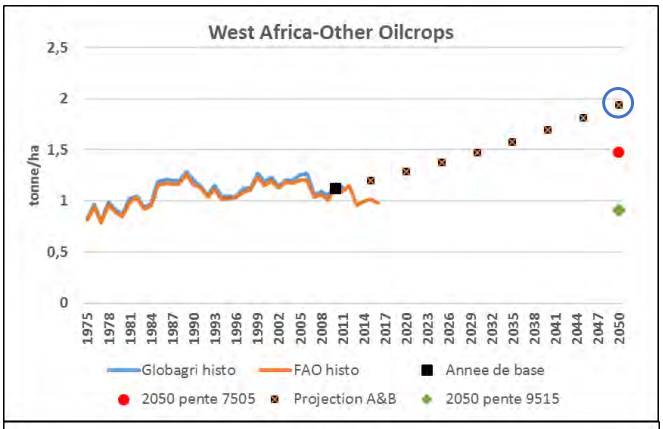
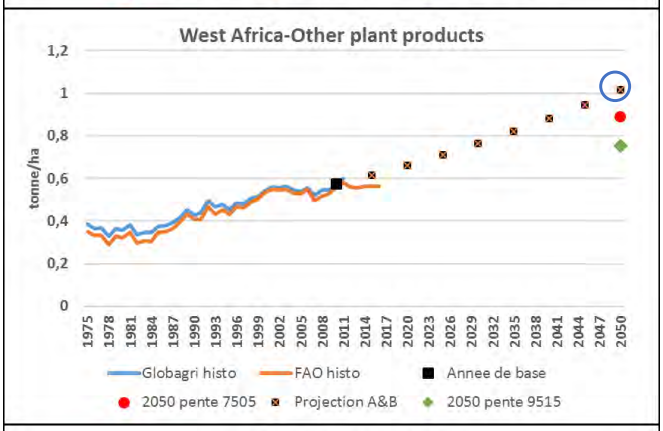

North Africa-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection ANMO
2050 pente 9515

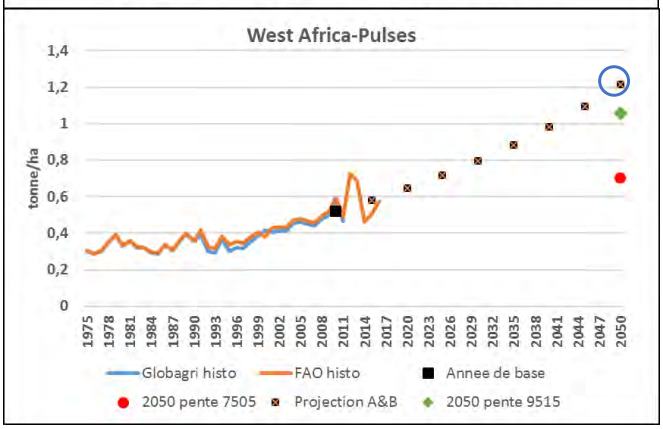
Figure 5.B.18 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Afrique de l'Ouest




West Africa-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


West Africa-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


West Africa-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


West Africa-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

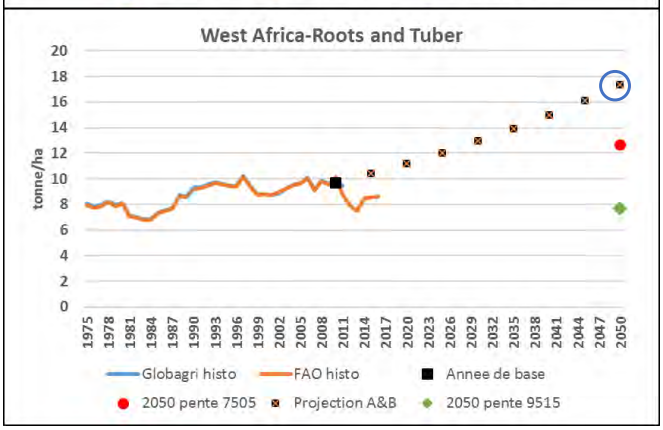
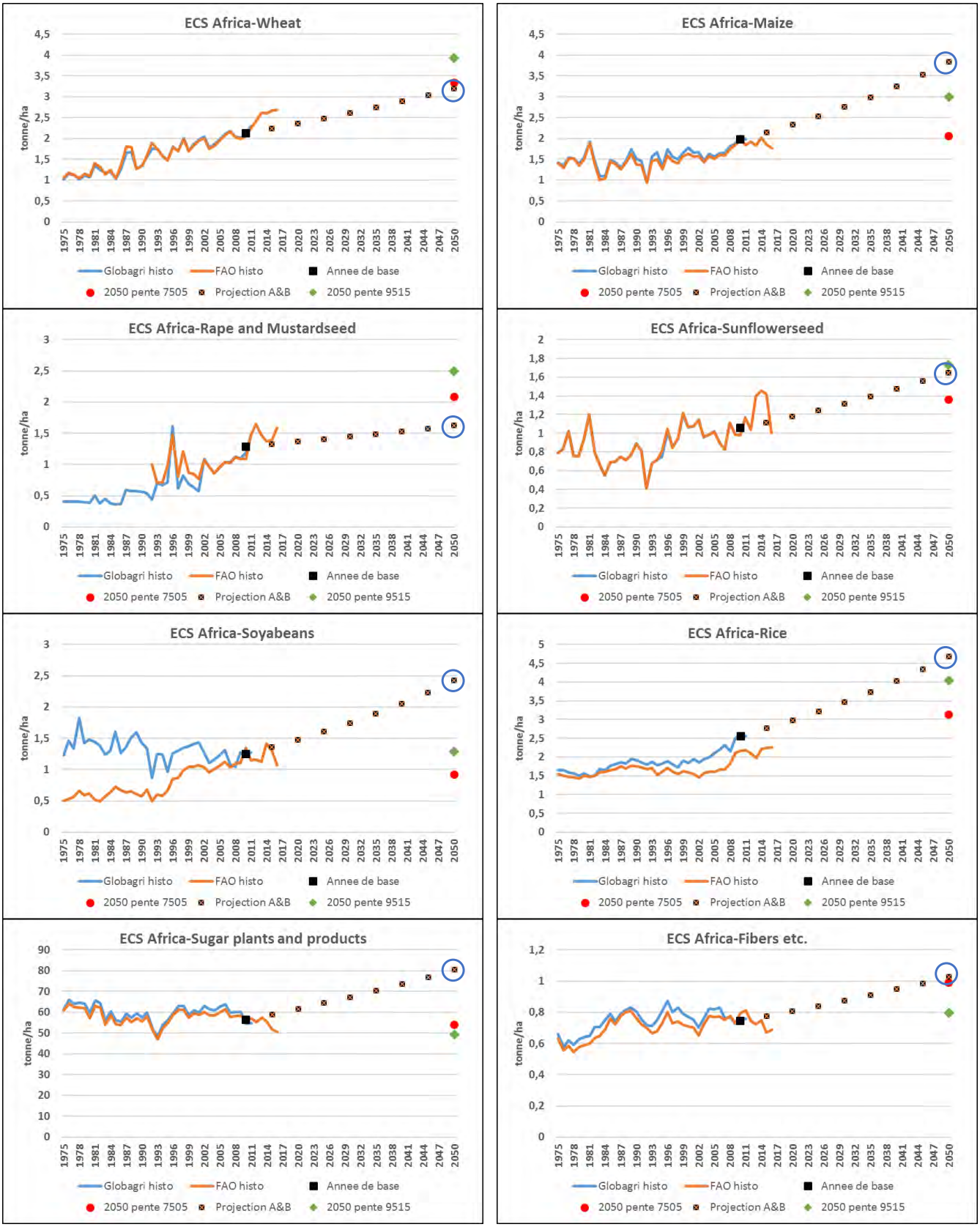
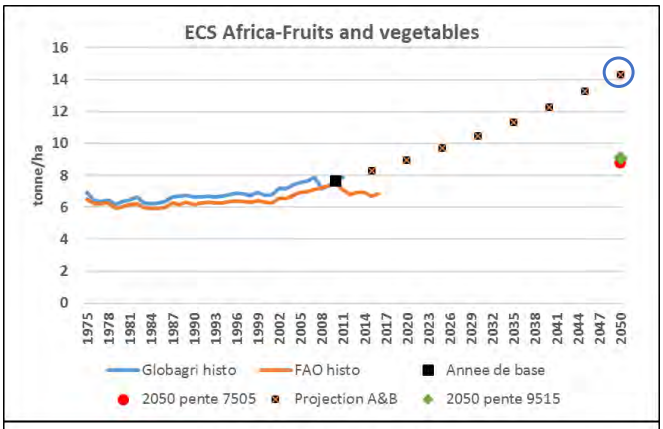
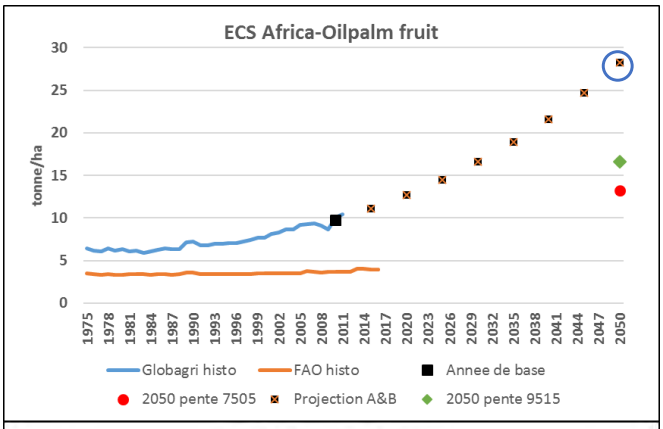
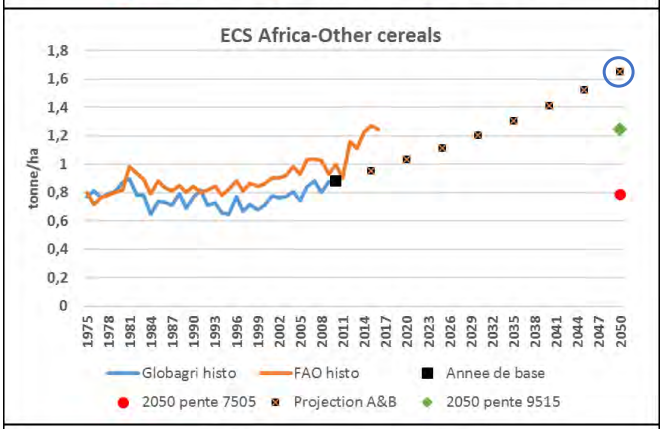

West Africa-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

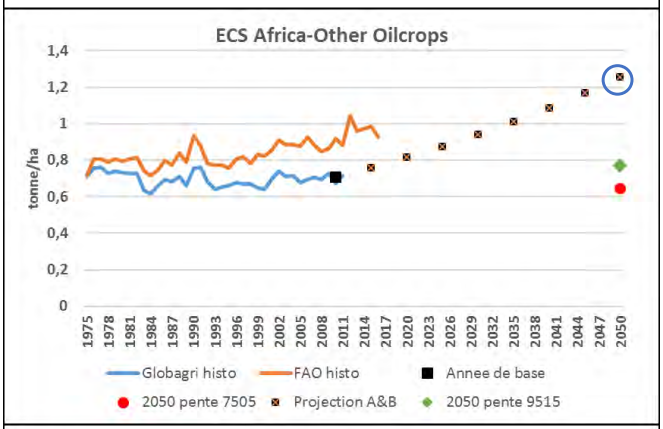
Figure 5.B.19 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Afrique de l'Est, Centrale et du Sud

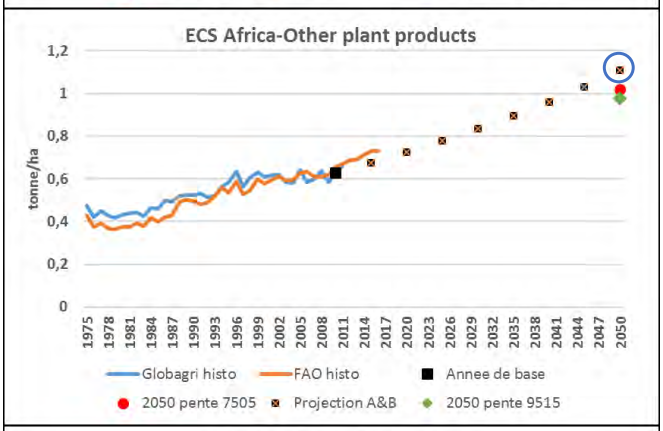


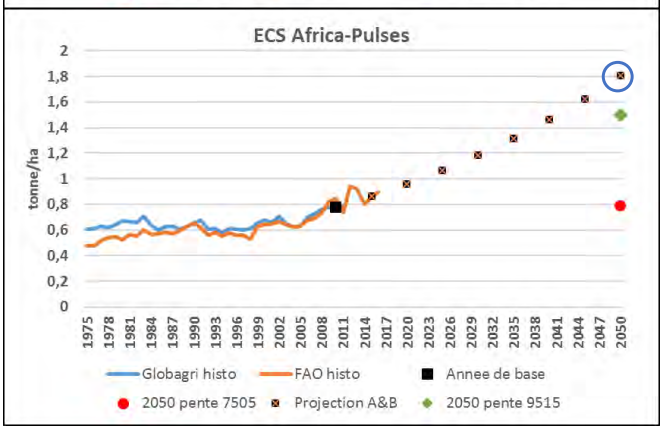

ECS Africa-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


ECS Africa-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


ECS Africa-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


ECS Africa-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


ECS Africa-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


ECS Africa-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

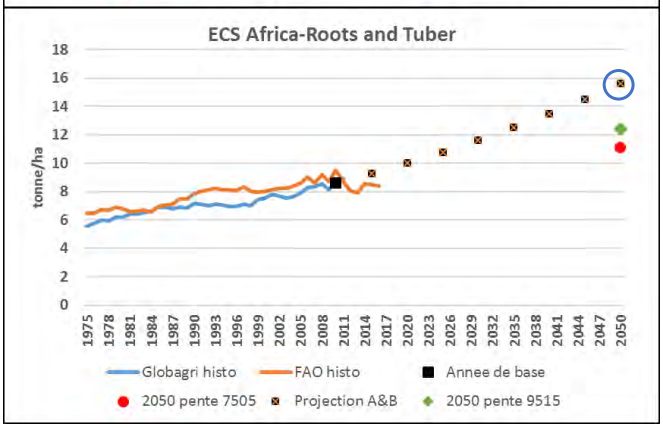
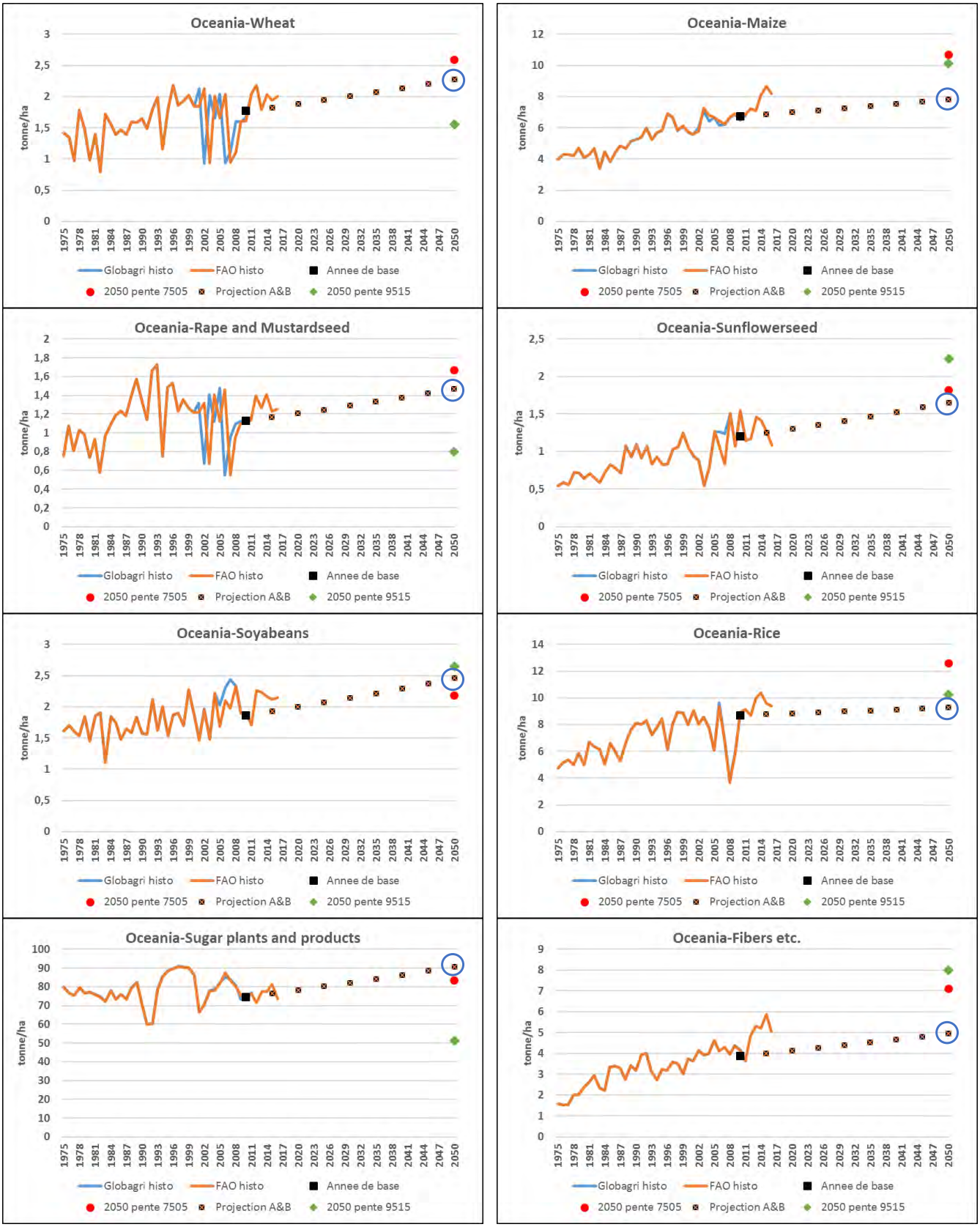
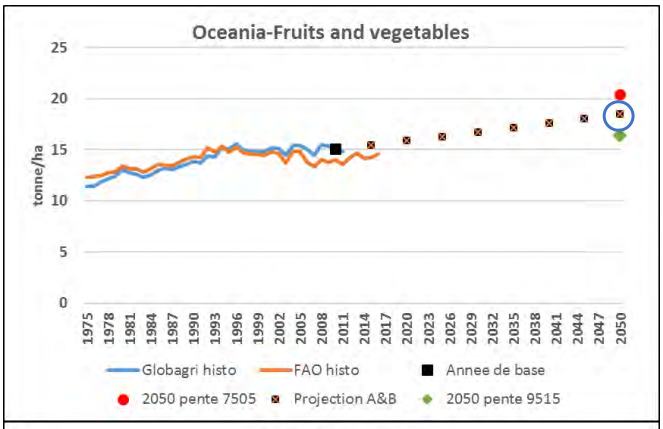
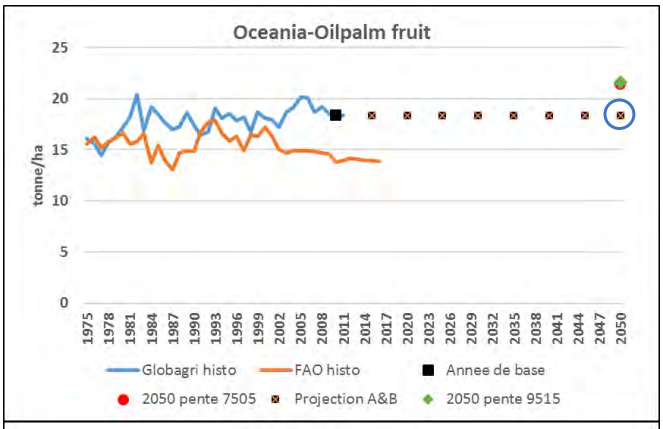
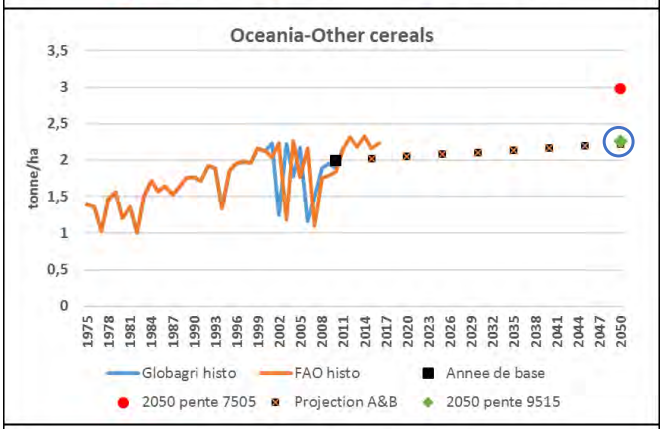

ECS Africa-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

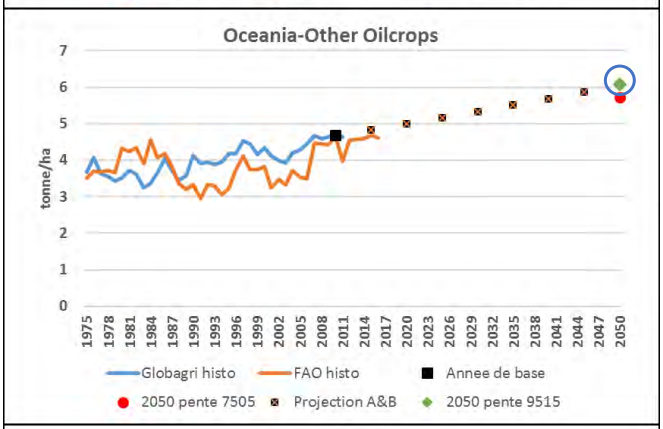
Figure 5.B.20 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour l'Océanie

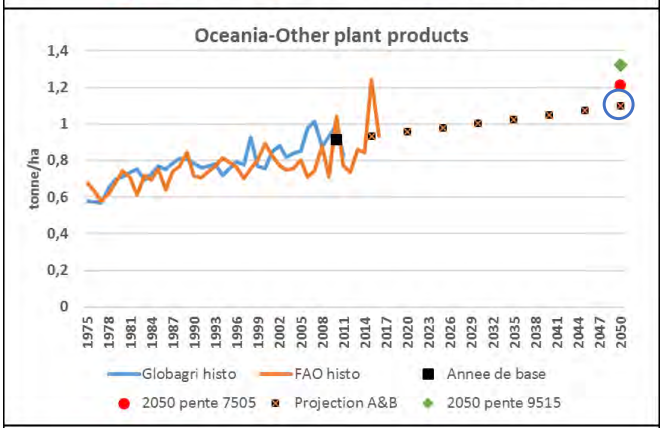


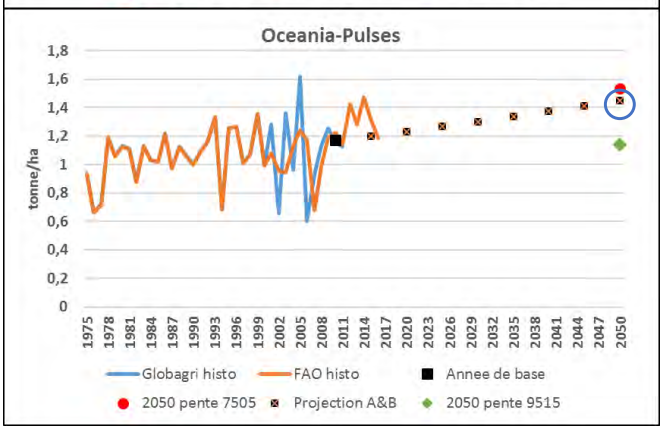

Oceania-Fruits and vegetables
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Oceania-Oilpalm fruit
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Oceania-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Oceania-Other Oilcrops
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Oceania-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Oceania-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

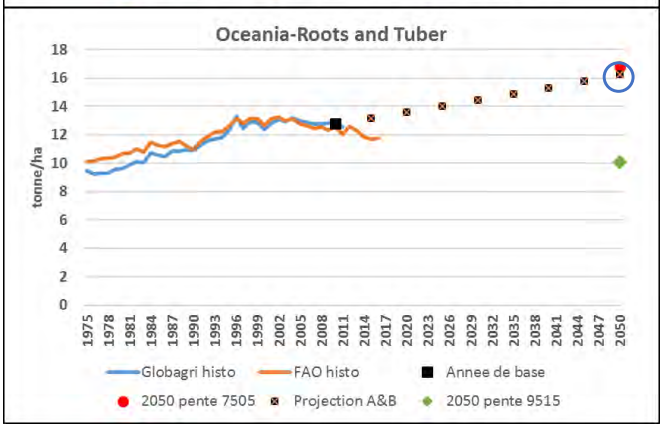
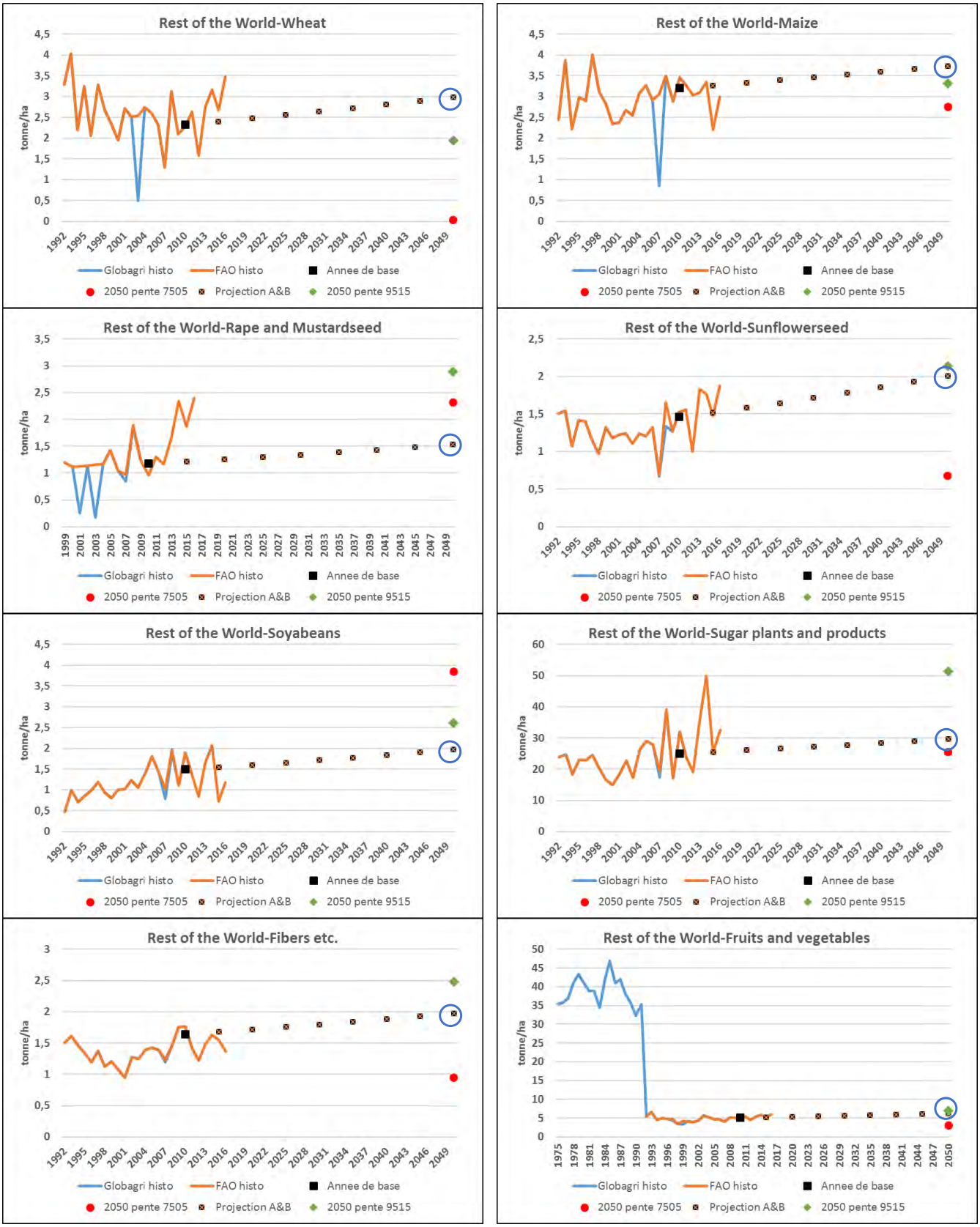
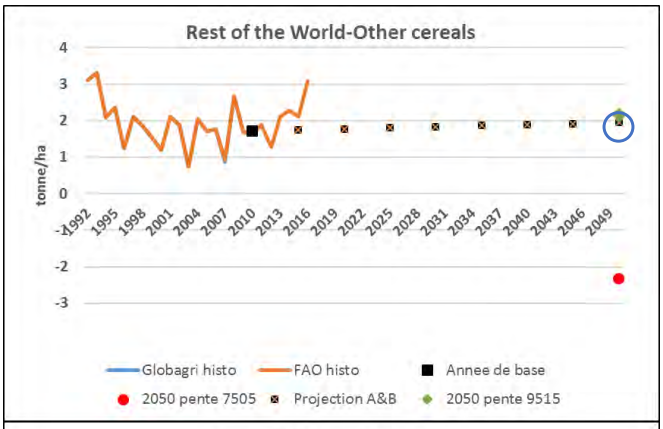
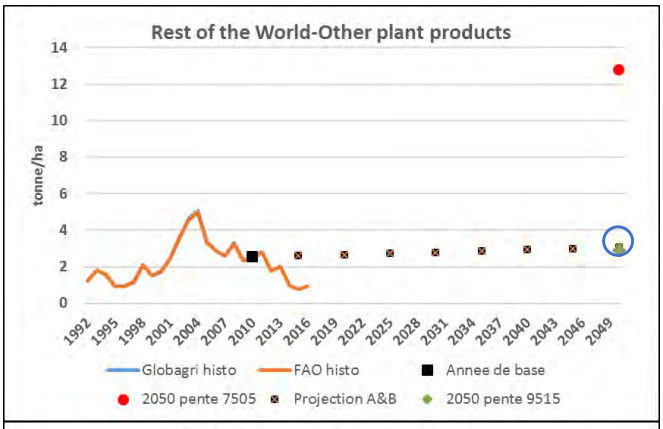
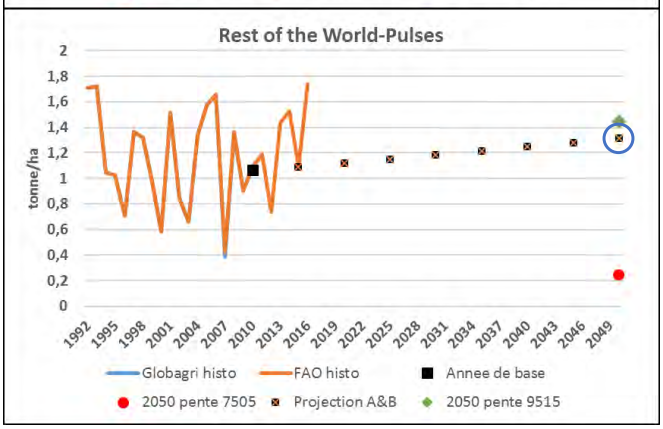

Oceania-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

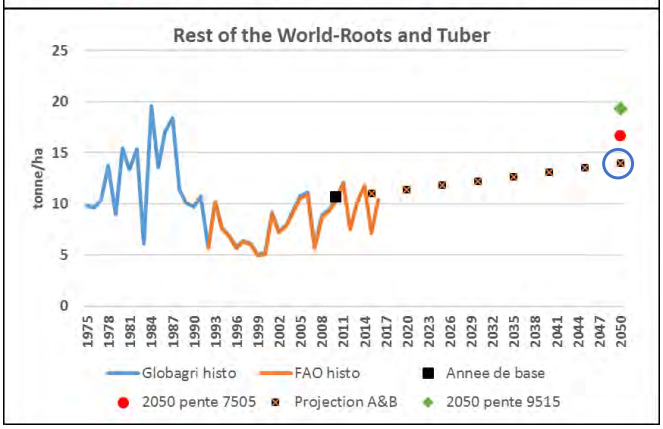
Figure 5.B.21 - Effets des évolutions techniques « soutenues » sur les rendements pour le reste du monde




Rest of the World-Other cereals
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of the World-Other plant products
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of the World-Pulses
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515


Rest of the World-Roots and Tuber
tonne/ha
Globagri histo
FAO histo
Annee de base
2050 pente 7505
Projection A&B
2050 pente 9515

5.C. Productions (millions de tonnes, « 2010 »)

	Wheat	Maize	Rape and Mustardseed	Sunflower seed	Soya bean	Rice	Sugar plants and products	Fibers etc.	Fruits and vegetables	Oilpalm fruit	Other Oilcrops	Other cereals	Other plant products	Roots and Tuber	Pulses	Other products
France	37,5	15,1	5,3	1,7	0,1	0,1	35,0	0,1	14,9	/	0,1	13,8	0,0	7,1	1,2	1,2
Germany	24,0	4,6	5,3	0,1	0,0	/	26,3	0,0	6,0	/	0,0	16,7	0,0	11,2	0,3	2,1
UK	14,7	/	2,3	/	/	/	7,8	0,0	3,1	/	0,1	6,6	0,0	6,3	0,7	0,5
Poland	9,5	1,9	2,2	0,0	0,0	/	10,8	0,0	8,9	/	0,0	16,1	0,0	8,9	0,3	0,6
South Europe	16,2	18,9	0,2	1,4	0,7	2,9	9,6	1,1	77,6	/	13,3	12,5	0,8	6,8	0,7	2,6
East Europe	16,2	25,6	1,8	4,4	0,7	0,1	4,6	0,1	12,7	/	0,1	4,8	0,2	5,5	0,2	0,6
Central Eur.	8,1	4,3	1,7	0,3	0,1	/	9,2	0,0	3,5	/	0,1	4,9	0,0	2,1	0,2	0,5
Rest of Eur.	15,9	1,1	1,9	/	/	/	16,6	0,1	10,9	/	0,0	14,6	0,0	15,8	0,2	2,1
Ex-URSS	103,8	22,2	3,1	14,9	3,1	1,9	50,7	5,0	54,2	/	0,7	44,0	0,3	65,2	3,0	2,8
Canada, USA	83,5	331,5	14,3	1,2	92,8	9,8	54,4	8,9	66,5	/	2,7	25,4	2,3	24,6	7,1	9,6
Brazil, Arg.	18,9	73,8	0,1	2,9	111,2	13,9	736,2	5,9	61,7	1,2	4,2	9,0	4,0	31,9	3,8	3,4
Rest of Amer.	8,7	36,0	0,2	0,6	10,6	13,4	195,4	1,3	95,7	11,7	3,1	10,3	3,3	23,5	2,9	2,8
China	115,9	178,2	13,4	2,2	14,8	198,9	123,4	23,1	673,9	0,7	19,6	7,8	5,7	162,9	4,3	20,8
India	82,8	20,1	7,3	0,7	11,6	145,8	306,6	20,7	172,0	/	20,3	20,1	6,1	47,4	16,3	1,0
Rest of Asia	32,4	46,5	0,7	1,1	2,5	288,3	225,3	17,4	149,6	196,1	45,2	2,7	8,4	94,4	7,9	11,8
NME	40,3	7,0	0,5	1,3	0,3	3,2	26,7	3,2	97,7	/	3,1	15,7	2,8	12,1	2,4	0,8
North Africa	18,3	7,4	0,0	0,1	0,0	5,2	26,0	0,5	53,5	/	3,5	6,6	0,5	9,9	0,8	0,5
West Africa	0,1	15,5	/	/	0,5	11,8	5,9	2,4	37,6	13,9	9,0	22,7	5,1	128,2	5,5	1,0
ECS Africa	6,1	42,9	0,1	1,7	1,0	9,0	69,0	2,2	65,3	3,4	7,6	21,4	2,5	106,6	8,7	2,3
Oceania	24,1	0,6	2,1	0,0	0,1	0,3	31,5	1,3	11,3	2,7	2,9	12,0	0,2	4,1	2,2	1,9
ROW	0,8	1,3	0,1	0,4	0,1	/	0,6	0,0	1,4	/	/	0,2	0,0	0,3	0,0	0,1
EUROPE	126,3	70,4	18,7	8,0	1,6	3,1	103,4	1,3	126,7	0,0	13,7	75,5	1,1	47,9	3,6	8,0
WORLD	677,9	854,6	62,5	35,1	250,1	704,7	1 971,6	93,3	1 678,0	229,7	135,7	288,0	42,3	774,8	68,7	68,8

Source: FAOStat. Cases grisées : production nulle

5.D. Hypothèses de correspondance entre FAO (2018) et GlobAgri-AE2050

Afin de pouvoir reconstituer les rendements moyens globaux 2050 à partir des évolutions indiquées dans FAO (2018), nous avons réalisé plusieurs hypothèses de correspondance entre les zones détaillées dans FAO et les régions considérées dans GlobAgri-AE2050, ainsi qu'entre cultures détaillées dans FAO et les cultures considérées dans GlobAgri-AE2050. Ces hypothèses sont détaillées dans les deux tableaux ci-dessous.

Correspondances zones FAO (2018) – régions Globagri-AE2050

Zones FAO (2018)	Régions GlobAgri-AE2050
High-income countries	USA/Canada ; régions européennes
East-Asia and Pacific (excluding China)	Oceania
China	China
South Asia	India
South Asia /East-Asia and Pacific (excl. China)	Rest of Asia
Europe and Central Asia	Former Soviet Union
Latin America and Caribbean	Brazil, Argentina ; Rest of America
Near East and North Africa	Near and Middle East ; North Africa
Sub-saharan Africa	West Africa ; ECS Africa
World	Rest of the world

Pour chacune des zones FAO sont détaillées les évolutions de rendements pour les 5 cultures principales de la région. Nous appliquons ces évolutions aux cultures Globagri-AE2050 selon les correspondances indiquées dans le tableau ci-dessous.

Correspondances cultures FAO (2018) – cultures GlobAgri-AE2050

Cultures FAO (2018)	Cultures GlobAgri-AE2050
All	Toutes cultures sauf celles spécifiées pour chaque région
Fruit/Vegetables	«Fruit and vegetables » l'évolution la plus pessimiste entre «Vegetables » et « Fruit » est retenue
Maize	Maize
Wheat	Wheat
Rice	Rice
Sugar cane	Sugar plants and products
Palm oil	Oilpalm fruit
Natural rubber	Other plant products
Cotton	Fibers etc.
Potatoes/Yams/Cassava	Roots and Tuber
Soybeans	Soyabeans

5.E. Niveaux de rendements 2050 retenus dans les scénarios de référence pour les principales cultures actuellement développées dans les 21 régions du monde (effets conjoints du changement climatique et des évolutions techniques)

Tableau 5.E.1 - Rendements des cinq cultures majoritaires[92] et des fourrages cultivés (t/ha) dans les différentes régions du monde en « 2010 » et en 2050 dans les scénarios de référence

	"2010"	2050	
		Selon FAO 2018 + effet du CC « tendanciel » sans valorisation de l'effet CO_2	Selon FAO 2012 ajustées + effet du CC « tendanciel » avec valorisation de l'effet CO_2
France			
Blé	6,7	7,8	8,1
Maïs	9,3	10,1	10,4
Autres céréales	5,9	7,0	7,1
Colza	3,5	4,1	5,6
Fruits et légumes	12,9	16,0	12,0
Prairies temporaires	6,6	7,3	7,5
Autres fourrages cultivés	8,5	9,3	9,6
Allemagne			
Blé	7,4	8,8	9,3
Maïs	9,7	10,5	13,3
Autres céréales	5,7	6,8	7,5
Colza	3,7	4,5	5,5
Plantes sucrières	68,7	82,6	120,2
Prairies temporaires	6,5	7,6	9,4
Autres fourrages cultivés	5,1	5,9	7,3
Royaume-Uni			
Blé	7,8	9,2	8,7
Autres céréales	5,7	6,8	6,7
Colza	3,6	4,3	4,6
Fruits et légumes	21,5	27,0	34,1
Légumineuses	3,0	3,5	3,9
Prairies temporaires	8,1	8,7	9,1
Autres fourrages cultivés	7,3	7,8	8,2
Pologne			
Blé	4,1	4,8	7,0
Autres céréales	3,0	3,5	4,4
Colza	2,5	3,0	4,7
Fruits et légumes	15,2	18,7	22,0
Racines et Tubercules	19,1	22,4	34,9
Prairies temporaires	1,6	1,8	2,0
Autres fourrages cultivés	5,0	5,7	6,2

[92] Pour chaque région, les cinq cultures dites « majoritaires » sont les cinq cultures occupant la plus grande part de la surface récoltée totale régionale (hors fourrages).

Tableau 5.E.1 - Suite

	"2010"	2050	
		Selon FAO 2018 + effet du CC « tendanciel » sans valorisation de l'effet CO_2	Selon FAO 2012 ajustées + effet du CC « tendanciel » avec valorisation de l'effet CO_2
Europe du Sud			
Blé	3,4	3,9	5,2
Maïs	8,6	9,8	12,4
Autres céréales	2,7	3,1	3,5
Autres oléagineux	2,7	3,1	3,6
Fruits et légumes	15,0	19,0	22,5
Prairies temporaires	4,1	4,8	5,2
Autres fourrages cultivés	6,0	6,9	7,5
Europe de l'Est			
Blé	3,4	3,9	5,8
Maïs	5,1	5,4	7,9
Autres céréales	2,8	3,3	4,7
Tournesol	1,9	2,3	2,7
Fruits et légumes	8,4	10,3	11,0
Prairies temporaires	1,3	1,4	1,7
Autres fourrages cultivés	2,7	3,1	3,6
Europe Centrale			
Blé	5,1	5,9	7,4
Maïs	8,7	9,3	9,7
Autres céréales	4,4	5,2	6,5
Colza	2,7	3,2	4,6
Fruits et légumes	15,2	18,8	20,8
Prairies temporaires	4,3	4,6	5,1
Autres fourrages cultivés	6,7	7,2	8,0
Reste de l'Europe			
Blé	5,6	6,7	7,5
Autres céréales	4,0	4,8	4,8
Colza	2,3	2,8	3,1
Fruits et légumes	30,5	40,3	39,4
Racines et Tubercules	36,4	44,1	49,9
Prairies temporaires	3,3	3,6	3,9
Autres fourrages cultivés	6,4	7,1	7,6
Canada-USA			
Blé	3,0	3,5	3,9
Maïs	9,7	10,2	13,7
Autres céréales	3,3	3,9	3,6
Colza	1,9	2,2	3,6
Soja	2,9	3,6	3,9
Prairies temporaires	2,9	3,1	4,0
Autres fourrages cultivés	4,4	4,7	6,2

Tableau 5.E.1 - Suite

	"2010"	2050	
		Selon FAO 2018 + effet du CC « tendanciel » sans valorisation de l'effet CO_2	Selon FAO 2012 ajustées + effet du CC « tendanciel » avec valorisation de l'effet CO_2
Brésil-Argentine			
Blé	3,0	3,8	3,8
Maïs	4,6	7,2	6,5
Soja	2,7	3,5	3,7
Plantes sucrières	78,3	93,0	114,3
Légumineuses	0,9	1,2	1,5
Prairies temporaires	4,0	5,8	5,3
Autres fourrages cultivés	4,8	6,9	6,3
Reste de l'Amérique			
Maïs	2,9	4,6	4,1
Autres céréales	3,0	3,8	3,5
Soja	2,2	2,9	3,0
Fruits et légumes	14,3	20,2	20,0
Autres cultures	0,7	0,9	1,1
Prairies temporaires	3,1	4,6	4,1
Autres fourrages cultivés	4,0	5,8	5,2
Ex-URSS			
Blé	2,1	2,9	3,5
Maïs	4,9	7,0	8,8
Autres céréales	2,0	2,8	3,3
Tournesol	1,3	2,0	2,0
Racines et Tubercules	14,6	20,3	24,0
Prairies temporaires	1,1	1,6	2,0
Autres fourrages cultivés	2,8	4,0	5,0
Chine			
Blé	4,8	6,0	6,1
Maïs	5,5	5,9	6,1
Riz	6,6	6,9	8,0
Fruits et légumes	19,0	26,2	30,8
Racines et Tubercules	17,8	24,9	25,3
Prairies temporaires	1,6	2,0	2,1
Autres fourrages cultivés	4,4	5,6	5,9
Inde			
Blé	2,9	4,7	5,2
Autres céréales	1,0	1,4	1,2
Riz	3,4	5,1	5,4
Fruits et légumes	12,8	17,1	21,5
Légumineuses	0,6	0,9	1,8
Prairies temporaires	2,4	3,5	3,8
Autres fourrages cultivés	1,8	2,6	2,9

Tableau 5.E.1 - Suite

	"2010"	2050	
		Selon FAO 2018 + effet du CC « tendanciel » sans valorisation de l'effet CO_2	Selon FAO 2012 ajustées + effet du CC « tendanciel » avec valorisation de l'effet CO_2
Reste de l'Asie			
Blé	2,5	3,9	4,3
Maïs	3,7	5,9	4,6
Riz	4,2	6,2	5,4
Fruits et légumes	12,2	16,5	18,9
Fibres	1,4	2,2	1,8
Prairies temporaires	5,7	8,4	7,5
Autres fourrages cultivés	5,6	8,2	7,3
Proche et Moyen Orient			
Blé	2,2	3,2	3,6
Autres céréales	2,0	2,7	3,2
Autres oléagineux	1,6	2,2	2,2
Fruits et légumes	16,8	23,1	22,8
Légumineuses	1,1	1,5	2,3
Prairies temporaires	6,0	7,9	11,5
Autres fourrages cultivés	3,6	4,9	7,0
Afrique du Nord			
Blé	2,7	3,7	4,8
Maïs	6,4	8,0	8,4
Autres céréales	1,6	2,1	3,3
Autres oléagineux	1,1	1,4	1,4
Fruits et légumes	17,5	23,4	27,1
Prairies temporaires	3,6	4,8	6,1
Autres fourrages cultivés	4,6	6,1	7,7
Afrique de l'Ouest			
Maïs	1,7	2,4	3,7
Autres céréales	0,8	1,1	1,5
Légumineuses	0,5	0,7	1,2
Racines et Tubercules	9,7	11,6	17,9
Autres cultures	0,6	0,8	1,0
Prairies temporaires	-	-	-
Autres fourrages cultivés	-	-	-
Afrique ECS			
Maïs	2,0	2,8	3,7
Autres céréales	0,9	1,2	1,6
Autres oléagineux	0,7	1,0	1,3
Légumineuses	0,8	1,1	1,9
Racines et Tubercules	8,6	10,4	16,1
Prairies temporaires	2,4	3,4	4,5
Autres fourrages cultivés	4,6	6,3	8,4

Tableau 5.E.1 - Fin

	"2010"	2050	
		Selon FAO 2018 + effet du CC « tendanciel » sans valorisation de l'effet CO_2	Selon FAO 2012 ajustées + effet du CC « tendanciel » avec valorisation de l'effet CO_2
Océanie			
Blé	1,8	2,3	2,3
Autres céréales	2,0	2,6	2,3
Colza	1,1	1,4	1,5
Fruits et légumes	15,1	23,0	18,9
Légumineuses	1,2	1,5	1,5
Prairies temporaires	2,9	3,9	3,6
Autres fourrages cultivés	3,7	5,1	4,7

Tableau 5.E.2 - Rendements des prairies permanentes (en t/ha) dans les différentes régions du monde en « 2010 » et en 2050 dans les scénarios de référence

Pour rappel, nous avons adopté une hypothèse très conservatrice d'absence d'évolutions techniques à l'horizon 2050 concernant les prairies permanentes : leurs rendements à cette échéance n'évoluent que sous le seul effet du CC.

	« 2010 »	2050	
		Effet du CC sans valorisation du CO_2	Effet du CC avec valorisation du CO_2
France	5,2	5,0	5,4
Allemagne	5,8	5,7	6,0
Royaume-Uni	3,0	3,0	3,2
Pologne	2,9	2,8	3,0
Europe du Sud	0,3	0,3	0,3
Europe de l'Est	0,6	0,6	0,6
Europe centrale	2,9	2,8	3,0
reste de l'Europe	5,4	5,3	5,6
Canada, USA	0,7	0,7	0,8
Brésil, Argentine	2,1	2,1	2,2
Reste de l'Amérique	0,9	0,9	1,0
Ex-URSS	0,2	0,2	0,2
Chine	0,6	0,6	0,7
Inde	2,2	2,1	2,3
Reste de l'Asie	1,0	1,0	1,1
P&M-Orient	0,2	0,2	0,2
Afrique du Nord	0,4	0,4	0,4
Afrique de l'Ouest	0,5	0,5	0,5
Afrique ECS	0,6	0,6	0,7
Océanie	0,4	0,4	0,4

Tableau 5.E.3 – Surfaces récoltés par culture (1000 ha) dans les différentes régions du monde en « 2010 »

1000 ha	Blé	Maïs	Riz	Autres céréales	Soja	Colza	Tournesol	Fruit du palmier à huile	Autres cultures oléagineuses	Fruits et légumes	Légumineuses (hors soja)	Racines et tubercules	Fibres etc.	Cultures sucrières	Autres cultures	**Total (hors fourrages)**
France	5 635	1 619	22	2 328	45	1 507	719		93	1 152	313	158	65	383	28	**14 069**
Allemagne	3 257	472		2 939	1	1 427	25		10	288	95	259	3	383	5	**9 165**
Royaume-Uni	1 894			1 160		639			36	145	238	143	11	115		**4 381**
Pologne	2 337	302		5 390	0	862	3		25	586	149	466	17	203	28	**10 369**
Europe du Sud	4 816	2 204	431	4 732	214	79	1 028		4 953	5 187	571	303	405	148	941	**26 012**
Europe de l'Est	4 814	5 064	25	1 691	258	918	2 273		55	1 509	127	365	43	96	135	**17 374**
Europe centrale	1 600	496		1 113	56	633	141		87	229	67	72	1	137	8	**4 640**
Reste de l'Europe	2 846	99		3 635		832			36	356	101	434	14	246	2	**8 602**
Canada, USA	28 148	34 222	1 259	7 628	32 056	7 579	756		1 105	2 493	3 663	610	3 909	840	550	**124 818**
Brésil, Argentine	6 331	16 186	3 005	2 863	40 904	67	1 760	106	977	3 566	4 125	2 074	2 442	9 403	3 906	**97 713**
Reste de l'Amérique	2 410	12 483	2 881	3 445	4 759	83	453	743	1 026	6 716	3 292	2 170	722	2 833	4 724	**48 741**
Ex-URSS	48 896	4 520	433	22 234	1 991	2 325	11 461		796	3 754	1 856	4 475	2 444	1 558	146	**106 888**
Chine	24 274	32 427	30 103	3 240	8 532	7 356	961	48	6 136	35 400	2 765	9 146	7 055	1 922	2 524	**171 890**
Inde	28 426	8 532	42 930	19 403	9 823	6 128	1 046		11 499	13 489	25 384	2 206	13 354	4 511	4 835	**191 566**
Reste de l'Asie	13 183	12 545	68 843	2 401	1 785	816	1 092	10 524	12 020	12 223	7 536	5 486	12 096	3 633	7 826	**172 007**
P&M-Orient	17 989	1 070	698	7 693	98	200	708		1 874	5 827	2 158	439	934	495	1 485	**41 667**
Afrique du Nord	6 872	1 163	549	4 158	12	19	70		3 273	3 061	702	382	188	326	564	**21 339**
Afrique de l'Ouest	97	8 976	6 015	27 665	591			4 235	8 044	6 284	10 462	13 263	2 301	140	8 921	**96 993**
Afrique ECS	2 864	21 722	3 518	24 194	819	69	1 603	348	10 784	8 515	11 152	12 379	2 894	1 225	3 969	**106 057**
Océanie	13 653	86	39	6 013	30	1 830	39	145	627	751	1 846	324	342	423	274	**26 422**
Reste du monde	326	419		135	53	45	250			269	30	29	4	24	5	**1 588**
Total	220 669	164 608	160 752	154 063	102 029	33 412	24 385	16 150	63 457	111 801	76 633	55 182	49 243	29 045	40 876	1 302 304

Tableau 5.E.4 – Surfaces récoltées en cultures, fourrages cultivés et surfaces en prairies permanentes (1000 ha) en « 2010 »

1000 ha	Total cultures (hors fourrages)	Cultures fourragères	Prairies temporaires	Prairies permanentes
France	14 069	1 238	708	9 649
Allemagne	9 165	1 916	669	4 680
Royaume-Uni	4 381	187	753	11 166
Pologne	10 369	713	438	3 234
Europe du Sud	26 012	1 196	630	24 130
Europe de l'Est	17 374	601	205	7 726
Europe centrale	4 640	271	467	3 949
Reste de l'Europe	8 602	916	2 757	7 170
Canada, USA	124 818	11 748	12 857	264 751
Brésil, Argentine	97 713	1 780	1 157	304 500
Reste de l'Amérique	48 741	6 299	3 517	253 647
Ex-URSS	106 888	5 175	19 621	362 890
Chine	171 890	3 335	40	392 833
Inde	191 566	29 644	4	10 328
Reste de l'Asie	172 007	2 158	922	167 663
P&M-Orient	41 667	1 138	68	243 213
Afrique du Nord	21 339	624	99	58 818
Afrique de l'Ouest	96 993			144 540
Afrique ECS	106 057	420	1 836	550 759
Océanie	26 422	1 099	2 132	371 179
Reste du monde	1 588	40	122	2 104
Total	**1 302 304**	**70 498**	**49 003**	**3 198 930**

Chapitre 6. Les efficiences animales : méthode d'estimation à « 2010 » et projections à l'horizon 2050

Dans le domaine animal, le modèle GlobAgri-AE2050 distingue sept secteurs de production, soit (i) le lait[93], (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[94] :

$$A_{iat} = b_{iat} . Q_{at} \quad (1)$$

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 la Section 6.1 nous présentons la méthode retenue pour calibrer les coefficients de l'année de base « 2010 » pour les monogastriques (porcs, volailles de chair, œufs) et les gros ruminants (bovins lait, bovins viande)[95]. Dans la Section 6.2, nous expliquons comment ces coefficients ont été projetés à l'horizon 2050.

[93] 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.

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

[95] 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 *et al.* (2018), utilise les recherches de Bouwman et al. (2005), Monfreda *et al.* (2008) et Herrero *et al.* (2013).

6.1. 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.

6.1.1. Coefficients globaux des efficiences animales

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 : données de l'IFIP pour les porcs (IFIP, 2018), données de l'ITAVI pour les volailles de chair et les œufs (ITAVI, 2017a et 2017b). Les coefficients globaux des autres régions européennes ont ensuite été déterminés partant des 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 le cas des porcs ont notamment été mobilisées des informations issues du Danish Agriculture and Food Council (2018) ; dans le cas des volailles de chair et des œufs, deux rapports sur la compétitivité de ces secteurs en Europe (van Horne, 2017 ; van Horne et Bondt, 2017) ont été utilisés pour établir une hiérarchie entre les différentes régions européennes. Pour 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*)[96].

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[97]. Nous avons ensuite calculé les coefficients globaux des efficiences animales du « système » supposé unique d'élevage de bovins lait-viande en

[96] Une partie importante de l'alimentation des monogastriques (et une partie plus faible de l'alimentation des ruminants) est couverte par des aliments composés. Les aliments composés pour animaux sont des mélanges alimentaires produits à partir de matières premières et additifs divers (minéraux, vitamines, etc.) élaborés en fonction des besoins spécifiques de l'animal. Ils sont fabriqués par des industriels professionnels sous forme de granulés, de poudres, de miettes, etc. Les matières premières concentrées peuvent donc être consommées sous forme d'aliments composés achetés par les éleveurs (incorporés dans des aliments composés) ou sous une forme directe (fabrication à la ferme). La particularité des aliments composés est de faire l'objet d'un suivi statistique assez précis dans de nombreux pays du monde (notamment par la Fédération Européenne des Fabricants d'Aliments composés (FEFAC) pour l'Europe, et par l'International Feed Industry Association (IFIF) et la société Alltech pour l'ensemble du monde) avec des décompositions plus ou moins précises sur la répartition des tonnages par catégories animales (porcs, volailles de chair, volailles de ponte, vaches laitières, autres bovins, etc.). Les échanges entre pays d'aliments composés sont généralement faibles (hors flux frontaliers, par exemple entre la France et la Belgique) ; on peut donc considérer que la consommation d'aliments composés dans chaque zone est très proche de la production de la zone. L'autre partie – hors fourrages pour les ruminants - est couverte par un mélange de matières premières concentrées consommées sur le lieu de l'élevage, généralement produite à ce niveau (alimentation à la ferme). Dans certaines zones, les animaux peuvent aussi consommer des « déchets » (élevage « backyard »). Les tonnages correspondants, dans chaque pays ou groupe de pays du modèle. ont été calculés en utilisant un modèle mondial de formulation d'aliments (*cf.* Encadré 6-2).

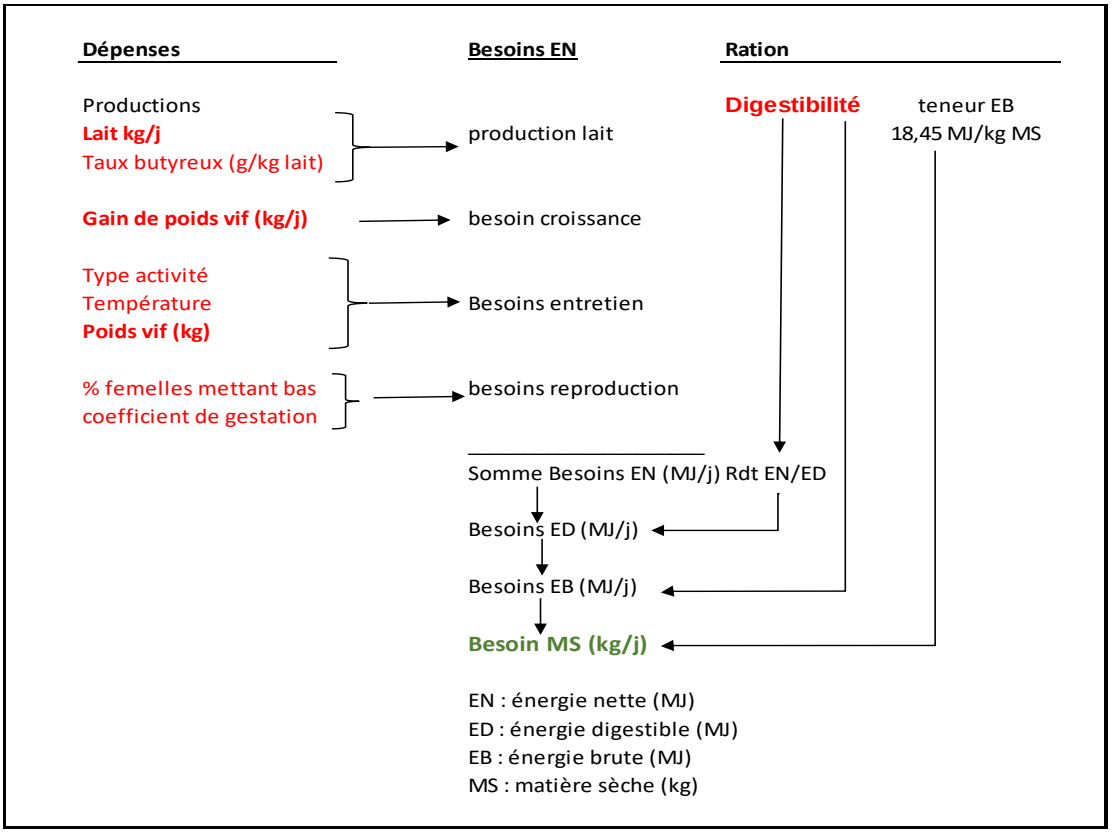
[97] La viande des vaches laitière de réforme est donc considérée comme étant « fabriquée » par celles-ci quand elles sont au stade de génisses. Les besoins en aliments nécessaires pour « fabriquer » la viande des vaches laitières de réforme sont donc pris en compte par les génisses, soit les femelles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

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 6-1). 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.

Encadré 6-1. 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 6-1. 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[98], 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.

L'annexe 6.A détaille le modèle démographique, et l'Annexe 6.B propose une validation de la méthodologie TIER2 et du modèle démographique dans les deux cas de l'Allemagne et de la France.

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[99], 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)[100]. 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). L'Annexe 6.1 présente les digestibilités moyenne des rations des gros ruminants, en "2010" et en 2050, dans les différentes régions du monde, alors que l'Annexe 6.D présente les digestibilités des différents aliments consommés par les gros ruminants.

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

[99] Ces pertes peuvent être importantes (Agabriel et Veysset, 2015).

[100] À 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

6.1.2. 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[101]. 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[102].

Les monogastriques ne consomment que des matières premières concentrées, sous formes d'aliments directs et d'aliments composés[103]. 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 l'Encadré 6-2. 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[104]. 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)[105].

[101] Dit autrement, une forme simplifiée de l'équation (1), soit $A_{a2010} = b_{a2010} . Q_{a2010}$, 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.

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

[103] 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.).

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

[105] Nous avons supposé 20 % de pertes imputées aux rendements des prairies temporaires et des autres fourrages cultivés par rapport à la répartition de Monfreda *et al.* (2008) et de Herrero *et al.* (2013).

Encadré 6-2. Le modèle mondial de formulation des rations alimentaires des animaux

Le modèle mondial de formulation des rations alimentaires des animaux repose sur l'hypothèse générale que l'ensemble de l'alimentation de chaque catégorie animale (porcs, volailles, etc.) est « rationnelle » et donc, sur des règles de choix des matières premières concentrées similaires à celles utilisées dans l'industrie des aliments composés.

De façon générale, dans chaque région, le modèle détermine les compositions des rations de sorte à minimiser leur coût sous un jeu de contraintes. Dans le cas des zones européennes, les coefficients globaux des efficiences animales sont ceux calculés selon la méthode décrite dans le texte. Dans le cas des zones non européennes, les coefficients globaux des efficiences animales ont été définis pour couvrir au minimum les quantités d'aliments composés utilisées par région dans chaque secteur de production animale tout en respectant les mêmes contraintes que celles fixées pour les zones européennes.

Les premières contraintes sont des contraintes nutritionnelles propres à chaque espèce animale, et au sein de chaque espèce, aux sous-espèces distinguées correspondant dans les faits à des catégories d'animaux. Dans le cas du porc, sont ainsi distingués le porcelet deuxième âge, le porc en croissance, le porc en finition, la truie gestante et la truie allaitante. Dans le cas de la volaille de chair, sont distingués le poulet de chair, la dinde et les autres volailles (canard, pintade, pigeon, etc.). Ce premier jeu de contraintes reflète les besoins totaux de concentrés par chaque catégorie ou sous-catégorie d'animaux. Elles ont été élaborées à partir des contraintes traditionnellement utilisées en France, à dire d'experts de la nutrition animale de l'INRA, de l'IFIP et de l'ITAVI. Des ajustements ont été réalisés dans certaines régions en fonction d'informations disponibles et/ou d'hypothèses à dire d'experts. Au titre de ces ajustements ont été également pris en compte les spécificités des disponibilités globales en certaines matières premières comme, par exemple, les tourteaux. Lorsque ces disponibilités étaient insuffisantes (par exemple pour les tourteaux) pour permettre le respect des « normes » en vigueur en France, on a considéré que les rations locales étaient moins concentrées en protéines et énergie qu'en France.

Les deuxièmes contraintes correspondent à des taux maxima ou minima d'incorporation de certaines matières premières. Pour des raisons réglementaires (cas, par exemple, de la farine de viande) ou nutritionnelles (cas, par exemple, du colza chez les poules pondeuses), les taux d'incorporation de certaines matières premières peuvent être limités, voire imposés à zéro. A l'inverse, pour des raisons technologiques (cas, par exemple, des huiles végétales) ou d'appétence (cas, par exemple, de la mélasse), des taux minima de certaines matières premières peuvent être imposés.

Les troisièmes contraintes dites « d'équilibre » imposent que la somme des tonnages de toutes les matières premières incorporées dans un type d'aliment soit égale au tonnage d'aliment utilisé par chaque sous-catégorie animale (par exemple, porcelet ou truie gestante). Ce tonnage d'aliment pour chaque sous-catégorie est calculé à partir des besoins estimé pour la catégorie correspondante (porc) en appliquant des coefficients techniques pour la désagrégation et/ou en utilisant les statistiques détaillées d'aliments composés lorsqu'elles sont disponibles (essentiellement pour les régions européennes).

Enfin, les contraintes de disponibilités imposent que la somme des quantités de chaque matière première utilisée pour l'alimentation de chaque catégorie d'animaux qui font l'objet de la formulation (porcs, volailles de chair, volailles de ponte, vaches laitières et bovins viande) soit inférieure ou égale aux données des bilans ressources-emplois du modèle GloBAgri-AE2050 après soustraction de ce qui va à l'aquaculture. Les tonnages disponibles de chaque matière première non utilisés par les différentes catégories d'animaux pris en compte dans le modèle de formulation sont affectés à la catégorie « autres animaux ». Cette catégorie résiduelle regroupe les ovins, les caprins et les autres animaux (chevaux, chiens, chats, etc.) supposés représenter, dans chaque région, très peu de tonnages de matières premières.

Sont présentées ci-après les équations du modèle de formulation, ainsi que les hypothèses adoptées pour sa mise en œuvre concrète. Celle-ci a nécessité des adaptations pour faire coïncider la nomenclature des aliments du bétail du modèle de formulation et du modèle GlobaAgri-AE2050, ainsi que des hypothèses et ajustements pour faire face à des problèmes de disponibilités de matières premières insuffisantes dans deux zones du monde, la Chine et la région Argentine-Brésil.

Les équations du modèle de formulation

Dans chaque zone géographique, la fonction économique à minimiser est le coût de la somme des rations, soit :

$$COUT = \sum_{Z,AN2,MP} Q_P(Z, AN2, MP) * PRIX_P(Z, AN2, MP) \qquad (1)$$

Avec :

Z = zones du modèle Globagri-AE2050 ;

AN = catégories animales distinguées (porc, volaille de chair, volaille de ponte, lait, bœuf, autres) ;

AN1 = catégories animales pour lesquelles on effectue la formulation (porc, volaille de chair, volaille de ponte, lait, bœuf) ;

AN2 = sous-catégories animales (porcelets, porcs en croissance, porcs en finition, truies gestantes, truies allaitantes, poulets de chair en croissance, poulets de chair en finition, dindes en croissance, dindes en finition, dindes terminales, canards standard, vaches laitières et bovins viande en croissance (16 formules) ;

MP = matières premières (MP) concentrées indiquées comme étant utilisées pour l'alimentation des animaux dans la base FAO (80 au total) ; plus le corn-gluten-feed, les dreches de brasserie et les pulpes de betterave (3 MP) ; plus la lysine industrielle, la méthionine industrielle, la thréonine industrielle, le tryptophane industriel, le phosphate bicalcique, le carbonate de chaux, phosphate monocalcique, l'urée et les premix[106] (9 MP) ;

Q_P = tonnages exprimés en milliers de tonnes de matière sèche (MS) des utilisations de chaque MP par chaque catégorie d'aliment c'est-à-dire dans chacune des 16 formules,

PRIX_P = prix de formulation de chaque MP. La base est la moyenne des prix des matières premières en France pour l'année 2010 (en euros € par tonne de MS).

Cette fonction de coût (1) est minimisée sous un ensemble de contraintes décrites ci-après.

[C1] - Contraintes nutritionnelles propres à chaque espèce animale (et sous-espèce animale)

$$SIGMA\,(MP)\ COMP_P\,(Z, MP, NUT) * Q_P\,(Z, AN2, MP) > BES\,(Z, AN2) * CONTMIN_P\,(Z, AN2, NUT) \quad (2a)$$

$$SIGMA\,(MP)\ COMP_P\,(Z, MP, NUT) * Q_P\,(Z, AN2, MP) < BES\,(Z, AN2) * CONTMAX_P\,(Z, AN2, NUT) \quad (2b)$$

Avec :

NUT = liste des nutriments pris en compte[107] (protéine, énergie porc, énergie volaille, UFL, UFV, PDIE, PDIN, acides aminés disponibles porcs ou volailles, cellulose, minéraux, etc.) ;

BES = besoins totaux en concentrés (en milliers de tonnes de MS) pour chaque sous-catégorie animale AN2 ;

COMP_P = teneur des différents nutriments en pourcentage contenu dans un kilo de chaque MP (exprimée en MS)

CONTMIN_P = teneur minimale en chaque nutriment (en pourcentage) de chaque type d'aliment exprimé en MS

CONTMAX_P = teneur maximale en chaque nutriment (en pourcentage) de chaque type d'aliment exprimé en MS

[C2] - Contraintes d'incorporation de certaines MP

Pour des raisons réglementaires, nutritionnelles, technologiques ou d'appétence, des taux minima ou maxima de certaines MP peuvent être imposés en utilisant les équations suivantes :

$$Q_P\,(Z, AN2, MP) > BES\,(Z, AN2) * MATMIN_P\,(MP, AN2) \quad (3a)$$

$$Q_P\,(Z, AN2, MP) < BES\,(Z, AN2) * MATMAX_P\,(MP, AN2) \quad (3b)$$

Avec :

MATMIN_P et MATMAX_P, pourcentages minima et maxima, respectivement, d'incorporation d'une MP donnée pour la zone Z dans l'aliment AN2/

[3] - Contrainte d'équilibre des tonnages

$$SIGMA\,(MP)\ Q_P\,(Z, AN2, MP) = BES\,(Z, AN2) \quad (4)$$

[C4] - Contraintes de disponibilités en MP

$$SIGMA\,(AN2)\ Q_P\,(Z, AN2, MP) < DISPO\,(Z, MP) \quad (5)$$

Adaptation des données du modèles Globagri-AE2050 au modèle de formulation

Le fonctionnement du modèle de formulation présenté ci-dessus requiert de disposer des disponibilités des différentes matières premières pour toutes les zones selon une nomenclature – celle de la FAO – qui n'est pas celle du modèle GlobAgri-AE2050. A cette

[106] « Noyau » utilisé dans les aliments comportant en particulier des vitamines et des additifs technologiques

[107] Les paramètres pris en compte pour exprimer les besoins des animaux diffèrent selon les espèces animales. Ceci concerne en particulier les expressions pour l'énergie : Energie métabolisable pour les volailles, énergie digestible pour les porcs, Unité fourragère lait (UFL) pour les bovins lait, Unité fourragère viande (UFV) pour la viande bovine. De même pour l'azote, les contraintes s'expriment en protéine totale, mais surtout en acides aminés disponibles avec des coefficients différents pour les porcs et les volailles.

fin, il faut décomposer les catégories d'aliments du bétail du modèle GlobAgri-AE2050 (catégories qui sont composées de plus d'un produit et utilisées en aliments de bétail[108]) en aliments dits individuels et nommés ci-après « produits FAO » .

Pour ce faire, nous utilisons les bilans FAOStat (*Commodity Balances*, moyenne 2009/2010/2011) par pays. Nous retenons dans ces bilans les utilisations des divers produits FAO pour l'alimentation du bétail. Sur cette base, nous recalculons de nouvelles valeurs des agrégats. Nous avons donc les parts de chaque produit FAO dans ces nouvelles valeurs d'agrégats, parts qu'*in fine* nous allons conserver et appliquer aux données du modèle GlobAgri-AE2050 pour la décomposition en produits FAO.

Nous ne pouvons en effet pas utiliser directement les données des produits FAO des bilans FAOStat dans le modèle de formulation car celles-ci peuvent différer des données du modèle GlobAgri-AE2050 qui ont pu subir des transformations au niveau des usages. Ces transformations concernent l'intégration de certains coproduits dans les utilisations de leur produit « parent ». C'est le cas, en particulier, de certaines céréales et de l'agrégat « plantes et produits sucriers » qui intègrent des coproduits du côté des usages en alimentation animale : les sons pour les céréales, les mélasses pour les plantes et produits sucriers. Ainsi, pour décomposer les céréales (le blé pour les sous-régions européennes ; le blé, le maïs et le riz dans les autres régions) en produits FAO, nous avons conservé les quantités de sons telles qu'indiquées dans les bilans de la FAO dans le modèle de formulation et ajusté les quantités des céréales (le blé pour les sous-régions européennes; le blé, le maïs et le riz dans les autres régions) pour que la somme de sons et de céréales en produits FAO soit égale aux quantités de ces céréales de la base de données du modèle GlobAgri-AE2050. Nous avons procédé de la même manière pour déduire les mélasses de l'agrégat plantes et produits sucriers. C'est la nécessité d'une cohérence entre les données du modèle GlobAgri-AE2050 et les sorties du modèle de formulation qui requiert ces ajustements.

En outre, le modèle de formulation nécessité des données relatives aux huiles végétales utilisées en alimentation animale dans les différentes zones du monde. Dans les bilans FAOStat (*Commodity Balances*, moyenne 2009/2010/2011), les quantités d'huiles végétales utilisées en alimentation du bétail sont égales à zéro dans la plupart des zones. Des quantités relativement faibles d'huile de palme[109]ont alors été ajoutées au titre des disponibilités. Dans chaque zone, ces ajouts ont été réalisés pour correspondre au maximum aux variations de stock des bilans FAOSTAT (ces deux postes finissent donc par se compenser dans la plupart de zones).

Le modèle de formulation intègre aussi un certain nombre d'aliments qui ne sont pas des produits FAO : pulpes de betteraves, corn gluten feed et drèches de biocarburants, acides aminés, minéraux. Les quantités de ces produits ont été calculées en amont à partir de diverses sources et sont préservées ainsi dans le modèle de formulation.

Pour plus de simplicité et parce que les rations des secteurs aquacole et des petits ruminants ne sont pas formulées par le modèle (elles restent identiques à celles des versions antérieures du modèle de GlobAgri), les utilisations de concentrés par ces deux secteurs ont été déduites des bilans du modèle GloBAgri-AE2050 en amont ; elles n'entrent donc pas dans les disponibilités utilisées par le modèle de formulation.

Adaptations finales du modèle de formulation

Dans le modèle de formulation, nous avons rencontré des problèmes de disponibilités de matières premières pour quatre zones du modèle, soit la Chine, l'Argentine-Brésil, le reste de l'Amérique et l'Océanie. Dans ces quatre zones, nous avons donc supposé qu'une partie des besoins alimentaires des animaux était couverte par des aliments non représentés dans la liste des aliments concentrés, soit par des déchets occasionnels.

En Chine, nous avons ainsi supposé que 55% des porcs, 35% des volailles de chair et 40% des poules pondeuses étaient élevées « backyard » et donc, nourris avec ce type d'aliments. Les parts du « backyard » sont de 8% pour les porcs, 10% pour les volailles et 6% pour les poules pondeuses en Argentine-Brésil ; de 8% pour les porcs, 5% pour les volailles et 5% les poules pondeuses dans le Reste de l'Amérique ; de 10% pour les porcs, les volailles et les poules pondeuses en Océanie.

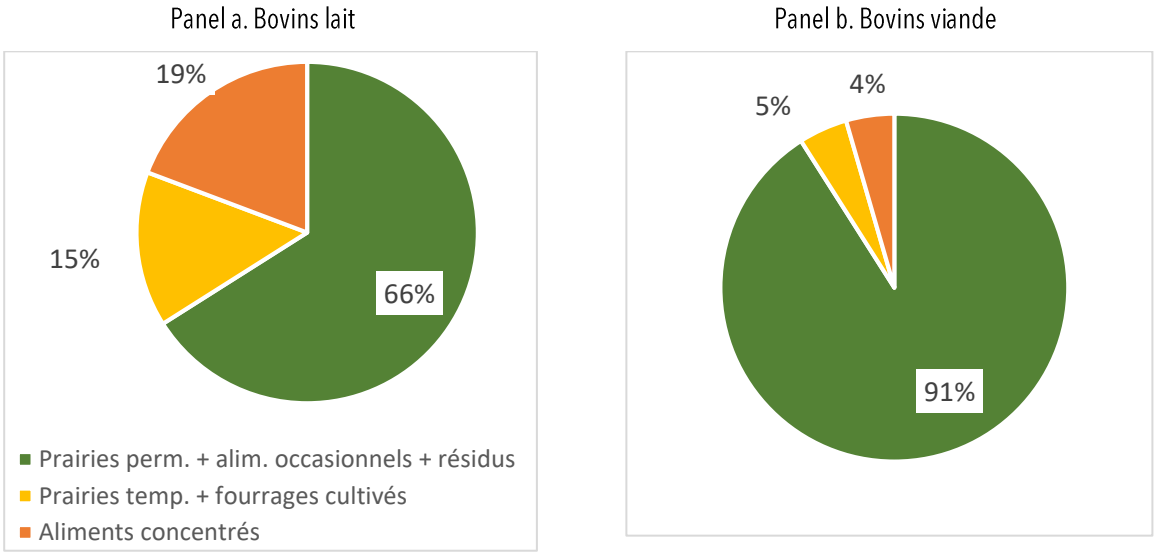
Le modèle de formulation ayant ainsi réparti les disponibilités du modèle GlobAgri-AE2050 décomposés en produits FAO et hors FAO par secteur animal, nous regroupons enfin les produits FAO, par secteur animal, en produits GlobAgri-AE2050 selon la même méthode que celle utilisée pour la décomposition des produits du modèle GlobAgri-AE2050 en produits FAO. Nous disposons donc désormais des rations par secteur animal décomposées en produits détaillés selon la nomenclature du modèle GlobAgri-AE2050.

[108] Il s'agit des "catégories" suivantes du modèle GlobAgri-AE2050 : Fruits and Vegetables, Other plant products, Other products, Pulses, Roots and tubers, Other cereals, Sugar plants and products, Other oilcrops, Cake other oilcrops, Oil other oilcrops, Dairy.

[109] Toujours inférieures à 15% des utilisations domestiques totales.

La Figure 6-2 présente les compositions des rations alimentaires des bovins lait et des bovins viande ainsi déterminées pour l'année de référence « 2010 » à l'échelle agrégée de l'ensemble du monde. Dans les deux cas, la ration est majoritairement composée de fourrages non cultivés (herbe des prairies permanentes) ou non spécifiquement cultivés pour l'alimentation des animaux (aliments occasionnels et résidus des cultures), et ceci de façon bien plus importante pour les bovins viande (91 %) que pour les bovins lait (66 %). Chez ces derniers, les matières premières concentrées (19 %) et les fourrages cultivés (14 %) composent le tiers de la ration, alors que le pourcentage cumulé équivalent n'est que de 9 % chez les bovins viande. À noter que les bovins viande utilisent presque trois fois plus d'aliments en équivalent matière sèche (MS) que les bovins laitiers. Ainsi, en « 2010 », le secteur bovins viande a consommé 3,5 milliards de tonnes d'aliments en équivalents MS tandis que le secteur laitier n'en a utilisé « que » 1,3 milliard de tonnes (*cf.* Tableau de l'Annexe 6.M).

Figure 6-2. Répartition des rations alimentaires en « 2010 » des gros ruminants, panel (a) pour les bovins lait et panel (b) pour les bovins viande, selon trois agrégats : (i) prairies permanentes, occasionnels et résidus, (ii) prairies temporaires et autres fourrages cultivés et (iii) aliments concentrés



Les coefficients des efficiences animales de l'année « 2010 » calculés selon la méthodologie décrite ci-dessus pour « 2010 » pour chaque secteur d'élevage du modèle GlobAgri-AE2050, ainsi que la répartition des rations entre différentes matières premières, sont détaillés dans les Annexes 6.E à 6.K pour, respectivement, les porcs, les volailles de chair, les œufs, les bovins lait, les bovins viande, les petits ruminants et enfin l'aquaculture.

6.2. 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.* Chapitre 2, 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. Comme pour les végétaux, 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, ou à augmenter le coefficient spécifique associé à tel ingrédient et à diminuer simultanément 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.

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[110].

6.3.1. Projections des coefficients d'efficience animale des secteurs monogastriques à 2050

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* [111] entre « 2010 » et 2050 peut alors s'écrire, pour une production animale donnée (soit les porcs, les volailles de chair et les poules pondeuses) :

$$\frac{Q_{2050}}{E_{2050}} = \frac{Q_{2010}}{E_{2010}}.(1+y) \quad (2)$$

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 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[112]. En effet, on a alors :

$$\frac{A_{2050}}{Q_{2050}} = b_{2050} = b_{2010}.(1-y) = \frac{A_{2010}}{Q_{2010}}.(1-y) \quad (3)$$

ou, de façon équivalente, en utilisant l'équation (2),

$$\frac{A_{2050}}{Q_{2050}}.\frac{Q_{2050}}{E_{2050}} = \left[\frac{A_{2010}}{Q_{2010}}.(1-y)\right].\left[\frac{Q_{2010}}{E_{2010}}.(1+y)\right] \quad (4)$$

ou encore, toujours de façon équivalente[113],

$$\frac{A_{2050}}{E_{2050}} = \frac{A_{2010}}{E_{2010}} \quad (5)$$

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

[111] 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.

[112] 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.

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

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 (4) 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 des secteurs de monogastriques ainsi projetés en 2050 sont présentés sur la Figure 6-3 dans les différentes régions du monde pour, respectivement, les porcs (a), les volailles de chair (b) et les œufs (c)[114], ainsi que dans le Tableau 6-1. Sur la Figure 6-3, 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.

[114] 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 : pour plus de détails, voir Encadré 6.2.

Figure 6-3. 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.

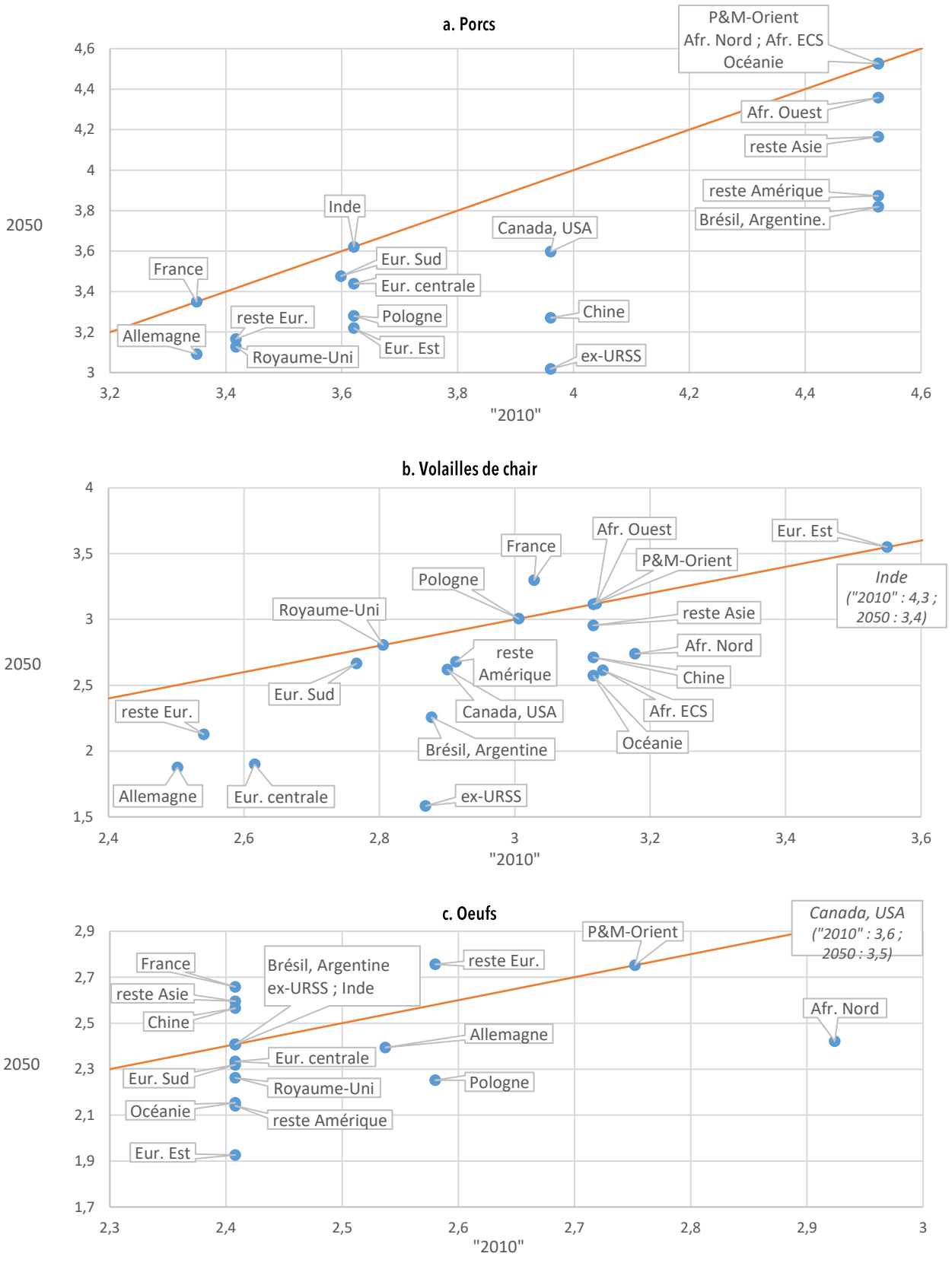


Tableau 6-1. Coefficients des efficiences animales des monogastriques (porcs, volailles de chair, œufs) en « 2010 » et en 2050 dans les différentes régions du modèle GlobAgri-AE2050

	Porcs			Volailles de chair			Oeufs		
	Coef. d'efficience animale "2010" (Kg MS/kg EC)	Coef. d'efficience animale 2050 (Kg MS/kg EC)	Variation (%)	Coef. efficience animale "2010" (Kg MS/kg EC)	Coef. efficience animale 2050 (Kg MS/kg EC)	Variation (%)	Coef. d'efficience animale "2010" (Kg MS/kg d'oeufs)	Coef. d'efficience animale 2050 (Kg MS/kg d'oeufs)	Variation (%)
Régions européennes									
France	3,35	3,35	0%	3,03	3,30	9%	2,41	2,66	10%
Allemagne	3,35	3,09	-8%	2,50	1,88	-25%	2,54	2,39	-6%
Royaume-Uni	3,42	3,13	-8%	2,81	2,81	0%	2,41	2,26	-6%
Pologne	3,62	3,28	-9%	3,01	3,01	0%	2,58	2,25	-13%
Europe Sud	3,60	3,48	-3%	2,77	2,67	-4%	2,41	2,32	-4%
Europe Est	3,62	3,22	-11%	3,55	3,55	0%	2,41	1,93	-20%
Europe Centrale	3,62	3,44	-5%	2,62	1,90	-27%	2,41	2,33	-3%
Reste de l'Europe	3,42	3,17	-7%	2,54	2,13	-16%	2,58	2,76	7%
Régions non européennes									
Canada-USA	3,96	3,60	-9%	2,90	2,62	-10%	3,61	3,47	-4%
Brésil-Argentine	4,53	3,82	-16%	2,88	2,26	-22%	2,41	2,41	0%
Reste de l'Amérique	4,53	3,87	-14%	2,91	2,68	-8%	2,41	2,14	-11%
Ex-URSS	3,96	3,02	-24%	2,87	1,58	-45%	2,41	2,41	0%
Chine	3,96	3,27	-17%	3,12	2,71	-13%	2,41	2,56	7%
Inde	3,62	3,62	0%	4,34	3,35	-23%	2,41	2,41	0%
Reste de l'Asie	4,53	4,16	-8%	3,12	2,95	-5%	2,41	2,60	8%
Proche & Moyen Orient	4,53	4,53	0%	3,12	3,12	0%	2,75	2,75	0%
Afrique Nord	4,53	4,53	0%	3,18	2,74	-14%	2,92	2,42	-17%
Afrique Ouest	4,53	4,36	-4%	3,12	3,12	0%	2,41	2,41	0%
Afrique ECS	4,53	4,53	0%	3,13	2,61	-16%	2,41	2,41	0%
Océanie	4,53	4,53	0%	3,12	2,57	-17%	2,41	2,15	-11%
Reste du monde	4,53	3,16	-30%	3,12	3,12	0%	2,41	2,41	0%

6.3.2. Projections des coefficients des efficiences animales en 2050 dans les secteurs des bovins lait et des bovins viande

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[115]. 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.

Le même calcul que celui utilisé en « 2010 » à partir de la méthode TIER2 du GIEC est reproduit pour 2050. Il est cependant nécessaire de recalculer les effectifs de chaque catégorie de bovin pour réaliser les productions de lait et de viande compte tenu des évolutions de productivité de chaque région. Il est également nécessaire d'utiliser la digestibilité des rations prédite pour 2050. Le nombre de vaches laitières (VL) est calculé comme le rapport entre la production de la région (T/an) et la productivité des vaches laitières attendue en 2050 (T lait/vache/an). De même, le nombre total de bovins en 2050 est estimé comme le rapport entre la production de viande attendue en 2050 pour la région considérée (TEC/an) et la productivité en TEC des bovins présents en 2050. Pour utiliser le modèle de calcul des consommations, il faut ventiler cet effectif total entre les différentes catégories animales. À cette fin, nous faisons l'hypothèse que les proportions des bovins de chaque catégorie i dans le modèle TIER2 sont conservées. Ceci revient à utiliser l'équation suivante pour chaque catégorie :

$$Nb_bovin_cati_2050 = Nb_bov_cati_2010 * (VA+VL)_2050 / (VA+VL)_2010 \quad (6)$$

Une optimisation permet ensuite de calculer le nombre de vaches allaitantes (VA) nécessaires pour obtenir l'effectif total de bovins en 2050 et ensuite les effectifs de chaque catégorie animale nécessaires pour calculer les consommations totales de chaque ingrédient des rations. Pour que la production de viande du modèle corresponde à la production attendue en 2050, une dernière optimisation permet d'ajuster, si nécessaire le coefficient de gain de poids vif de chaque catégorie.

Dans le secteur laitier, la forte augmentation de la productivité des vaches laitières 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. La pente de la droite de régression entre la productivité des vaches laitières en tonnes de lait/vache/an (axe des abscisses de la Figure 6-4) et la proportion de fourrages de bonne qualité (prairies temporaires et fourrages cultivés) dans la totalité des fourrages utilisés (axe des ordonnées de la Figure 6-4) a été utilisée pour moduler la composition des rations des vaches laitières en 2050 en fonction des évolutions des productivités des vaches laitières entre « 2010 » et 2050, ceci dans chaque région du monde (*cf.* Figure 6-4). L'ajustement a été réalisé sur la base de l'équation suivante[116] :

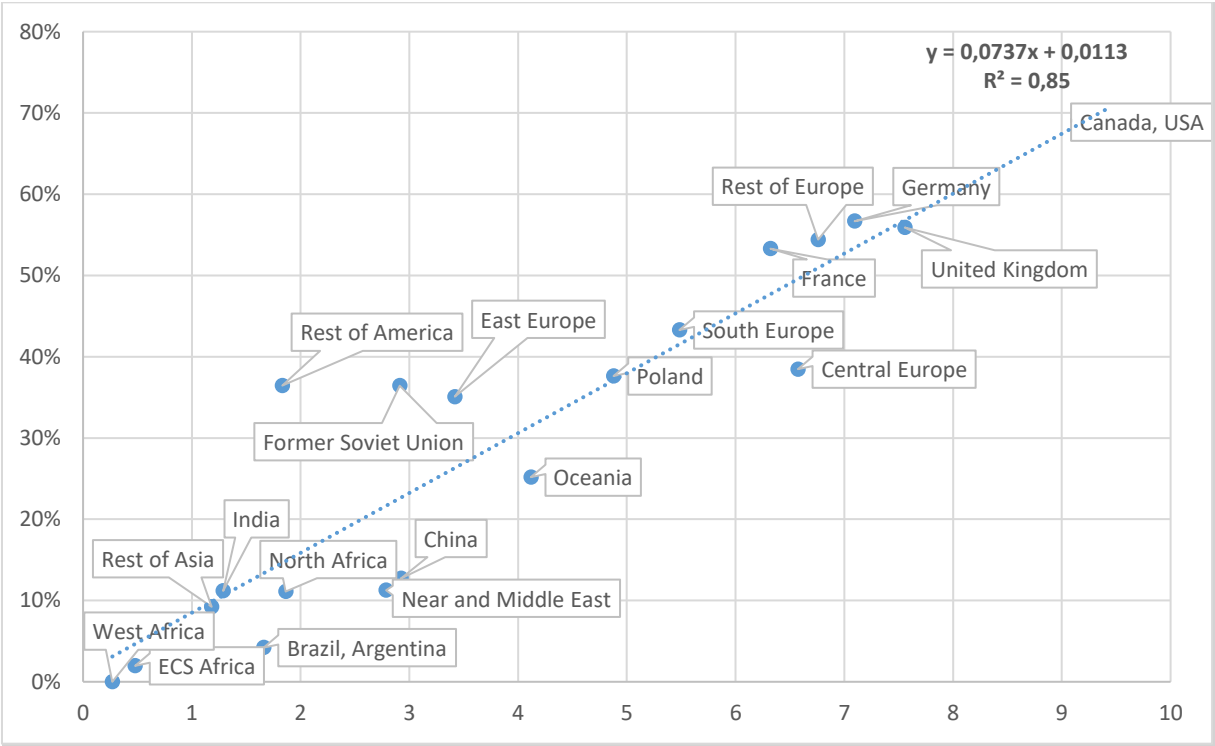
[115] Cette simulation préliminaire a été réalisée en utilisant les coefficients des efficiences de la viande et du lait de l'année de référence « 2010 » dans l'hypothèse d'évolutions tendancielles des régimes alimentaires. Réaliser cette même simulation dans l'hypothèse de régimes sains ne change pas 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".

[116] Notons immédiatement qu'aucune relation « similaire » n'a pu être mise en évidence pour les bovins viande.

*(Fourrages de qualité / fourrages totaux) en % = (Fourrages de qualité / fourrages totaux) 2010 en % + (PL/VL_2050 – PL/VL_010) * 7,4 (7)*

De façon générale, la modulation conduit à augmenter la part des fourrages de qualité dans l'ensemble des fourrages consommés par les vaches laitières 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.

Figure 6-4. Relation observée en « 2010 » entre la productivité des vaches laitières en tonnes de lait/vache/an (axe des abscisses) et la proportion de fourrages de bonne qualité (prairies temporaires et fourrages cultivés) dans la totalité des fourrages utilisés (axe des ordonnées)



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 mobilisée 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.

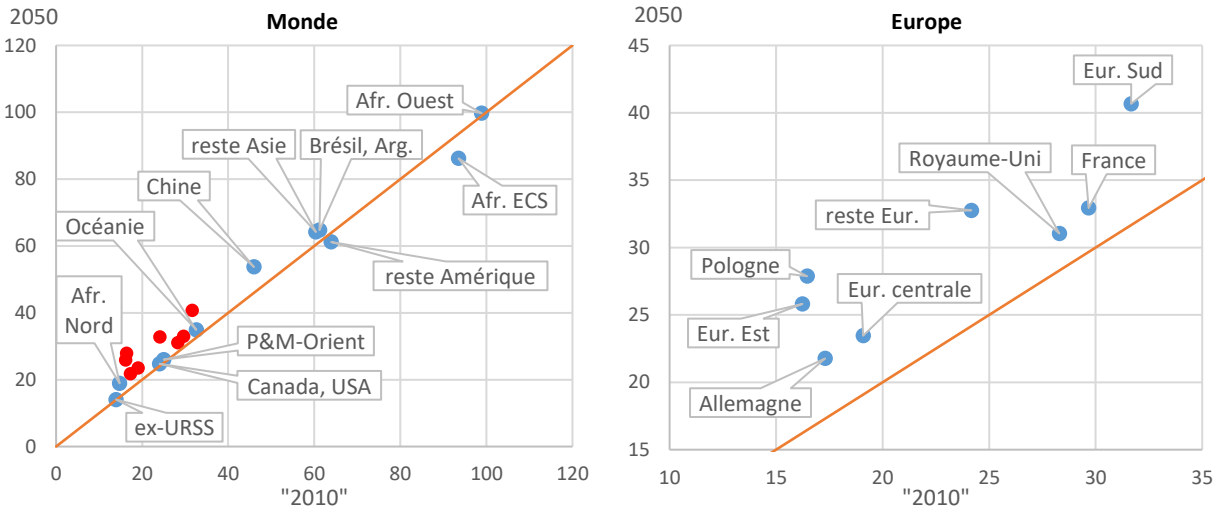
Forts de ces calculs préalables sur les productions, les productivités des animaux, les effectifs et la digestibilité des rations, nous sommes alors en capacité d'estimer les coefficients des efficiences animales des bovins lait et des bovins viande en 2050 en recourant à la même méthodologie TIER2 que celle utilisée pour calibrer ces mêmes coefficients en « 2010 ». Les coefficients sont présentés sur la Figure 6-5, panel a pour la viande bovine et panel b pour le lait, ainsi que dans le Tableau 6-2. 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 6-5a) ; 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 6-5b). 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 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 6-5. Coefficients globaux des efficiences animales en « 2010 » et en 2050 dans les deux secteurs des bovins viande (a) et des bovins lait (b)

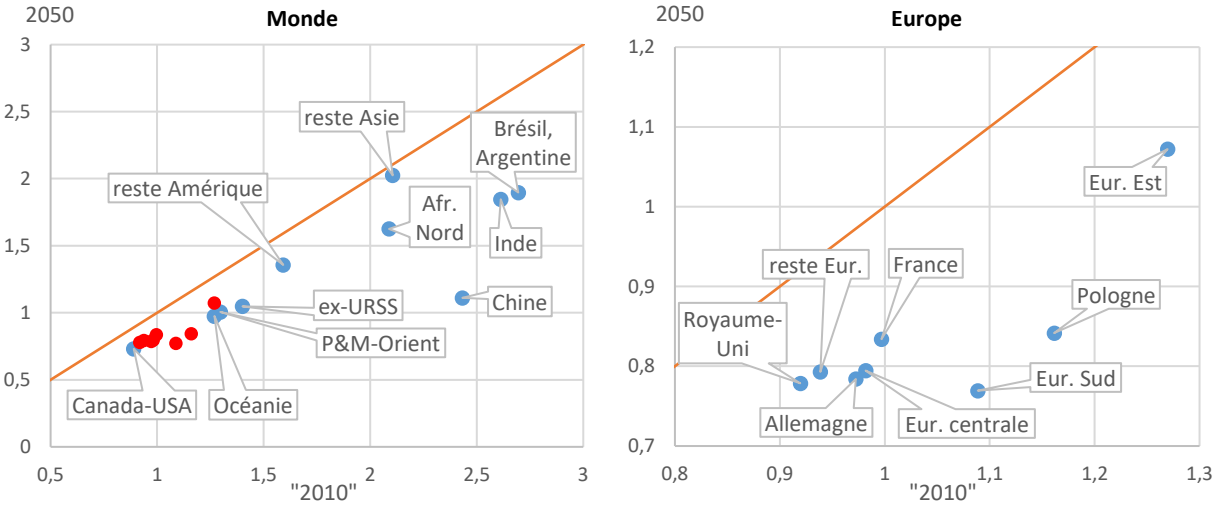
La droite en orange représente la première bissectrice. Les régions européennes détaillées sur les cartouches de droite sont représentées par des points rouges sur les cartouches de gauche.

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.

Tableau 6-2. Coefficients des efficiences animales des gros ruminants (lait, bovins viande) en « 2010 » et 2050 dans les différentes régions du modèle GlobAgri-AE2050

	Secteur laitier			Secteur bovins viande		
	Coef. d'efficience ''2010" (Kg MS/kg de lait)	**Coef. d'efficience 2050 (Kg MS/kg de lait)**	**Variation (%)**	**Coef. efficience "2010" (Kg MS/kg EC)**	**Coef. efficience 2050 (Kg MS/kg EC)**	**Variation (%)**
Zones européennes						
France	1,00	0,83	-16%	29,67	32,93	11%
Allemagne	0,97	0,78	-19%	17,30	21,76	26%
Royaume-Uni	0,92	0,78	-15%	28,29	31,04	10%
Pologne	1,16	0,84	-28%	16,45	27,87	69%
Europe Sud	1,09	0,77	-29%	31,66	40,66	28%
Europe Est	1,27	1,07	-16%	16,23	25,82	59%
Europe Centrale	0,98	0,79	-19%	19,08	23,46	23%
Reste de l'Europe	0,94	0,79	-16%	24,16	32,76	36%
Zones non européennes						
Canada-USA	0,89	0,73	-18%	24,08	24,75	3%
Brésil-Argentine	2,69	1,90	-30%	61,21	64,76	6%
Reste de l'Amérique	1,59	1,36	-15%	63,91	61,20	-4%
Ex-URSS	1,40	1,05	-25%	13,92	14,06	1%
Chine	2,43	1,11	-54%	45,97	53,74	17%
Inde	2,61	1,85	-29%	281,20	346,32	23%
Reste de l'Asie	2,11	2,02	-4%	60,38	64,19	6%
Proche & Moyen Orient	1,30	1,01	-22%	25,01	25,99	4%
Afrique Nord	2,09	1,63	-22%	14,77	18,90	28%
Afrique Ouest	8,54	7,64	-11%	98,88	99,73	1%
Afrique ECS	4,44	4,44	0%	93,53	86,19	-8%
Océanie	1,27	0,98	-23%	32,58	34,90	7%
Reste du monde	1,21	0,79	-35%	26,42	25,71	-3%

Annexes du Chapitre 6

6.A. Le modèle démographique des gros ruminants

Les statistiques (mondiales) relatives aux vaches laitières semblent être de qualité satisfaisante. Tel n'est pas le cas, quand elles existent, des statistiques relatives aux vaches allaitantes. Ce point peut être illustré par les chiffres de la France : les informations relatives aux effectifs des vaches laitières données par Eurostat en 2010 coïncident avec les chiffres GLEAM, alors que les informations relatives aux effectifs de vaches allaitantes diffèrent quasiment du simple (2 453 152 têtes pour GLEAM) au double (4 190 667 têtes pour Eurostat). De façon générale, les données GLEAM sous-estiment les effectifs de vaches allaitantes, ce qui ne permet pas de produire le nombre suffisant de bovins pour équilibrer les cheptels compte tenu du nombre d'animaux abattus et des taux de survie. Nous avons donc procédé à une nouvelle estimation de ces effectifs de vaches allaitantes. Ceci est d'autant plus important qu'il s'agit d'animaux âgés et donc forts consommateurs d'aliments sur leur cycle de vie, avec des impacts potentiellement importants sur les efficiences, à la hausse (sous-estimation des effectifs) ou la baisse (surestimation).

Premières hypothèses de travail

Nous avons supposé que les effectifs de vaches laitières étaient connus de façon suffisamment fiable dans les statistiques publiquement disponibles (hypothèse 1).

Nous avons ensuite supposé que le cheptel total de bovins lait et viande était à l'équilibre dans chaque zone du monde (hypothèse 2) afin d'estimer le nombre de bovins à naître compte tenu des effectifs d'abattages ; en d'autres termes, nous avons supposé que le nombre d'animaux nés vivants et survivants dans une région donnée est égal au nombre d'animaux abattus, nombre augmenté des exportations de bovins vifs et diminué des importations de bovins vifs. Quand le cheptel total de bovins lait et viande est (grosso-modo) à l'équilibre, le nombre de naissances est (grosso-modo) égal au nombre d'animaux abattus modulé du solde des exportations et importations d'animaux vivants, modulé également du taux de survie avant abattage. Il nous faut donc déterminer le nombre de naissances issus des troupeaux de vaches laitières, troupeaux supposés connus si on accepte l'hypothèse 1. Ce calcul suppose de connaître la productivité numérique apparente des vaches laitières qui correspond au nombre d'animaux nés par femelle adulte présente par an. L'hypothèse 2 d'équilibre du cheptel de bovins lait et viande permettra ensuite de déterminer les naissances issues du troupeau de vaches allaitantes et moyennant la connaissance de la productivité numérique des vaches allaitantes, de remonter aux effectifs des vaches allaitantes. Ces deux calculs sont détaillés successivement.

Calcul de la productivité numérique apparente des vaches laitières

Le calcul de la productivité numérique des vaches laitières a pour but de calculer le nombre de veaux nés par femelle adulte présente en moyenne au cours d'une année. Il fait intervenir deux paramètres importants, l'intervalle entre deux vêlages d'une vache et le taux de renouvellement des vaches par les primipares. En effet, les primipares qui entrent dans la catégorie des vaches en donnant naissance pour la première fois peuvent être considérées comme étant toutes fertiles ; si tel n'était pas le cas, elles seraient mobilisées pour la production de viande. En pratique, une faible fertilité des vaches laitières associée à un fort taux de renouvellement du troupeau par des primipares permet de conserver une productivité numérique apparente relativement élevée. De plus, il faut tenir compte de l'intervalle vêlage - vêlage qui joue également sur la productivité numérique : quand cet intervalle augmente, la productivité numérique par vache et par an tend à diminuer. La formule retenue pour estimer cette productivité numérique apparente calcule le ratio entre une production annuelle de 100 veaux et le nombre moyen de vaches présentes sur une année pour produire ces 100 veaux. Elle utilise les paramètres de reproduction issus de GLEAM pour calculer les intervalles vêlage – vêlage et les taux de fertilité afin de calculer un possible renouvellement des animaux par les génisses de renouvellement.

Au final, dans chaque zone, le nombre d'animaux nés du cheptel laitier est calculé comme le produit du nombre de vaches laitières par la productivité numérique apparente de ces dernières.

Calcul du nombre de vaches allaitantes

Ce premier calcul réalisé pour les vaches laitières permet de connaître le nombre de veaux produits par celles-ci. L'écart entre le nombre total de bovins à naître pour assurer l'équilibre du cheptel et le nombre de veaux issus du cheptel laitier doit être produit par des vaches allaitantes. Compte tenu des paramètres techniques de GLEAM sur la reproduction des vaches allaitantes, le modèle calcule le nombre de vaches allaitantes nécessaire pour produire cet effectif de veaux.

Répartition des bovins viande entre les différentes catégories d'animaux produisant de la viande

Le nombre total de vaches nécessaire pour produire le nombre de bovins abattus chaque année étant déterminé, il faut maintenant répartir ces bovins dans les différentes classes d'âge, ceci afin de pouvoir utiliser la méthode TIER2 de détermination des consommations alimentaires de ces différentes classes (*Cf.* Encadré 6.1). À cette fin, il faut, dans la mesure du possible, équilibrer les effectifs des bovins autres que les vaches des différentes classes avec les seuls effectifs disponibles des bovins totaux de la base de données FAOStat.

Commençons par les jeunes animaux, femelles et mâles, compris entre 0 et 1 an. Leurs effectifs correspondent aux naissances de jeunes issus des vaches laitières et allaitantes, après application de coefficients de mortalité issus des paramètres de GLEAM. Il est cependant nécessaire de corriger ces effectifs pour tenir compte des soldes entre importations et exportations d'animaux en vif : pour les mâles, les effectifs sont augmentés de 3/5 du solde (respectivement, diminués de 3/5) si le solde est positif (respectivement négatif) ; pour les femelles, les effectifs sont augmentés de 2/5 du solde (respectivement, diminués de 2/5) si le solde est positif (respectivement négatif).

Les effectifs de femelles comprises entre 1 et 2 ans sont égaux aux effectifs de femelles comprises entre 0 et 1 an affectés d'un coefficient de 0.9. Ce coefficient capture les pertes (sorties) par abattage ou mortalité dans cette tranche d'âge (ces animaux sont essentiellement destinés au renouvellement des femelles reproductrices).

Il reste ensuite à déterminer (i) les effectifs de mâles compris entre 1 et 2 ans, (ii) les effectifs de mâles de plus de 2 ans et (iii) les effectifs de femelles de plus de 2 ans. A cette fin, on suppose qu'il est possible de déterminer ces trois effectifs à partir des équations suivantes où l'inconnue est le paramètre k :

$$\textit{Effectifs de mâles 1-2 ans} = (\textit{effectifs de mâles 0-1 an}) * k$$

$$\textit{Effectifs de mâles} > \textit{2 ans} = (\textit{effectifs de mâles 1-2 ans}) * k = (\textit{effectifs de mâles 0-1 an}) * k^2$$

$$\textit{Effectifs de femelles} > \textit{2 ans} = (\textit{effectifs de femelles 1-2 ans}) * k$$

Les effectifs totaux étant connus, de même que les effectifs de vaches laitières, de vaches allaitantes, de femelles 0-1, de mâles 0-1 et de femelles 1-2, la résolution en k de l'équation du second degré suivante permet de déterminer les trois classes d'effectifs qui nous restent encore à calculer :

$$\textit{Effectifs totaux} = \textit{vaches laitières} + \textit{vaches allaitantes} + \textit{femelles 0-1} + \textit{mâles 0-1} + \textit{femelles 1-2} + (\textit{mâles 0-1}) * k + (\textit{mâles 0-1}) * k^2 + (\textit{femelles 1-2}) * k$$

6.B. Validation de la méthodologie TIER2 et du modèle démographique dans les deux cas de la France et de l'Allemagne

Afin de valider la méthodologie TIER2 (*cf.* Encadré 6.1) et le modèle démographique (*cf.* Annexe 6.1) sur des pays dont on connait par ailleurs les données statistiques avec plus de précision et plus de confiance (robustesse) que pour l'ensemble des régions du monde, notre approche a été testée sur deux pays européens très contrastés en termes en termes de production bovine, soit, d'une part, la France qui dispose d'un troupeau de vaches allaitantes très important et où le solde exportations moins importations d'animaux vivants est très positif, et, d'autre part, l'Allemagne qui a un troupeau de vaches allaitantes nettement plus réduit et un solde exportations moins importations d'animaux vivants négatifs.

Pour la France, l'estimation des effectifs de vaches allaitantes est bien meilleure que celle de GLEAM (3 982 837 animaux versus 2 433 152 pour GLEAM, à comparer au chiffre de 4 190 667 fourni par Eurostat. La répartition des animaux dans les différentes classes est de qualité seulement moyenne, ceci du fait de la typicité de la France avec, à la fois, des exportations importantes d'animaux jeunes pour engraissement hors du territoire national et beaucoup d'animaux conservés longtemps. Néanmoins, au total, toutes catégories de bovins lait et viande confondues, on aboutit pour l'année 2010 à une consommation totale d'aliments (concentrés et fourrages) de 78 millions de tonnes, chiffre à comparer aux 79 millions de tonnes estimés à partir des données Eurostat. Les coefficients des efficiences animales globales beta sont de 1,00 et de 29,7 pour le lait et la viande, respectivement ; ils sont égaux à 1,02 et 30,9 sur la base d'un calcul avec les données d'Eurostat.

Pour l'Allemagne, la répartition des animaux dans les différentes classes est bien meilleure en comparaison des données fournis par Eurostat. Toutes catégories de bovins confondues, on aboutit en 2010 à une consommation totale d'aliments concentrés et de fourrages de 52 millions de tonnes, chiffre à comparer aux 55 millions de tonnes calculés à partir des données Eurostat. Les coefficients des efficiences animales globales sont de 0,97 et de 17,3 pour le lait et la viande, respectivement ; ils sont égaux à 1,00 et 19,7 sur la base d'un calcul avec les données d'Eurostat.

6.C. Digestibilité moyennes des rations des gros ruminants en "2010" et en 2050 dans les différentes régions du monde

Région	2010		2050	
	Lait	Viande	Lait	Viande
France	0.72	0.66	0.73	0.66
Allemagne	0.72	0.71	0.75	0.71
Royaume-Uni	0.73	0.67	0.74	0.67
Pologne	0.72	0.71	0.73	0.71
Europe du Sud	0.69	0.58	0.76	0.58
Europe de l'Est	0.71	0.73	0.71	0.73
Europe centrale	0.72	0.70	0.73	0.70
Reste de l'Europe	0.73	0.68	0.75	0.68
Canada, USA	0.72	0.66	0.76	0.66
Brésil, Argentine	0.61	0.58	0.61	0.58
Reste de l'Amérique	0.64	0.57	0.64	0.57
Ex-URSS	0.68	0.67	0.71	0.67
Chine	0.65	0.63	0.72	0.63
Inde	0.58	0.51	0.56	0.51
Reste de l'Asie	0.61	0.57	0.62	0.57
Proche et Moyen-Orient	0.70	0.65	0.71	0.65
Afrique du Nord	0.70	0.76	0.66	0.76
Afrique de l'Ouest	0.57	0.55	0.61	0.55
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	0.61	0.57	0.61	0.57
Océanie	0.64	0.62	0.72	0.62
Reste du monde	0.72	0.77	0.78	0.77

6.D. Digestibilité des différents aliments des rations des gros ruminants

Aliment	Digestibilité bovins
Bovine meat	0.80
Cake other oilcrops	0.70
Crop residues	0.50
Dairy	0.80
Eggs	0.80
Feed aquatic animal products	0.93
Fibers, etc.	0.77
Food crops	0.72
Fruits and vegetables	0.68
Grass	calculée
Grass-like forage	calculée
Maize	0.85
Occasionals	0.50
Oil Other oilcrops	2.00
Other cereals	0.81
Other forages	0.70
Other oilcrops	1.07
Other plant products	0.67
Other products	0.67
Palm products oil	2.00
Palmkernel cake	0.70
poultry byproduct	0.60
Pulses	0.93
Rape and mustard cake	0.70
Rape and mustard oil	2.00
Rape and mustardseed	0.80
Rice	0.85
Roots and tuber	0.75
Small ruminant meat	0.80
Soyabean cake	0.91
Soyabean oil	2.00
Soyabeans	0.93
Sugar plants and products	0.72
Sunflowerseed	1.07
Sunflowerseed cake	0.70
Wheat	0.85

6.E. Secteur porcin en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses) et des autres aliments concentrés dans le total des aliments

	PIC (1000 t EC)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Total déchets occasionnels (1000 t MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/kg EC)	Part des céréales	Part des oléoprotéagineux	Part des autres aliments concentrés et des occasionnels
Régions européennes							
France	2 229	7 379	-	3,35	80%	14%	7%
Allemagne	4 576	15 256	-	3,35	78%	16%	6%
Royaume-Uni	717	2 408	-	3,42	81%	16%	3%
Pologne	1 685	6 087	-	3,62	82%	14%	3%
Europe du Sud	5 651	20 290	-	3,60	80%	15%	5%
Europe de l'Est	1 146	4 105	-	3,62	84%	5%	11%
Europe centrale	1 160	4 127	-	3,62	74%	13%	13%
Reste de l'Europe	5 028	16 788	-	3,42	76%	9%	15%
Régions non européennes							
Canada, USA	12 301	48 719	-	3,96	61%	16%	23%
Brésil, Argentine	3 475	14 381	1 258	4,53	42%	20%	38%
Reste de l'Amérique	3 146	12 776	1 139	4,53	57%	11%	31%
Ex-URSS	3 527	13 938	-	3,96	66%	20%	14%
Chine	48 962	86 852	106 653	3,96	23%	10%	67%
Inde	371	1 201	-	3,62	77%	17%	5%
Reste de l'Asie	9 733	41 557	-	4,53	76%	12%	13%
Proche et Moyen-Orient	20	89	-	4,53	82%	15%	3%
Afrique du Nord	1	6	-	4,53	85%	10%	5%
Afrique de l'Ouest	354	1 586	-	4,53	34%	25%	40%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	811	3 476	-	4,53	77%	6%	18%
Océanie	477	1 934	216	4,53	76%	3%	20%
Reste du monde	57	258	-	4,53	84%	5%	11%
Total monde	105 428	303 213	109 266		48%	12%	40%

6.F. Secteur des volailles de chair en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses) et des autres aliments concentrés dans le total des aliments

	PIC (1000 t EC)	Total aliments Concentrés (1000 t MS)	Total déchets occasionnels (1000 tonnes MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/kg EC)	Part des Céréales	Part des Oléoprotéagineux	Part des autres aliments concentrés et des occasionnels
Régions européennes							
France	1 886	5 701	-	3,03	69%	26%	4%
Allemagne	1 509	3 775	-	2,50	59%	30%	11%
Royaume-Uni	1 555	4 362	-	2,81	71%	24%	5%
Pologne	1 214	3 649	-	3,01	56%	20%	24%
Europe du Sud	2 882	7 972	-	2,77	61%	25%	14%
Europe de l'Est	919	3 257	-	3,55	77%	17%	6%
Europe centrale	650	1 699	-	2,62	63%	29%	7%
Reste de l'Europe	1 710	4 344	-	2,54	61%	29%	10%
Régions non européennes							
Canada, USA	20 583	59 703	-	2,90	58%	33%	8%
Brésil, Argentine	12 841	32 982	3 694	2,88	59%	26%	15%
Reste de l'Amérique	8 643	23 919	1 259	2,91	63%	22%	15%
Ex-URSS	3 878	11 123	-	2,87	62%	18%	20%
Chine	17 191	34 818	18 748	3,12	42%	20%	38%
Inde	2 205	9 364	-	4,34	57%	32%	11%
Reste de l'Asie	9 992	31 136	-	3,12	65%	25%	9%
Proche et Moyen-Orient	5 339	16 472	-	3,12	68%	26%	5%
Afrique du Nord	1 938	6 158	-	3,18	71%	24%	5%
Afrique de l'Ouest	513	1 601	-	3,12	62%	28%	11%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	2 133	6 174	-	3,13	56%	12%	31%
Océanie	1 126	3 228	281	3,12	67%	15%	18%
Reste du monde	38	118	-	3,12	60%	27%	14%
Total monde	98 745	271 556	23 982		58%	25%	16%

6.G. Secteur des œufs en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses) et des autres aliments concentrés dans le total des aliments

	Production (1000 tonnes)	Total aliments concentrés (1000 tonnes MS)	Total déchets occasionnels (1000 tonnes MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/kg d'oeufs)	Part des céréales	Part des oléoprotéagineux	Part des autres aliments concentrés et des occasionnels
Régions européennes							
France	905	2 176	-	2,41	69%	20%	11%
Allemagne	715	1 813	-	2,54	63%	24%	13%
Royaume-Uni	653	1 566	-	2,41	72%	17%	11%
Pologne	606	1 564	-	2,58	64%	17%	19%
Europe du Sud	1 969	4 740	-	2,41	66%	19%	15%
Europe de l'Est	612	1 471	-	2,41	75%	12%	12%
Europe centrale	356	857	-	2,41	66%	20%	14%
Reste de l'Europe	1 287	3 319	-	2,58	63%	24%	13%
Régions non européennes							
Canada, USA	5 851	21 133	-	3,61	59%	26%	14%
Brésil, Argentine	2 657	5 876	384	2,41	58%	18%	24%
Reste de l'Amérique	4 761	10 891	573	2,41	63%	18%	20%
Ex-URSS	4 067	9 794	-	2,41	67%	9%	24%
Chine	28 080	40 571	27 047	2,41	38%	14%	48%
Inde	3 358	7 716	-	2,41	37%	29%	34%
Reste de l'Asie	8 243	19 849	-	2,41	62%	17%	21%
Proche et Moyen-Orient	2 057	5 605	-	2,75	69%	16%	15%
Afrique du Nord	854	2 497	-	2,92	72%	17%	11%
Afrique de l'Ouest	871	2 098	-	2,41	66%	21%	13%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	929	2 103	-	2,41	23%	12%	65%
Océanie	242	525	58	2,41	58%	17%	25%
Reste du monde	42	100	-	2,41	59%	15%	26%
Total monde	69 114	146 266	28 062		52%	18%	31%

6.H. Secteur du lait en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses), des autres aliments concentrés et des fourrages dans le total des aliments

	Production (1000 t)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Total fourrages (1000 t MS)	Total aliments (1000 t MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/kg de lait)	Part des Céréales	Part des oléoprotéagineux	Part des autres aliments concentrés	Part des fourrages (y.c. déchets occasionnels)
Régions européennes									
France	24 352	9 536	14 739	24 276	1,00	19%	11%	10%	61%
Allemagne	29 730	10 819	18 090	28 909	0,97	22%	8%	7%	63%
Royaume-Uni	13 924	3 995	8 808	12 802	0,92	17%	8%	7%	69%
Pologne	12 400	4 744	9 656	14 401	1,16	26%	3%	3%	67%
Europe du Sud	26 636	18 314	10 683	28 997	1,09	42%	12%	9%	37%
Europe de l'Est	9 871	8 830	3 702	12 532	1,27	46%	7%	18%	30%
Central Europe centrale	11 104	4 229	6 672	10 901	0,98	16%	7%	16%	61%
Reste de l'Europe	35 440	12 115	21 150	33 265	0,94	18%	15%	3%	64%
Régions non européennes									
Canada, USA	95 730	45 836	39 390	85 227	0,89	36%	1%	17%	46%
Brésil, Argentine	41 406	5 706	105 878	111 584	2,69	4%	1%	0%	95%
Reste de l'Amérique	33 833	5 394	48 464	53 859	1,59	4%	4%	2%	90%
Ex-URSS	68 312	22 219	73 450	95 669	1,40	21%	1%	1%	77%
Chine	41 115	**31 929**	68 081	100 010	2,43	11%	7%	14%	68%
Inde	122 059	16 443	302 465	318 908	2,61	2%	2%	1%	95%
Reste de l'Asie	56 954	12 250	107 685	119 936	2,11	5%	4%	2%	90%
Proche et Moyen-Orient	25 291	14 206	18 584	32 790	1,30	29%	6%	9%	57%
Afrique du Nord	11 411	3 630	20 200	23 830	2,09	11%	0%	4%	85%
Afrique de l'Ouest	3 804	8 313	24 166	32 479	8,54	8%	0%	17%	74%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	25 221	5 532	106 498	112 030	4,44	3%	1%	1%	95%
Océanie	26 183	3 277	29 951	33 228	1,27	5%	4%	1%	90%
Reste du monde	700	493	356	849	1,21	46%	4%	8%	42%
Total monde	715 474	247 809	1 038 671	1 286 481		11%	3%	5%	81%

6-I. Secteur de la viande bovine en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses), des autres aliments concentrés et des fourrages dans le total des aliments

	PIB (1000 t EC)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Total fourrages (1000 t MS)	Total aliments (1000 t MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/kg EC)	Part des céréales	Part des oléo-Protéagineux	Part des autres aliments concentrés	Part des fourrages (y.c. déchets occasionnels)
Régions européennes									
France	1 796	4 069	49 211	53 280	29,7	3%	4%	1%	92%
Allemagne	1 336	624	22 487	23 111	17,3	1%	0%	2%	97%
Royaume-Uni	884	1 845	23 158	25 003	28,3	2%	2%	3%	93%
Pologne	466	3 706	3 957	7 662	16,5	30%	10%	9%	52%
Europe du Sud	1 603	6 778	43 972	50 750	31,7	6%	5%	2%	87%
Europe de l'Est	377	3 178	2 948	6 126	16,2	34%	6%	12%	48%
Europe centrale	529	1 521	8 566	10 087	19,1	10%	0%	5%	85%
Reste de l'Europe	1 430	4 550	29 990	34 540	24,2	1%	7%	5%	87%
Régions non européennes									
Canada, USA	12 732	39 244	267 316	306 559	24,1	7%	0%	6%	87%
Brésil, Argentine	11 997	3 963	730 375	734 338	61,2	0%	0%	0%	99%
Reste de l'Amérique	5 631	3 264	356 655	359 919	63,9	1%	0%	0%	99%
Ex-URSS	3 953	17 484	37 561	55 046	13,9	23%	1%	8%	68%
Chine	6 456	26 400	270 400	296 800	46,0	7%	2%	0%	91%
Inde	2 518		708 142	708 142	281,2	0%	0%	0%	100%
Reste de l'Asie	4 539	18 820	255 222	274 042	60,4	4%	2%	1%	93%
Proche et Moyen-Orient	1 049	3 998	22 240	26 238	25,0	11%	0%	4%	85%
Afrique du Nord	1 200	10 765	6 957	17 722	14,8	52%	1%	7%	39%
Afrique de l'Ouest	931	**4 064**	87 953	92 016	98,9	2%	0%	2%	96%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	3 593	1 951	334 091	336 042	93,5	0%	0%	0%	99%
Océanie	2 984	1 005	96 218	97 222	32,6	1%	0%	0%	99%
Reste du monde	16	**212**	202	414	26,4	36%	12%	3%	49%
Total monde	66 018	157 440	3 357 621	3 515 062		3%	1%	1%	96%

6.J. Secteur des petits ruminants : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des oléoprotéagineux (tourteaux, graines oléagineuses, légumineuses), des autres aliments concentrés et des fourrages dans le total des aliments

	Production (1000 t EC)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Total fourrages (1000 t MS)	Total aliments (1000 t MS)	Coefficients d'efficience animale (Kg MS/ kg EC)	Part des céréales	Part des oléo-protéagineux	Part des autres aliments concentrés	Part des Fourrages
Régions européennes									
France	1 796	4 069	49 211	53 280	29,7	3%	4%	1%	92%
Allemagne	1 336	624	22 487	23 111	17,3	1%	0%	2%	97%
Royaume-Uni	884	1 845	23 158	25 003	28,3	2%	2%	3%	93%
Pologne	466	3 706	3 957	7 662	16,5	30%	10%	9%	52%
Europe du Sud	1 603	6 778	43 972	50 750	31,7	6%	5%	2%	87%
Europe de l'Est	377	3 178	2 948	6 126	16,2	34%	6%	12%	48%
Europe centrale	529	1 521	8 566	10 087	19,1	10%	0%	5%	85%
Reste de l'Europe	1 430	4 550	29 990	34 540	24,2	1%	7%	5%	87%
Régions non européennes									
Canada, USA	12 732	39 244	267 316	306 559	24,1	7%	0%	6%	87%
Brésil, Argentine	11 997	3 963	730 375	734 338	61,2	0%	0%	0%	99%
Reste de l'Amérique	5 631	3 264	356 655	359 919	63,9	1%	0%	0%	99%
Ex-URSS	3 953	17 484	37 561	55 046	13,9	23%	1%	8%	68%
Chine	6 456	26 400	270 400	296 800	46,0	7%	2%	0%	91%
Inde	2 518		708 142	708 142	281,2	0%	0%	0%	100%
Reste de l'Asie	4 539	18 820	255 222	274 042	60,4	4%	2%	1%	93%
Proche et Moyen-Orient	1 049	3 998	22 240	26 238	25,0	11%	0%	4%	85%
Afrique du Nord	1 200	10 765	6 957	17 722	14,8	52%	1%	7%	39%
Afrique de l'Ouest	931	**4 064**	87 953	92 016	98,9	2%	0%	2%	96%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	3 593	1 951	334 091	336 042	93,5	0%	0%	0%	99%
Océanie	2 984	1 005	96 218	97 222	32,6	1%	0%	0%	99%
Reste du monde	16	**212**	202	414	26,4	36%	12%	3%	49%
Total monde	66 018	157 440	3 357 621	3 515 062		3%	1%	1%	96%

6.K. Secteur aquacole (produits animaux aquatiques) en "2010" : Coefficients globaux des efficiences animales et parts relatives des céréales, des tourteaux d'oléagineux et des autres aliments concentrés dans le total des aliments

	Production aquacole (1000 t MS)	Production totale (y.c. pêche) (1000 t)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Coef. efficience animale (Kg MS/ kg)	Part des céréales	Part des tourteaux	Part des autres aliments concentrés
Régions européennes							
France	222	586	13	0,06	15%	36%	49%
Allemagne	39	459	5	0,12	25%	46%	29%
Royaume-Uni	196	705	112	0,58	9%	15%	75%
Pologne	32	191	12	0,37	15%	49%	36%
Europe du Sud	586	1 821	98	0,17	4%	10%	86%
Europe de l'Est	40	63	18	0,45	17%	48%	34%
Europe centrale	25	37	11	0,46	15%	52%	33%
Reste de l'Europe	1 191	4 882	548	0,46	1%	23%	76%
Régions non européennes							
Canada, USA	625	5 488	623	1,00	49%	25%	26%
Brésil, Argentine	471	2 041	241	0,51	38%	54%	9%
Reste de l'Amérique	1 537	9 289	789	0,51	20%	33%	47%
Ex-URSS	175	3 993	245	1,39	28%	62%	10%
Chine	37 018	50 729	12 359	0,33	66%	14%	20%
Inde	3 750	7 733	3 348	0,89	52%	34%	14%
Reste de l'Asie	10 950	32 800	7 046	0,64	45%	24%	31%
Proche et Moyen-Orient	452	1 456	549	1,22	60%	28%	12%
Afrique du Nord	879	2 258	1 115	1,27	56%	20%	24%
Afrique de l'Ouest	209	2 075	281	1,35	36%	41%	24%
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	132	2 936	112	0,85	54%	36%	9%
Océanie	181	839	93	0,51	25%	66%	9%
Reste du monde	14	905	25	1,76	77%	22%	2%
Total Monde	58 724	131 286	27 642		54%	22%	24%

6.L. Quantités totales des différents aliments (céréales, tourteaux, autres aliments concentrés, différents fourrages) utilisées par tous les secteurs d'élevage en "2010"

	Total céréales (1000 t MS)	Total tourteaux (1000 t MS)	Total autres aliments concentrés (1000 t MS)	Total aliments concentrés (1000 t MS)	Herbe des prairies permanentes (1000 t MS)	Herbe des prairies temporaires (1000 t MS)	Autres fourrages cultivés (1000 t MS)	Déchets occasionnels (1000 t MS)	Résidus de cultures (1000 t MS)	TOTAL
Régions européennes										
France	18 778	6 834	5 022	30 634	50 170	4 690	10 491	0	0	**95 984**
Allemagne	22 701	6 593	4 494	33 788	26 986	4 366	9 766	0	0	**74 906**
Royaume-Uni	9 661	4 125	3 145	16 931	33 887	6 097	1 364	0	0	**58 279**
Pologne	15 236	2 901	2 842	20 979	9 368	695	3 548	6	0	**34 596**
Europe du Sud	43 109	11 254	7 491	61 854	6 563	2 588	7 121	39 825	0	**117 951**
Europe de l'Est	17 939	1 818	4 257	24 014	4 608	257	1 607	317	0	**30 803**
Europe centrale	8 244	1 770	3 231	13 246	11 600	2 008	1 817	16	0	**28 686**
Reste de l'Europe	26 641	9 906	8 229	44 776	38 466	9 023	5 835	861	0	**98 962**
Régions non européennes										
Canada, USA	141 062	32 070	57 246	230 379	195 081	37 231	52 025	0	25 622	**540 337**
Brésil, Argentine	39 368	15 009	13 485	67 862	649 929	4 629	8 492	157 241	33 425	**921 578**
Reste de l'Amérique	38 799	10 594	14 183	63 576	238 590	11 027	24 885	139 016	14 733	**491 827**
Ex-URSS	58 427	4 524	20 875	83 826	71 101	21 700	14 685	12 321	14 929	**218 562**
Chine	146 382	47 260	61 081	254 724	248 376	63	14 830	226 450	67 127	**811 569**
Inde	20 465	12 420	12 166	45 051	22 680	10	53 486	614 467	374 007	**1 109 701**
Reste de l'Asie	92 156	24 614	22 196	138 966	171 156	5 284	12 112	106 883	124 013	**558 414**
Proche et Moyen-Orient	33 076	7 527	6 270	46 872	45 112	406	4 148	3 087	4 178	**103 803**
Afrique du Nord	20 620	3 558	3 771	27 949	24 790	358	2 843	1 102	5 881	**62 923**
Afrique de l'Ouest	10 152	2 125	14 642	26 919	77 218	0	0	33 823	55 229	**193 188**
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	11 874	2 894	7 335	22 103	349 421	4 485	1 911	59 991	93 618	**531 529**
Océanie	8 707	1 983	2 129	12 819	156 510	6 096	4 117	5 100	349	**184 992**
Reste du monde	986	96	254	1 335	405	144	94	14	53	**2 045**
Total Monde	784 382	209 876	274 345	1 268 602	2 432 017	121 157	235 177	1 400 519	813 164	**6 270 635**

6.M. Quantités totales d'aliments utilisées (aliments concentrés et fourrages) par les différents secteurs d'élevage

	Porcs (1000 t MS)	Volailles de chair (1000 t MS)	Œufs (1000 t MS)	Lait (1000 t MS)	Viande bovine (1000 t MS)	Petits ruminants (1000 t MS)	Aquaculture (1000 t MS)	Autres (secteur résiduel) (1000 t MS)	TOTAL
Régions européennes									
France	7 379	5 701	2 176	24 276	53 280	1 671	13	1 489	95 984
Allemagne	15 256	3 775	1 813	28 909	23 111	626	5	1 411	74 906
Royaume-Uni	2 408	4 362	1 566	12 802	25 003	11 242	112	783	58 279
Pologne	6 087	3 649	1 564	14 401	7 662	5	12	1 216	34 596
Europe du Sud	20 290	7 972	4 740	28 997	50 750	1 737	98	3 367	117 951
Europe de l'Est	4 105	3 257	1 471	12 532	6 126	193	18	3 100	30 803
Europe centrale	4 127	1 699	857	10 901	10 087	239	11	765	28 686
Reste de l'Europe	16 788	4 344	3 319	33 265	34 540	3 591	548	2 567	98 962
Régions non européennes									
Canada, USA	48 719	59 703	21 133	85 227	306 559	3 743	623	14 629	540 337
Brésil, Argentine	15 640	36 676	6 260	111 584	734 338	13 224	241	3 615	921 578
Reste de l'Amérique	13 915	25 178	11 464	53 859	359 919	22 264	789	4 438	491 827
Ex-URSS	13 938	11 123	9 794	95 669	55 046	27 135	245	5 611	218 562
Chine	193 505	53 566	67 618	100 010	296 800	73 777	12 359	13 935	811 569
Inde	1 201	9 364	7 716	318 908	708 142	57 642	3 348	3 381	1 109 701
Reste de l'Asie	41 557	31 136	19 849	119 936	274 042	59 135	7 046	5 713	558 414
Proche et Moyen-Orient	89	16 472	5 605	32 790	26 238	19 931	549	2 129	103 803
Afrique du Nord	6	6 158	2 497	23 830	17 722	10 079	1 115	1 516	62 923
Afrique de l'Ouest	1 586	1 601	2 098	32 479	92 016	61 471	281	1 655	193 188
Afrique de l'Est, centrale et du Sud	3 476	6 174	2 103	112 030	336 042	70 133	112	1 460	531 529
Océanie	2 149	3 509	584	33 228	97 222	47 688	93	519	184 992
Reste du monde	258	118	100	849	414	201	25	78	2 045
	0	0	0	0	0	0			
Total monde	412 479	295 538	174 329	1 286 481	3 515 062	485 729	27 642	73 375	6 270 635

Chapitre 7. L'évolution des intensités culturales annuelles

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[117]). 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 7-1.

[117] 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 7-1. 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*.

Chapitre 8. Surfaces cultivables

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 a un impact direct sur les résultats des simulations dès lors qu'une ou plusieurs régions butent sur cette contrainte.

Cette dernière s'applique aux terres pouvant être mises en cultures, y compris sous la forme de fourrages cultivés, mais 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 ; en pratique, les scénarios de référence aboutissent plutôt à une expansion du besoin en prairies permanentes à l'horizon 2050 (*cf.* Rapport de synthèse). 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.

La première section de ce chapitre présente les données et les hypothèses retenues pour définir les surfaces potentiellement cultivables dans la situation initiale « 2010 » ainsi que les projections dans nos différents scénarios de référence.
La seconde section, présente les analyses de sensibilités envisageables pour prendre en compte des extensions de surfaces cultivables plus réduites que dans les scénarios de référence, notamment en interdisant la mise en culture des surfaces actuellement boisées et en tenant compte de l'extension future des surfaces artificialisées.

8.1. Les surfaces potentiellement cultivables « en 2010 » et dans les scénarios « de référence » 2050

8.1.1. Les données retenues : Global Agro-Ecological Zone Assessment v3.0

Les données retenues[118] pour quantifier les surfaces cultivables dans GlobAgri-AE2050 sont les données issues de la procédure GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*) version 3.0[119] (Fischer, 2012a). Le portail GAEZ met à disposition des fichiers de données classant les terres de tous les pays du monde selon leur potentiel agro-écologique quel qu'en soit l'usage présent. Ainsi, ces terres potentiellement cultivables peuvent être protégées, en forêt, partiellement urbanisées etc. Le Tableau 8-1 récapitule les critères retenus pour définir les surfaces cultivables dans AE2050, les choix sous-jacents étant détaillés ci-après.

En premier lieu, notons que GAEZ version 3.0 n'utilise pas les scénarios RCP du GIEC (issus de l'AR5), mais les anciens scénarios SRES, antérieurs au 5e rapport du GIEC[120] (*cf.* Annexe 8.2). Il est néanmoins possible d'établir la correspondance entre les scénarios SRES et les scénarios RCP. Les scénarios RCP6.0 et RCP8.5 sur lesquels sont fondés les deux variantes de changement climatique (CC) « tendanciel » et « aggravé » définies dans AE2050, correspondent respectivement aux trajectoires des scénarios SRES B2 et SRES A1FI. Notons que l'effet de fertilisation par le CO_2 est pris en compte implicitement dans les données historiques ainsi que dans les scénarios futurs à travers l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2[121]. Nous avons choisi les résultats obtenus avec le modèle Hadley CM3 car c'est le seul modèle qui simule à la fois le scénario B2 et le scénario A1FI, ce qui permet de comparer les variations de surfaces estimées pour les deux scénarios de CC en s'affranchissant de l'effet modèle. Ces deux jeux d'estimations ont été utilisés pour réaliser les simulations test dont les

[118] Pour plus de détails sur la procédure de choix de ces données *cf.* Annexe 8.1.

[119] Une version 4.0 a été complétée en 2017 par le IIASA et la FAO mais n'est pas encore accessible via le portail GAEZ http://www.fao.org/nr/gaez/programme/en/

[120] Les données avec les nouveaux scénarios IPCC seront disponibles dans la v4.0 de GAEZ.

[121] En comparant les estimations obtenues avec et sans prise en compte de l'effet CO_2, aucune différence n'apparaît néanmoins, à l'exception d'une légère différence pour la région Ex-URSS.

résultats sont présentés en Section 5.3, et dont l'analyse a conclu à ne retenir que la trajectoire de CC « tendanciel » pour simuler les scénarios de référence.

Tableau 8-1. Hypothèses sur les données de surfaces cultivables utilisées dans GlobAgri-AE2050

	Situation « 2010 »	**Situation 2050**	
Période de simulation	Moyenne 1961-1990	Moyenne 2040-2070	
Scénario climatique	Climat historique	Scénario SRES « B2 » (équivalent du CC « tendanciel »)	Scénario SRES « A1FI » (équivalent du CC « aggravé »)
Indice de *suitability*	>40		
Alimentation en eau	Pluvial		
Niveau d'intrants	Haut		
Fertilisation par le CO_2	Oui		

En second lieu, le potentiel agro-écologique des terres est évalué dans GAEZ grâce à l'**indice de « Suitability »** (SI). Cet indice est calculé à partir du rendement agro-climatique potentiel évalué par un modèle de culture et réduit par un certain nombre de contraintes dans un premier temps liées au climat[122] puis dans un second temps liées aux caractéristiques du sol (facteurs comme la pente, la qualité du sol, besoin en jachère). L'indice de *Suitability* est calculé pour 48 cultures différentes, 3 niveaux d'intrants, 4 mode d'alimentation en eau, 3 horizons temporels futurs et 4 scénarios de CC[123].

Les indices de « Suitability » vont de 0 à 100 % et 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 indice supérieur à 40 sont souvent agrégées et présentées comme les terres potentiellement cultivables (Fischer, 2002, 2012b), tandis que les surfaces de qualité inférieure à 40 sont, elles aussi, souvent agrégées et qualifiées de terres marginales ou impropres à l'agriculture. Plus de détails sur cet indice sont donnés en Annexe 8.3. Pour cette étude, nous avons ainsi retenu comme « terres potentiellement cultivables » les surfaces dont le SI est supérieur à 40. *Rappelons que l'évaluation du SI des terres ne tient pas compte de leur usage actuel (forêts, zones protégées, zones artificialisées, prairies permanentes) ni des coûts nécessaires pour les mettre en culture.*

De plus, GAEZ distingue les surfaces potentiellement cultivables en système pluvial des surfaces potentiellement cultivables en système irrigué. L'irrigation permet d'utiliser des terres considérées comme marginales en condition pluviale et donc de relâcher cette contrainte de terre. Or, GAEZ ne prend pas en compte la contrainte locale en eau dans son estimation des terres potentiellement cultivables en système irrigué. Le caractère cultivable d'une surface est donc évalué sous l'hypothèse que l'eau est disponible sans limitation ce qui peut conduire à une surestimation des terres cultivables sous ce système. Nous avons donc considéré comme cultivables uniquement les surfaces en système pluvial. Cela n'interdit pas pour autant l'implantation de systèmes irrigués sur des terres considérées cultivables en système pluvial. De plus, les terres cultivées grâce à l'irrigation dans des zones contraintes, comme par exemple Afrique du Nord et Proche et Moyen-Orient, sont prises en compte, puisque nous avons défini dans la situation initiale une contrainte de terre qui correspond à la surface effectivement cultivée dans ces régions (*cf.* section 8.1.2). En résumé, on autorise le modèle à mettre en culture uniquement des surfaces potentiellement cultivables en système pluvial sauf dans les régions déjà contraintes en « 2010 ».

GAEZ évalue les surfaces potentiellement cultivables aussi selon plusieurs hypothèses de niveau d'intrants apportés aux cultures/sol (étant entendu que certaines terres ne deviennent « cultivables » que si l'on y applique un certain niveau d'intrants). Dans AE2050, nous retenons les estimations de surfaces cultivables obtenues en considérant le plus haut niveau d'intrants afin de considérer les surfaces cultivables sous l'hypothèse la plus optimiste (*cf.* Annexe 8.4 pour la définition des niveaux d'intrants).

[122] Variabilité interannuelle de l'humidité du sol, l'impact des maladies, ravageurs et adventices, le risque de stress hydrique, le risque de gel, de difficulté de réalisation de certaines tâches à certains moments du fait de conditions climatiques inadaptées.

[123] Pour plus de détails sur l'élaboration du SI, consulter : http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZv3.0/, en particulier dans la rubrique « *Model documentation* ».

8.1.2. Calcul des surfaces potentiellement cultivables et comparaison avec les surfaces cultivées en « 2010 »

Pour chaque période et scénario, les surfaces cultivables de chaque pays sont données pour 48 cultures différentes. Le modèle GlobAgri-AE2050 ne permet pas d'introduire une contrainte de terre pour chaque culture. La surface en terres potentiellement cultivables utilisée comme contrainte de terre pour chaque pays est celle de la culture donnant la surface SI>40 la plus élevée. Ces surfaces sont ensuite agrégées en régions AE2050 comme suit :

$$Surf(r,t,s) = \sum_{p=1}^{n} \max(i, Surf(i,p,t,s))$$

Avec r la région AE2050 composée de n pays p, i les cultures GAEZ, t la période considérée et s le scénario.

Dans la majorité des régions, le potentiel de terres cultivables en « 2010 » dépasse largement les surfaces effectivement cultivées en « 2010 » (Tableau 8-2). Selon les données GAEZ, presque 5 milliards d'hectares sont classés comme potentiellement cultivables au niveau mondial. Comparées aux 1,54 milliards d'hectares de surfaces cultivées dans le monde en « 2010 », cela laisserait une marge d'expansion **d'environ 3,4 milliards d'hectares**, répartis de manière hétérogène entre les différentes zones géographiques.

Tableau 8-2. Surfaces cultivées et surfaces potentiellement cultivables en « 2010 », données FAO et GAEZ (1000 ha)

	Surfaces cultivées selon la FAO (« 2010 »)	Surfaces potentiellement cultivables « 2010 » (SI>40)	Potentiel d'extension « 2010 » (SI>40)	Potentiel d'extension en % par rapport aux surfaces cultivées
France	19 292	37 580	18 288	95%
Allemagne	12 088	30 583	18 494	153%
Royaume-Uni	6 072	14 990	8 918	147%
Pologne	11 715	29 593	17 878	153%
Europe du Sud	35 972	35 458	-514	-1%
Europe de l'Est	20 260	36 938	16 678	82%
Europe Centrale	6 517	12 939	6 422	99%
Reste de l'Europe	15 175	43 948	28 773	190%
Total Europe	**127 092**	**242 029**	**114 937**	**90%**
Canada-USA	193 234	602 063	408 829	212%
Brésil-Argentine	116 143	780 899	664 756	572%
Reste de l'Amérique	68 767	459 041	390 274	568%
Ex-URSS	201 947	620 325	418 377	207%
Chine	122 537	120 667	-1 870	-2%
Inde	169 442	231 056	61 613	36%
Reste de l'Asie	171 957	267 350	95 393	55%
Proche et Moyen Orient	57 183	42 614	-14 569	-25%
Afrique du Nord	28 283	22 308	-5 975	-21%
Afrique de l'Ouest	98 490	274 732	176 242	179%
Afrique ECS	134 134	1 121 569	987 436	736%
Océanie	47 919	190 447	142 528	297%
Reste du monde	2 273	3 348	1 076	47%
Total monde	**1 539 399**	**4 978 446**	3 439 048	223%

Ainsi, nombreuses sont les régions qui ont des disponibilités en terres largement supérieures à leurs surfaces cultivées actuelles. Les disponibilités en terres cultivables concernent en premier lieu l'**Afrique sub-saharienne** (Afrique ECS plus particulièrement), l'**ensemble du continent américain**, l'**Océanie** et l'**ex-URSS**. 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.

L'**Europe**, le **Reste de l'Asie** et l'**Inde** n'ont en comparaison que peu de marge de manœuvre. L'**Europe** renferme toutefois des disparités régionales entre le **Reste de l'Europe** qui offre un potentiel de surfaces cultivables important et l'**Europe du sud** qui est déjà contrainte dans la situation initiale. Les autres six régions européennes disposent d'un potentiel d'expansion d'entre 82 % (Europe de l'Est) et 153 % (Pologne et Allemagne) par rapport à leurs surfaces effectivement cultivées en « 2010 », passant par la France (95 %), l'Europe centrale (99 %) et le Royaume-Uni (147 %).

Les régions **Afrique du Nord**, **Proche & Moyen-Orient** et **Chine** cultivent elles aussi des surfaces plus étendues en « 2010 » que considérées comme cultivables par GAEZ (presque 15 Mha de « trop » pour Proche et Moyen Orient, 6 Mha pour l'Afrique du Nord et 2 Mha pour la Chine). Comme indiqué précédemment, dans le modèle GlobAgri-AE2050, on considère pour ces zones que la contrainte de terre initiale n'est pas les surfaces potentiellement cultivables, mais les surfaces actuellement cultivées.

8.1.3. Évolution des potentiels de surfaces cultivables selon GAEZ sous l'effet du changement climatique à 2050

Selon les projections de GAEZ, au niveau mondial, un CC « tendanciel » (SRES B2) entraînerait un gain de surfaces potentiellement cultivables de 81 millions d'hectares dans le monde, soit 2 % par rapport aux surfaces potentiellement cultivables en « 2010 ». En guise de comparaison, un CC « aggravé » (SRES A1FI) entraînerait une perte de 48 millions d'hectares soit -1 % (Tableau 8-3).

L'**Europe** dans son ensemble gagnerait 13 millions d'ha (5 %) et 18 millions d'ha (8 %) respectivement sous CC « tendanciel » et « aggravé ». Ces chiffres cachent de fortes disparités régionales. L'Europe du sud, déjà contrainte en « 2010 » verrait ses surfaces cultivables diminuer encore dans les deux scénarios de -2,6 et -6 Mha respectivement sous CC « tendanciel » et « aggravé » par rapport aux surfaces cultivables en « 2010 ». La France, le Royaume-Uni (CC « tendanciel » seulement), l'Europe de l'Est, l'Europe centrale et l'Allemagne (CC « tendanciel » seulement) perdraient également des terres cultivables, mais sur un potentiel d'expansion qui reste confortable par rapport à « 2010 ». Le Reste de l'Europe en revanche, composé essentiellement des pays de l'Europe du Nord, gagnerait 18 Mha et jusqu'à 26,3 Mha selon les deux scénario CC, représentant des augmentations de 41 et 60 % respectivement de la surface cultivable initiale.

D'autres régions du monde verraient aussi leurs surfaces cultivables augmenter de manière substantielle sous l'effet du CC, **Canada-USA** (+101 Mha sous CC « tendanciel », et +118 Mha sous CC « aggravé »); **Ex-URSS** (+115 et +141 Mha); **Chine** (+21 et +15 Mha). Il s'agit de régions situées en altitude ou sous les hautes latitudes. La **Chine**, qui était contrainte en « 2010 », verrait donc cette contrainte se desserrer sous l'effet du CC en 2050, et ce quel que soit le scénario.

Toutefois la plupart des régions perdraient des terres cultivables dans les deux scénarios. C'est le cas du **Brésil-Argentine (-54 et -149 Mha)**, du **Reste de l'Amérique (-17, -35 Mha)**, de l'**Océanie (-33, -39 Mha)**, les **deux régions de l'Afrique sub-saharienne (-42, -93 Mha)** ainsi que l'**Afrique du Nord (-9, -12 Mha)**, le **Proche et Moyen-Orient** (-**800 000 ha, -5 Mh**a). Afrique du Nord perdrait ainsi 41 et 52% de sa surface cultivable de « 2010 ». Pour ces deux dernières régions, déjà extrêmement contraintes en « 2010 », ces pertes resserrent donc davantage la contrainte de surface.

Tableau 8-3. Évolution des surfaces cultivables (SI>40) entre « 2010 » et 2050 selon les deux scénarios de CC de GAEZ

	« CC tendanciel » (SRES B2)			« CC aggravé » (SRES A1FI)		
	Surfaces potentiellement cultivables 2050 (1000ha)	Variation de surfaces potentiellement cultivables par rapport à 2010 (1000ha)	%	Surfaces potentiellement cultivables 2050 (1000ha)	Variation de surfaces potentiellement cultivables par rapport à 2010 (1000ha)	%
France	35 461	-2 119	-6%	35 632	-1 948	-5%
Allemagne	30 549	-33	0%	30 914	332	1%
Royaume-Uni	14 609	-381	-3%	15 402	412	3%
Pologne	29 593	0	0%	29 661	68	0%
Europe du Sud	32 898	-2 560	-7%	29 504	-5 954	-17%
Europe de l'Est	36 847	-92	0%	36 562	-376	-1%
Europe Centrale	12 901	-39	0%	12 778	-161	-1%
Reste de l'Europe	61 866	17 918	41%	70 301	26 353	60%
Total Europe	**254 724**	**12 695**	**5%**	**260 753**	18 725	**8%**
Canada-USA	702 826	100 763	17%	720 136	118 072	20%
Brésil-Argentine	727 035	-53 863	-7%	632 380	-148 519	-19%
Reste de l'Amérique	441 712	-17 329	-4%	423 589	-35 451	-8%
Ex-URSS	735 415	115 090	19%	761 042	140 718	23%
Chine	141 653	20 986	17%	135 674	15 008	12%
Inde	226 534	-4 522	-2%	221 320	-9 736	-4%
Reste de l'Asie	258 707	-8 643	-3%	269 266	1 916	1%
Proche et Moyen Orient	41 792	-821	-2%	37 435	-5 179	-12%
Afrique du Nord	13 058	-9 250	-41%	10 655	-11 652	-52%
Afrique de l'Ouest	267 933	-6 798	-2%	253 899	-20 832	-8%
Afrique ECS	1 086 693	-34 877	-3%	1 049 579	-71 990	-6%
Océanie	157 743	-32 704	-17%	151 290	-39 158	-21%
Reste du monde	3 348	0	0%	3 389	41	1%
Total monde	**5 059 174**	**80 728**	**2%**	**4 930 408**	**-48 039**	**-1%**

8.1.4. Les surfaces potentiellement cultivables en 2050 dans les scénarios de référence

Les analyses conduites pour élaborer les scénarios de référence de cette étude, analyses qui sont explicitées en détail notamment dans la section 5.3 de ce Rapport ainsi que dans le Chapitre 3 du Rapport de synthèse portant sur la projection des variables clefs de l'offre agricole à l'horizon 2050, montrent qu'**à l'horizon 2050, le changement climatique aurait relativement peu d'effets sur les rendements végétaux en comparaison des autres effets (évolutions techniques), et ce quelle que soit son intensité (tendanciel ou aggravé)**. En effet, l'horizon 2050 ne semble 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 ces raison, **seule la trajectoire d'évolution tendancielle du changement climatique a été retenue dans les simulations des scénarios de référence et nous retenons donc comme surfaces potentiellement cultivables uniquement la projection GAEZ correspondant au scénario GIEC SRES B2 (équivalent du scénario RCP 6.0), soit notre scénario « CC tendanciel ».**

Ainsi, pour la plupart de régions nous définissons comme surfaces cultivables maximales le potentiel de surfaces cultivables décrit dans le Tableau 8-3 ci-dessus pour le scénario « CC tendanciel ». Pour les régions dont les surfaces cultivées en « 2010 » dépassaient déjà ce potentiel de 2050, autrement dit l'**Europe du Sud**, l'**Afrique du Nord** et le **Proche et Moyen-Orient**, et pour lesquelles nous avons considéré que leurs surfaces cultivables dans la situation initiale correspondaient à leurs surfaces cultivées en « 2010 », nous avons procédé à un ajustement pour prendre en compte la variation absolue des surfaces potentiellement cultivables plutôt que le niveau absolu en 2050. La contrainte de terres dans ces zones en 2050 est donc égale aux surfaces cultivées de « 2010 » diminuées de la variation absolue en hectares (entre « 2010 » et 2050) des surfaces potentiellement cultivables estimées par GAEZ (Tableau 8-4).

Tableau 8-4. Surfaces cultivées en « 2010 » et surfaces potentiellement cultivables dans les différentes régions du monde telles que définies pour les scénarios de référence

	Surfaces cultivées « 2010 » (1000 ha)	Surfaces potentiellement cultivables 2050 (1000ha)	Potentiel d'expansion de terres par rapport aux surfaces cultivées « 2010 » (1000ha)	%
France	19 292	35 461	16 169	84%
Allemagne	12 088	30 549	18 461	153%
Royaume-Uni	6 072	14 609	8 538	141%
Pologne	11 715	29 593	17 877	153%
Europe du Sud	35 972	**33 429**	**-2 542**	-7%
Europe de l'Est	20 260	36 847	16 587	82%
Europe Centrale	6 517	12 901	6 383	98%
Reste de l'Europe	15 175	61 866	46 691	308%
Total Europe	**127 092**	**255 255**	**128 163**	101%
Canada-USA	193 234	702 826	509 592	264%
Brésil-Argentine	116 143	727 035	610 892	526%
Reste de l'Amérique	68 767	441 712	372 946	542%
Ex-URSS	201 947	735 415	533 468	264%
Chine	122 537	143 531	20 995	17%
Inde	169 442	226 534	57 091	34%
Reste de l'Asie	171 957	258 707	86 750	50%
Proche et Moyen Orient	57 183	**56 367**	**-816**	-1%
Afrique du Nord	28 283	**19 033**	**-9 249**	-33%
Afrique de l'Ouest	98 490	267 933	169 444	172%
Afrique ECS	134 134	1 086 693	952 559	710%
Océanie	47 919	157 743	109 824	229%
Reste du monde	2 273	3 348	1 076	47%
Total monde	**1 539 399**	**5 082 133**	**3 542 734**	230%

8.1.5. Comparaison avec les surfaces potentiellement cultivables selon la FAO (2012, 2018)

Alexandratos et Bruinsma (2012) considèrent que ce potentiel de surfaces « maximales » cultivables s'élève à 4,5 milliards d'hectares au niveau mondial (Tableau 8-5), ce qui est proche du chiffre de 4,9 milliards que nous utilisons[124]. Ils considèrent qu'il reste, une fois les surfaces déjà cultivées soustraites, 3,2 milliards d'hectares de surfaces potentiellement cultivables (vs 3,4 milliards d'ha dans AE2050). Cependant, certaines surfaces potentiellement cultivables sont actuellement occupées par

[124] La différence constatée avec le chiffre GlobAgri-AE2050 de 4,9 milliards d'hectares provient sans doute du fait qu'ils ne prennent en compte que les cultures alimentaires et excluent les cultures fourragères.

de la forêt ou des surfaces artificialisées. Les auteurs nuancent donc le potentiel de surfaces cultivables au niveau mondial en lui ôtant les surfaces en forêts (1601 Mha), les zones protégées (107 Mha) et les surfaces artificialisées (116 Mha). Ainsi, le potentiel de terres cultivables ne s'élève plus qu'à 1,4 milliards d'hectares soit 44 % des surfaces potentiellement cultivables de départ. L'assiette retenue pour définir les « surfaces cultivables » (i.e. en excluant ou non les surfaces actuellement utilisées à d'autres fins que l'agriculture) peut donc avoir des conséquences importantes sur les résultats des simulations dans certaines régions.

Tableau 8-5. Surfaces totales et potentiellement cultivables (Alexandratos et Bruinsma 2012)

Table 4.6 Land with rain-fed crop production potential (world; million ha)

	Total	Potential	VS**	S	MS	mS	vmS	NS
Total land*	13 295	4 495	1 315	2 187	993	1 111	1 627	6 061
of which in agricultural use (1999/2001)	1 559	1 260	442	616	201	120	104	75
of which rain-fed land	1 283	1 063	381	516	166	93	84	43
of which irrigated land	276	197	61	100	35	27	20	32
Gross balance of land with rain-fed potential		3 236	873	1 571	792	991	1 523	
Under forest	3 736	1 601	453	854	293	342	530	1 263
Strictly protected land***	638	107	30	50	27	39	59	432
Built-up land	152	116	41	61	14	12	10	15
Net balance of land with rain-fed potential		1 412	349	606	458	598	923	

Source: GAEZ-v3.0 in Fischer *et al.* (2011).

* Crops considered: cereals, roots and tubers, sugar crops, pulses and oil-bearing crops.

** Suitability classes are defined according to attainable yields as a percentage of the maximum constraint-free yield as follows: VS=Very Suitable, 80-100%, S=Suitable, 60-80%, MS= Moderately Suitable, 40-60% mS=marginally Suitable, 20-40%, vmS=very marginally Suitable, 5-20%, NS=Not Suitable, <5%; Prime land = VS and Good land = S + MS.

*** Of land at present not cultivated, under forest or built-up.

Le rapport plus récent de la FAO (FAO, 2018) retient un critère de *suitability* plus contraignant (SI>80) que le rapport d'Alexandratos et Bruinsma (2012) pour définir les surfaces potentiellement cultivables. Ceci conduit logiquement à une réduction très importante des surfaces considérées comme potentiellement cultivables. Entre les deux rapports, le potentiel d'expansion pour les cultures est ainsi diminué de 1 milliard d'hectares. La FAO (2018) ne justifiant pas ce changement de critère pour estimer les surfaces potentiellement cultivables futures, nous faisons l'hypothèse que ce choix traduit le fait que seules les terres SI>80 permettraient de soutenir les hypothèses d'évolutions techniques sur les rendements.

Dans l'étude AE2050, afin de discuter des implications de la possible extension future des surfaces cultivables sur les autres usages des terres, nous avons décidé de nuancer le potentiel de surfaces cultivables disponibles en réalisant *a posteriori*, sous la forme d'analyses de sensibilité, des simulations prenant en compte l'empiètement possible de l'agriculture sur des surfaces actuellement dédiées à d'autres usages/occupations.

8.2. Surfaces potentiellement cultivables dans les analyses de sensibilité

Comme évoqué précédemment, les surfaces cultivables telles que définies dans les scénarios de référence correspondent aux surfaces potentiellement cultivables considérant les conditions agro-climatiques et édaphiques locales. On suppose donc qu'il n'y a pas de restrictions ni d'obstacles à cultiver ces terres, qu'ils soient d'ordre économique, technique, politique, social, etc., et ce, quel qu'en soit l'usage actuel (cultures, forêts, terres de parcours, pâtures, zones protégées, artificialisées). De plus, la dégradation des terres au cours du temps et sous l'effet du CC n'est pas prise en compte dans la procédure GAEZ. Les surfaces précédemment dénommées « potentiellement cultivables » sont donc en quelque sorte des surfaces « maximales » cultivables.

Afin de tester la sensibilité des résultats des scénarios de référence à la caractérisation des surfaces potentiellement cultivables en 2050, des analyses de sensibilité ont été conduites en adoptant des définitions plus restrictives de la contrainte en terres.

La première consiste à exclure des surfaces considérées comme « potentiellement cultivables » celles qui sont actuellement (en « 2010 ») boisées, et celles qui sont susceptibles d'être perdues du fait de la progression de l'urbanisation à l'horizon 2050. Les sections ci-après présentent les méthodes adoptées pour estimer ces surfaces cultivables « hors forêt et urbanisation ».

La seconde, plus restrictive, consiste à définir les surfaces cultivables de 2050 comme les surfaces cultivées en « 2010 ».

8.2.1. Méthodologie d'estimation des surfaces potentiellement cultivables occupées par de la forêt en « 2010 »

Afin de pouvoir déduire les surfaces actuellement boisées des surfaces potentiellement cultivables estimées par GAEZ pour 2050, nous avons besoin de connaître le caractère cultivable ou non (l'indice SI) des surfaces actuellement en forêts. Les données GAEZ ne donnent pas directement cette information[125]. Selon Alexandratos et Bruinsma (2012), 43% des surfaces actuelles en forêts sont cultivables au niveau mondial. Pour les détails au niveau régional sur les surfaces actuelles en forêts, nous nous appuyons sur les données indiquées dans Fischer et al. (2012b)[126], qui présentent la part des forêts *non protégées* situées sur des terres actuellement cultivables (« *prime land* » and « *good land* ») pour 20 régions. Nous utilisons ces données pour calculer une approximation des surfaces en forêts « cultivables » pour chaque région AE2050, en appliquant cette part aux données de surfaces actuelles en forêt GAEZ[127].

C'est avec les surfaces en forêts sur les terres (SI>40) en milliers d'hectares ainsi obtenues (Tableau 8-6) que nous proposons de nuancer le potentiel de surfaces cultivables dans chaque région AE2050 en 2050. On considère que les surfaces cultivables en forêts n'évoluent pas entre « 2010 » et 2050, ce qui revient à supposer que les surfaces forestières ne diminuent pas (pas de déforestation ni de diminution des surfaces forestières en lien avec le CC sous l'action d'incendie ou d'attaques de ravageurs) et que l'on n'effectue pas non plus de reforestation dans le futur. Ceci semble cohérent avec l'idée générale d'un scénario de changement climatique tendanciel.

La déduction des surfaces actuellement boisées des surfaces potentiellement cultivables a pour effet de renforcer la contrainte de terres dans les régions déjà contraintes mais aussi dans d'autres régions non contraintes en 2009-2011. Ainsi, dans certaines régions une extension de la surface cultivée « 2010 » dans nos scénarios de référence conduirait directement à de la déforestation : ceci est le cas pour l'Europe du sud, le Proche et Moyen Orient et l'Afrique du Nord, déjà contraintes. Mais c'est désormais également le cas pour la Chine et le Reste de l'Asie pour lesquelles la somme des surfaces cultivées « 2010 » et des surfaces actuellement boisées dépasse le niveau des surfaces cultivables en 2050. On voit aussi que les potentialités d'étendre les surfaces cultivées sans empiéter sur les forêts sont limitées dans d'autres régions comme l'Inde mais aussi en Europe centrale.

Les aires protégées autres que la forêt ne sont pas exclues des surfaces potentiellement cultivables faute de données appropriées. En effet, GAEZ donne par pays l'ensemble des surfaces protégées en 2000 en km², cependant il ne nous est pas possible d'en déduire directement les surfaces protégées qui seraient aussi cultivables. Or toutes les zones protégées ne sont pas nécessairement cultivables (haute montagne par exemple). Loucks *et al.* (2008) montrent que le potentiel agricole d'une terre explique mal son caractère protégé ou non au niveau global mais est corrélé dans certaines régions (Amérique latine, plaque eurasiatique, Asie du sud sud-est).

Les prairies ne peuvent pas non plus être exclues des surfaces potentiellement cultivables. En effet, la catégorie GAEZ « woodlands/grasslands » recouvre une diversité d'occupations des sols sans qu'il soit possible d'identifier la part exacte des prairies. De plus, le modèle GlobAgri-AE2050 exclut les prairies permanentes de la contrainte de terre. Nous n'avons pas non plus d'éléments quantifiés permettant de prendre en compte la dégradation des sols.

[125] Nous connaissons simplement la part des surfaces totales émergées selon différents usages indépendamment de leur qualité « propre » ou « impropre » à l'agriculture.

[126] Tableau 6 du Fischer et al (2012a). *Cf.* Annexe 8.5.

[127] On suppose implicitement que la répartition des forêts protégées entre les différentes catégories de *suitability* est la même que celles des surfaces en forêts non protégées. On doit également faire des hypothèses de correspondances entre les zones AE2050 et les zones Fischer et al. (2012a).

Tableau 8-6. Surfaces cultivables (1000 ha)

	Surfaces en Forêts en 2050 (GAEZ v3.0)	**% Forêts sur "*prime land+ good land*" (SI>40)** Fischer (2012b)	**Surfaces en Forêts sur "*prime land+ good land*" (SI>40) en 2050**
France	15 284	31	4 738
Allemagne	11 010	31	3 413
Royaume-Uni	2 696	11	297
Pologne	9 044	27	2 442
Europe du Sud	40 484	17	6 882
Europe de l'Est	14 060	27	3 796
Europe Centrale	9 709	31	3 010
Reste de l'Europe	67 973	11	7 477
Total Europe	**170 260**	**19%**	**32 055**
Canada-USA	609 346	38	231 551
Brésil-Argentine	527 033	64	337 301
Reste de l'Amérique	411 814	49	201 789
Ex-URSS	836 368	27	225 819
Chine	171 943	22	37 827
Inde	66 211	29	19 201
Reste de l'Asie	268 923	33	88 744
Proche et Moyen Orient	13 703	21	2 878
Afrique du Nord	5 278	37	1 953
Afrique de l'Ouest	56 243	46	25 872
Afrique ECS	458 617	74	340 699
Océanie	129 998	46	59 799
Reste du monde	366	0	0
Total monde	**3 726 102**	**43%**	**1 605 489**

8.2.2. Méthodologie d'estimation des surfaces potentiellement cultivables susceptibles d'être artificialisées entre « 2010 » et 2050

Plusieurs sources de données concernant l'extension des surfaces artificialisées ont été identifiées par les experts scientifiques[128]. Nous avons retenu la publication la plus récente, celle de Bren D'Amour *et al.* (2017) qui présente une méthodologie claire, détaillée et scientifiquement approuvée. Bren d'Amour *et al.* (2017) calculent des pertes de surfaces cultivées en 2000 liées à l'extension urbaine entre 2000 et 2030. Il s'agit donc de nouvelles surfaces urbanisées par rapport aux surfaces déjà urbanisées en 2000. Pour cela, les auteurs croisent les données de Seto *et al.* (2012) qui étudient l'extension urbaine entre 2000 et 2030, et les données de surfaces cultivées de Fritz *et al.* (2015)[129]. Ces projections sont toutefois réalisées pour l'horizon 2030. Pour les besoins de la présente étude, et faute de données supplémentaires, nous utilisons ces projections 2030 pour caractériser l'évolution de l'urbanisation à l'horizon 2050. Il faut donc considérer notre estimation des surfaces nouvellement urbanisées entre « 2010 » et 2050 comme une hypothèse « *a minima* » (fourchette basse).

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 (Tableau 8-7). Ce « grignotage » des surfaces cultivables par l'urbanisation serait proportionnellement le plus

[128] Fischer *et al.* (2002), Zhang et Caï (2011), Bren D'Amour *et al.* (2017). *Cf.* Section 5 du rapport du volet d'analyse bibliographique de l'étude.

[129] Les données détaillées par pays nous ont été communiquées par les auteurs.

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 %). En Europe, environ 1,6 Mha de surfaces potentiellement cultivables seraient concernées, soit 0,6 %.

Tableau 8-7. Part des surfaces potentiellement cultivables en 2050 susceptibles d'être nouvellement urbanisées entre « 2010 » et 2050

	Surfaces potentiellement cultivables en 2050 telles que définies dans les scénarios de référence (1000 ha)	**Extension potentielle des surfaces urbanisées sur les surfaces cultivables entre « 2010 » et 2050** (1000 ha)	**Surfaces cultivables nouvellement urbanisées entre « 2010 » et 2050** (en % des surfaces potentiellement cultivables)
France	35 461	132	0,4%
Allemagne	30 549	348	1,1%
Royaume-Uni	14 609	388	2,7%
Pologne	29 593	13	0,0%
Europe du Sud	33 429	433	1,3%
Europe de l'Est	36 847	23	0,1%
Europe Centrale	12 901	45	0,3%
Reste de l'Europe	61 866	174	0,3%
Total Europe	**255 255**	**1 556**	**0,6%**
Canada-USA	702 826	1 816	0,3%
Brésil-Argentine	727 035	1 309	0,2%
Reste de l'Amérique	441 712	1 545	0,3%
Ex-URSS	735 415	648	0,1%
Chine	143 531	7 631	5,3%
Inde	226 534	3 413	1,5%
Reste de l'Asie	258 707	4 631	1,8%
Proche et Moyen-Orient	56 367	1 537	2,7%
Afrique du Nord	19 033	1 350	7,1%
Afrique de l'Ouest	267 933	2 527	0,9%
Afrique ECS	1 086 693	1 755	0,2%
Océanie	157 743	67	0,0%
Reste du monde	3 348	0	0,0%
Total monde	**5 082 133**	**29 785**	**0,6%**

8.2.3. Bilan : surfaces potentiellement cultivables en 2050 hors surfaces boisées et nouvellement artificialisées

Le Tableau 8-8 présente les surfaces potentiellement cultivables retenues dans l'analyse de sensibilité qui empêche l'extension des surfaces cultivées sur des surfaces boisées en « 2010 » ou nouvellement artificialisées à l'horizon 2050.

Le potentiel d'expansion des surfaces cultivées par rapport à celles de la situation initiale s'élève ici à 1,9 Md ha dans le monde dont 95 Mha en Europe par rapport à 3,5 Md ha et 128 Mha respectivement dans les scénarios de référence. Le potentiel est donc réduit par rapport aux scénarios de référence, mais reste significatif. Il est cependant très inégalement réparti entre les régions. Celles qui étaient déjà contraintes se voient de nouveau pénalisées et celles qui disposaient d'un potentiel significatif garde souvent de la marge de manœuvre.

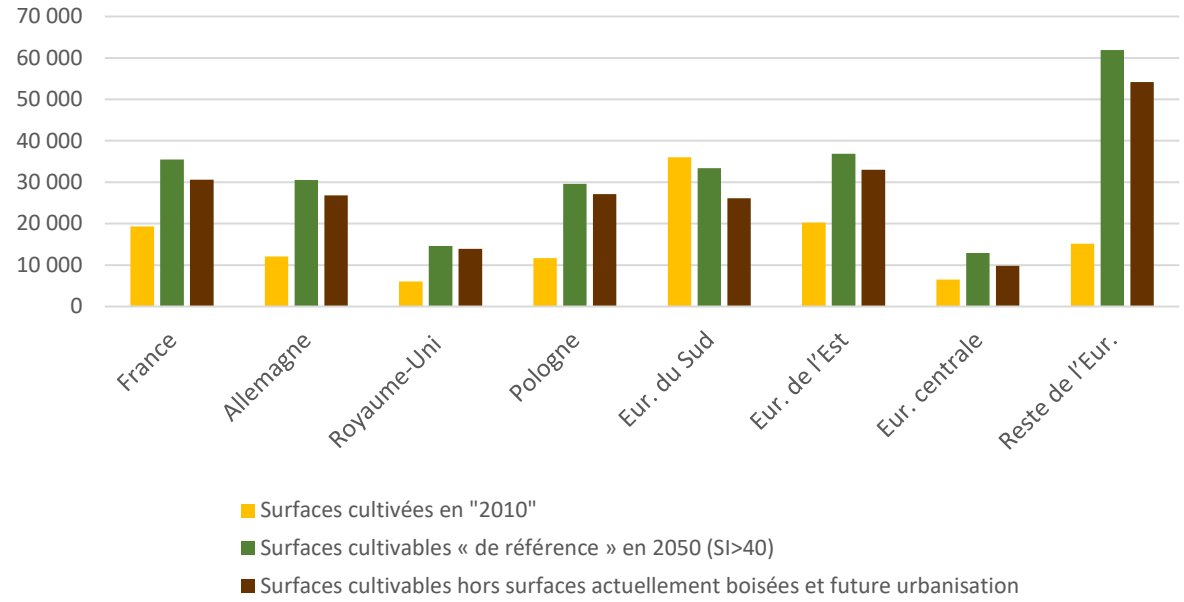
L'Europe du Sud se voit donc amputée de presque 10 Mha par rapport aux surfaces cultivées en « 2010 » dans cette analyse, la Chine perd 24,5 Mha, le Reste de l'Asie 6,6 Mha et les deux régions les plus contraintes que sont Afrique du Nord et le Proche et Moyen-Orient perdent 12,6 et 5,2 Mha respectivement (Tableau 8-8, Figure 8-1).

Tableau 8-8. Surfaces potentiellement cultivables en 2050 avec exclusion des surfaces actuelles en forêts et des surfaces supposées urbanisées en 2050

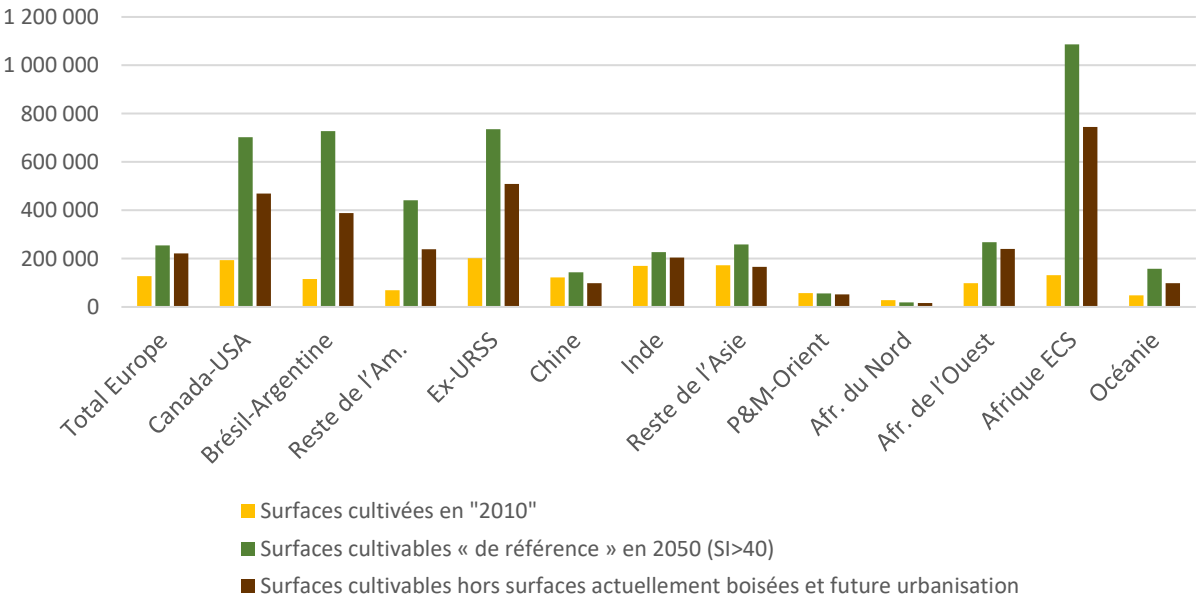
	Surfaces cultivables « de référence » en 2050 (SI>40)	Surfaces cultivables boisées en « 2010 »	Extension potentielle des surfaces urbanisées sur les surfaces cultivables entre « 2010 » et 2050	Surfaces potentiellement cultivables hors surfaces actuellement boisées et future urbanisation	Différence avec les surfaces potentiellement cultivables définies pour les scénarios de référence	Potentiel d'extension par rapport aux surfaces cultivées « 2010 »
France	35 461	4 738	132	30 591	-4 870	11 299
Allemagne	30 549	3 413	348	26 788	-3 761	14 700
Royaume-Uni	14 609	297	388	13 925	-684	7 853
Pologne	29 593	2 442	13	27 138	-2 455	15 423
Europe du Sud	33 429	6 882	433	26 114	-7 315	**- 9 858**
Europe de l'Est	36 847	3 796	23	33 028	-3 819	12 768
Europe Centrale	12 901	3 010	45	9 845	-3 056	3 328
Reste de l'Europe	61 866	7 477	174	54 215	-7 651	39 040
Total Europe	**255 255**	**32 055**	**1 556**	**221 644**	-33 611	**94 552**
Canada-USA	702 826	231 551	1 816	469 459	-233 367	276 225
Brésil-Argentine	727 035	337 301	1 309	388 426	-338 609	272 283
Reste de l'Amérique	441 712	201 789	1 545	238 378	-203 334	169 611
Ex-URSS	735 415	225 819	648	508 948	-226 467	307 001
Chine	143 531	37 827	7 631	98 073	-45 458	**- 24 464**
Inde	226 534	19 201	3 413	203 919	-22 615	34 477
Reste de l'Asie	258 707	88 744	4 631	165 331	-93 376	**- 6 626**
Proche et Moyen-Orient	56 367	2 878	1 537	51 953	-4 414	**- 5 230**
Afrique du Nord	19 033	1 953	1 350	15 731	-3 302	**- 12 552**
Afrique de l'Ouest	267 933	25 872	2 527	239 534	-28 399	141 044
Afrique ECS	1 086 693	340 699	1 755	744 239	-342 454	610 105
Océanie	157 743	59 799	67	97 878	-59 865	49 959
Reste du monde	3 348	0	0	3 348	-4 870	1 075
Total monde	**5 082 133**	**1 605 488**	**29 785**	**3 446 861**	-3 761	**1 907 462**

Figure 8-1. Surfaces cultivées en « 2010 » et surfaces cultivables en 2050 incluant ou non les surfaces actuellement boisées et potentiellement urbanisées (1000 ha)

a. régions européennes



b. Autres régions du monde



Références citées

Agabriel J., Veysset P. (2015). Manques à produire et pertes alimentaires dans la filière viande bovine. Innovations Agronomiques 48, 241-260.

Alexandratos N., Bruinsma J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome: FAO.

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, 37-56.

Beets W.C. (1982). Multiple cropping and tropical farming systems. Aldershot, UK: Gower.

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.

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.

Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X., Huard F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. Field Crops Research, 119 (1): 201-202.

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.

Danish Agriculture & Food Council (2018). Danish pig production in a European context. A benchmarking exercise: Denmark, UK, Holland and Germany. https://www.lf.dk/~/media/lf/Aktuelt/Publikationer/Svinekod/LFEUBenchUK110318.ashx

Deinum B., Van Es A.J.H., van Soest P.J. (1968). Climate, nitrogen and grass. II. 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.

Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979) Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage, Paper 33, Rome, FAO, 193 p.

European Commission (2017). EU agricultural outlook for markets and income, 2017-2030. European Commission, DG Agriculture and Rural Development, Brussels.

FAO (1996). Agro-ecological zoning: Guidelines. FAO Soils Bulletin No. 73. Food & Agriculture Organization, 1996.

FAO (2018). The Future of Food and Agriculture. Alternative Pathways to 2050. FAO: Rome, 224 p.

Fischer, G., Van Velthuizen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results.

Fischer, G., Nachtergaele, F. O., Prieler, S., Teixeira, E., Tóth, G., Van Velthuizen, H., ... & Wiberg, D. (2012a). Global agro-ecological zones (GAEZ v3. 0)-model documentation. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gaez/docs/GAEZ_Model_Documentation.pdf

Fischer G., Hizsnyik E., Prieler S., van Velthuizen H., Wiberg, D. (2012b). 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. 2012b

Fritz, S., See, L., McCallum, I., You, L., Bun, A., Moltchanova, E., ... & Havlik, P. (2015). Mapping global cropland and field size. *Global change biology*, *21*(5), 1980-1992.

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

IFIP (2018). GTE : Evolution des résultats moyens nationaux - naisseurs-engraisseurs ; Average National GTE results - breeding and feeding herds. https://www.ifip.asso.fr/PagesStatics/resultat/pdf/retro/gte03.pdf

International Energy Agency (2016). World Energy outlook 2016. OECD/IEA, 2016. www.worldenergyoutlook.org.

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 (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.

ITAVI (2017a). Performances techniques et coûts de production en volailles de chair, résultats 2016. ITAVI, octobre 2017.

ITAVI (2017b). Performances techniques et coûts de production en poulettes et poules pondeuses, résultats 2016. ITAVI, octobre 2017.

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., 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., Schmitt B. (eds) (2018). Food Dependency in the Middle East & North Africa Region. Retrospective Analysis and Projections to 2050. Quae-Springer, 123 p.

Loucks, C., Ricketts, T. H., Naidoo, R., Lamoreux, J., & Hoekstra, J. (2008). Explaining the global pattern of protected area coverage: relative importance of vertebrate biodiversity, human activities and agricultural suitability. *Journal of Biogeography*, *35*(8), 1337-1348.

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.

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.

OCDE/FAO (2018). OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, Éditions OCDE, Paris/FAO, Rome, https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en

Ray D.K., Foley J.A. (2013). Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. Environmental Research Letters 8 044041.

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.

Seto KC, Güneralp B, Hutyra LR (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. PNAS 109 40: 16083–16088

Steduto P., Hisao T.C., Fereres E., Raes D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Rome, FAO

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/

Van Horne P.L.M. (2017). Competitiveness of the EU poultry meat sector, base year 2015, International comparison of production costs. Wageningen Economic Research, January 2017.

Van Horne P.L.M., Bondt N. (2017). Competitiveness of the EU egg sector, base year 2015, International comparison of production costs. Wageningen Economic Research, June 2017.

World Health Organization (2015). Guideline: Sugars intake for adults and children. Geneva. 49p. http://www.who.int/nutrition/publications/guidelines/sugars_intake/en/

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.

Zhang X., Cai X. (2011). Climate change impacts on global agricultural land availability. Environ. Res. Lett. 6 (2011) 014014 (8pp)

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