Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale

Anaïs Tibi, Philippe Debaeke, Tamara Ben Ari, Annette Bérard, Antonio Bispo, Alain Charcosset, Jean-Louis Durand, Jacques Le Gouis, David Makowski, Hélène Marrou, et al.

▶ **To cite this version:**

Anaïs Tibi, Philippe Debaeke, Tamara Ben Ari, Annette Bérard, Antonio Bispo, et al.. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale : Effets du changement climatique sur la production agricole végétale : synthèse de la littérature scientifique internationale pour documenter les projections des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050. [0] INRAE. 2020, 144 p. hal-03170700

HAL Id: hal-03170700
https://hal.inrae.fr/hal-03170700

Submitted on 16 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INRAE

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

Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale

Rapport du volet d'analyse bibliographique 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

Effets du changement climatique sur la production agricole végétale : synthèse de la littérature scientifique internationale pour documenter les projections des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050

Juin 2020

Coordinateurs : Anaïs Tibi, Philippe Debaeke

Co-auteurs : Tamara Ben-Ari, Annette Berard, Antonio Bispo, Alain Charcosset, Jean-Louis Durand, Jacques Le Gouis, David Makowski, Helene Marrou, Serge Planton, Eric Sauquet, Serge Savary, Laetitia Willocquet, Hervé Guyomard, Bertrand Schmitt

Pour citer ce document :

Tibi A., Debaeke P. (coordinateurs), Ben-Ari T, Berard A, Bispo A, Charcosset A, Durand J-L, Le Gouis J, Makowski D, Marrou H, Planton S, Sauquet E, Savary S, Willocquet L, Guyomard H, Schmitt B (2020). Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire. Volet d'analyse bibliographique de l'étude, Inrae (France), 144p.

Sommaire

Introduction ... 5

Composition du groupe de travail ... 7

Chapitre 1. Changement climatique : manifestations et évolutions à l'horizon 2050 ... 9

1.1. Évolution future de la température moyenne annuelle de surface ... 10

1.2. Évolution future des précipitations moyennes annuelles ... 12

1.3. Évolution de la ressource en eau disponible ... 13

1.3.1. Évolution des écoulements ... 13

1.3.2. Évolution de l'humidité du sol ... 16

1.4. Conclusion opérationnelle pour la caractérisation du changement climatique dans l'étude AE2050 ... 17

1.5. Hypothèses d'évolution de la disponibilité hydrique pour les cultures sous l'effet du changement climatique à l'horizon 2050 formulées dans l'étude AE2050 ... 18

Références citées dans le Chapitre 1 ... 20

Chapitre 2. Principaux effets du changement climatique sur la production agricole végétale : mécanismes physiologiques, estimations et incertitudes associées ... 21

2.1. Contexte et objectif ... 21

2.1.1. Résumé des principaux mécanismes d'action du climat sur la production ... 21

2.1.2. Mécanismes d'adaptation ... 22

2.1.3. Méthodes pour étudier l'impact du changement climatique ... 23

2.1.4. Objectif de notre analyse ... 24

2.2. Matériels et méthodes ... 25

2.2.1. Recherche bibliographique ... 25

2.2.2. Sélection des références ... 25

2.2.3. Extraction des données ... 25

2.2.4. Analyse statistique ... 28

2.3. Résultats et discussion ... 29

2.3.1. Effets marginaux des changements de température, précipitation, concentration en CO_2 et de l'adaptation incrémentale ... 29

2.3.2. Estimation de l'effet combiné de changements de température et de teneur en CO2 sur les cultures C3 ... 31

2.3.3. Estimation de l'effet du changement climatique sur maïs, blé, soja, riz ... 33

2.3.4. Comparaison avec des rapports internationaux sur le changement climatique ... 37

2.4. Conclusion ... 38

Références citées dans le Chapitre 2 ... 40

Annexes du Chapitre 2 ... 43

Chapitre 3. Effets écophysiologiques du CO_2 sur les cultures : focus sur les incertitudes associées à leur expression au champ à l'horizon 2050 54
3.1. Les évolutions possibles de la teneur en CO2 d'ici 2050 54
3.2. Recherche documentaire sur l'effet du CO2 sur les rendements des principales cultures. 55
3.3. Bases écophysiologiques de l'impact du CO_2 sur les rendements 55
3.3.1. Le CO_2 affecte la photosynthèse et la transpiration 55
3.3.2. Conséquences de l'augmentation du taux de photosynthèse et de la diminution de la transpiration sur la production de biomasse et les rendements 57
3.4. Évaluation de l'impact de la teneur en CO2 sur les rendements sur la base de dispositifs expérimentaux 58
3.4.1. Dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier les conséquences de l'augmentation de la teneur en CO2 sur les rendements 58
3.4.2. Résultats 59
3.5. Évaluation de la capacité des modèles numériques à simuler l'impact de la teneur en CO_2 sur les rendements 61
3.5.1. Les différents modèles utilisés 61
3.5.2. Les modèles simulent des réponses des rendements à l'élévation de la teneur en CO2 globalement conformes aux expérimentations 62
3.6. Conclusion 62
Références citées dans le Chapitre 3 63

Chapitre 4. Évolutions techniques 68
4.1. Les rendements dans la situation initiale « 2010 » 68
4.2. Evolutions des rendements à l'horizon 2050 sous l'influence des évolutions techniques 69
4.3. Les rendements dans la situation finale 2050 72

Chapitre 5. Adaptation des systèmes agricoles au changement climatique 74
5.1. Introduction : définition et classification des adaptations au changement climatique en agriculture 74
5.2. Constitution du corpus bibliographique 76
5.3. Analyses des scénarios d'adaptation rapportés dans la littérature 76
5.3.1. Zones géographiques et espèces couvertes 76
5.3.2. Méthodes mises en œuvre et types de messages 78
5.3.3. Capacité adaptative des exploitations agricoles 80
5.3.4. Recensement et classification des adaptations proposées 81
5.4. Synthèse des effets des principales adaptations identifiées 82
5.4.1. Déplacement des zones de production 82
5.4.2. Intensification des cultures par recours augmenté aux fertilisants et/ou aux pesticides 83
5.4.3. Diversification des rotations et des systèmes d'exploitation 84
5.4.4. Pratique de l'agriculture de conservation ou d'un travail du sol optimisé pour augmenter la capacité de stockage en eau du sol 85
5.5. Conclusion 86
Références citées dans le Chapitre 5 87

Chapitre 6. Évolution de la disponibilité en terres agricoles à l'horizon 2050 91

6.1. Introduction – objectifs initiaux : quelle évolution des surfaces de terres agricoles disponibles et de leur qualité à l'horizon 2050 ? 91

6.2. Constitution et analyse du corpus bibliographique 91

6.2.1. Requêtes initiales et tri 91

6.2.2. Sélection des références et grille de lecture 92

6.2.3. Premier diagnostic 93

6.3. État actuel des usages des terres, évolutions passées et potentialités 93

6.3.1. Définitions 93

6.3.2. Quelles surfaces sont actuellement utilisées, pour quels usages et quelles sont les tendances d'évolution de ces surfaces ? 95

6.3.3. Quelles surfaces sont potentiellement cultivables ? 97

6.4. Évolution des terres potentiellement cultivables à l'horizon 2050 99

6.4.1. Comparaison des hypothèses retenues par les principales études dans la littérature 99

6.4.2. Évolution de la disponibilité des terres pour l'agriculture : éléments quantitatifs 101

6.5. Autres facteurs réduisant les surfaces de terres disponibles pour l'agriculture 104

6.5.1. La dégradation des terres 104

6.5.2. La dégradation des sols : une étape de la dégradation des terres 109

6.5.3. La hausse du niveau des mers 114

6.5.4. L'urbanisation 114

6.5.5. La progression des aires protégées 115

6.6. Tenter de prendre en compte la dégradation des terres agricoles pour l'estimation des surfaces futures ? 116

6.6.1. Difficultés à réaliser ces estimations de dégradation des terres au niveau régional 117

6.6.2. Quelques pistes possibles de démarches à développer ? 117

6.7. Conclusion 118

6.7.1. Analyse critique de la littérature 118

6.7.2. Des données opérationnelles pour l'étude 119

6.7.3. Conclusion finale 120

Références bibliographiques citées dans le Chapitre 6 121

Chapitre 7. Éclairages complémentaires 125

7.1. Effets du changement climatique sur les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs des cultures : focus sur le blé d'hiver 125

7.2. Quantification du progrès génétique sur les rendements des cultures : exemple du blé et du maïs 128

7.2.1. Rappels (introduction) 128

7.2.2. Quantification du progrès génétique sur les données historiques 129

7.2.3. Peut-on projeter le progrès génétique à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique ? 133

Annexes de la Section 7.2 136

Références citées dans le Chapitre 7 142

Introduction

Le présent rapport rassemble les revues de la littérature scientifique internationale réalisées par le collectif d'experts scientifiques constitué dans le cadre de l'étude « Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire » (ci-après désignée par l'acronyme AE2050).

Pour rappel, l'étude AE2050 consiste à examiner, au moyen d'un modèle de bilans (GlobAgri-AE2050[1]), l'évolution des surfaces, des niveaux de productions, et des échanges mondiaux de produits agricoles à l'horizon 2050 dans chacune des régions du monde[2], en fonction (i) de celle de la demande en produits agricoles (notamment liée à la croissance démographique et aux évolutions des régimes alimentaires) et (ii) des caractéristiques clefs des systèmes agricoles que sont les rendements (végétaux et animaux), les intensités culturales[3] et les disponibilités en terres. On cherche, dans cette étude, à intégrer autant que possible les effets du changement climatique dans la projection des variables clefs décrivant les systèmes agricoles.

Les **mécanismes** généraux qui sous-tendent les effets du climat sur la production agricole sont aujourd'hui assez bien connus, comme en témoigne l'évolution, d'un rapport au suivant, du niveau de confiance attribué par les experts du GIEC[4] aux connaissances relatives à ces questions. La **quantification** régionale des effets attendus du changement climatique à différents horizons temporels sur les productions agricoles demeure néanmoins très incertaine. Aux effets « moyens » du changement climatique s'ajoutent ceux des événements extrêmes (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, etc.), dont la fréquence et l'intensité devraient globalement augmenter à l'avenir. Par définition plus ponctuels, plus localisés et moins prévisibles, les impacts à long terme de ces événements sur les activités agricoles sont donc encore plus difficiles à appréhender.

Ce volet d'analyse critique de la littérature scientifique internationale vise en premier lieu à alimenter le travail de projection à l'horizon 2050 des variables d'entrée du modèle GlobAgri-AE2050 relatives aux systèmes de culture. Son objectif central est donc de **synthétiser les connaissances sur les effets du changement climatique sur la production agricole** dans le but de caractériser l'incertitude associée à ces effets. Compte tenu du rôle clef de la variable « rendements végétaux » dans GlobAgri-AE2050, l'analyse bibliographique a porté prioritairement sur celle-ci. Elle a également permis de **quantifier l'évolution à l'horizon 2050 de la disponibilité en terres cultivables sous les effets du changement climatique**.

La température annuelle, la pluviométrie et la concentration atmosphérique en CO_2 sont les principaux paramètres climatiques dont les variations affectent directement le développement des végétaux. La disponibilité en eau pour l'irrigation est également affectée par l'évolution des autres paramètres du bilan hydrique (notamment les écoulements et l'humidité du sol). Le premier chapitre de ce rapport décrit les manifestations du changement climatique à l'horizon 2050 en termes de variation de différents paramètres, et conclut sur une proposition de caractérisation de scénarios de changement climatique à l'horizon 2050 adaptée aux besoins de la présente étude.

La littérature fournit des quantifications (obtenues par expérimentation ou modélisation) des effets des variations des trois paramètres climatiques clefs sur les rendements des cultures. Peu d'études considèrent conjointement les trois paramètres climatiques clefs et leurs interactions pour une large gamme de cultures et de régions. De plus, la combinaison des modèles de climat et des modèles de culture utilisés peut conclure, selon les modèles et les hypothèses retenues, à des estimations très variables. Une analyse quantitative de type méta-analyse des données publiées a été conduite dans le cadre de l'étude. Ses résultats, présentés dans le chapitre 2, ont permis d'établir des modèles prédictifs de l'évolution des rendements végétaux sous les effets conjoints des variations de température, de pluviométrie et de concentration en CO_2.

[1] Les principes de fonctionnement du modèle GlobAgri-AE2050 et les méthodologies utilisées dans l'étude pour établir les projections à l'horizon 2050 de ses variables et paramètres d'entrée sont décrits dans le Rapport technique de l'étude.

[2] Découpé ici en 21 régions, dont 8 régions en Europe.

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

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

Outre les effets directs des variations de la température et de la pluviométrie sur les rendements, une attention particulière est portée dans le chapitre 3 à l'explicitation des mécanismes impliquant l'augmentation de la concentration en CO_2, dont l'effet « fertilisant » [5] potentiellement positif sur le rendement des végétaux est mis en évidence dans la littérature scientifique, mais dont l'expression « au champ » est intimement liée à la génétique et à l'état hydrique et nutritif des cultures. Une importante source de variabilité des estimations de rendements disponibles dans la littérature s'explique par le traitement inégal de cet effet entre les travaux : il est en effet souvent non pris en compte dans les études prospectives au motif de la difficulté à prédire tant les effets du changement climatique sur les ressources en nutriments et en eau que les évolutions des usages des intrants (engrais, eau, choix des variétés…), conduisant possiblement à sous-estimer l'évolution future des rendements ; sa prise en compte peut conduire à réviser sensiblement les estimations de rendement.

Si la littérature fournit des résultats de quantification des effets directs des variations du climat sur les rendements, les effets indirects du changement climatique sur les rendements *via* l'**évolution future de la pression de bioagresseurs** sont impossibles à projeter, notamment du fait de la multiplicité des combinaisons « culture X bioagresseur X contexte pédoclimatique » qu'il faudrait analyser. Cette question n'a donc pas été traitée de manière exhaustive dans ce rapport, qui vise plutôt, au travers notamment de l'exemple du blé présenté dans le chapitre 7, à mettre en exergue la complexité des mécanismes à l'œuvre et les verrous empêchant toute projection quantitative à l'horizon 2050.

Notons que le changement climatique peut également avoir des **effets sur la qualité nutritionnelle des produits végétaux récoltés** (teneurs en protéines, en certains oligoéléments et/ou vitamines, etc.). Il n'est pas facile de tenir compte explicitement de ces évolutions qualitatives dans des simulations réalisées avec le modèle GlobAgri-AE2050, modèle de flux qui se base sur les volumes exprimés en tonnes ou en équivalent calories. Ceci est d'autant plus difficile qu'il s'agit là d'un front nouveau de recherches non encore stabilisé. Les effets qualitatifs du changement climatique sur les produits végétaux récoltés n'ont donc pas fait l'objet d'une analyse spécifique. Il est pourtant évident qu'une baisse de la richesse en nutriments des cultures nécessitera d'accroitre les rendements et/ou les surfaces cultivées pour maintenir les niveaux d'apports en nutriments des régimes alimentaires. La caractérisation des variations futures de la qualité nutritionnelle des produits agricoles resterait donc à réaliser pour compléter le travail quantitatif de simulation présenté dans le rapport de synthèse.

Outre les effets du changement technique, les rendements végétaux évoluent également sous les effets combinés d'un ensemble de facteurs « techniques » : niveaux des facteurs primaires de production (terre, travail, capital, eau) et des consommations intermédiaires (notamment engrais et produits de traitement des cultures), choix des systèmes et des pratiques de culture, progrès génétique, meilleure efficience des facteurs de production, réduction des inefficacités techniques… Les évolutions de ces facteurs sont désignées dans la présente étude sous l'intitulé synthétique **d'évolutions techniques.** Le chapitre 4 précise cette notion et présente sous une forme graphique comment ses déterminants regroupés en trois catégories (évolution des facteurs de production, réduction des inefficacités techniques et progrès technique) peuvent influencer les niveaux des rendements à l'horizon 2050.

Le chapitre 5 passe en revue les adaptations des systèmes agricoles face au changement climatique. Selon le degré de rupture par rapport aux pratiques actuelles, on parle d'adaptations incrémentales, systémiques ou transformationnelles. Les premières consistent en général à faire face aux évolutions climatiques en ne modifiant pas en profondeur les systèmes techniques (ajustement); elles relèvent le plus souvent d'adaptations autonomes et spontanées de la part des agriculteurs. De ce fait, elles sont confondues avec l'évolution technique observée depuis 30 ans du fait de la perception progressive du changement climatique par les acteurs. Contrairement aux adaptations simples qui peuvent être modélisées, les effets des adaptations systémiques et transformationnelles ont été peu quantifiées et, de ce fait, nous n'avons pas introduit dans notre étude de scénarios faisant appel à ce type d'adaptations.

Enfin, le potentiel agronomique des sols évolue sous l'effet de facteurs naturels et anthropiques, parmi lesquels le changement climatique. De cette évolution découlent des pertes et des gains potentiels de surfaces propices aux cultures (surfaces cultivables) à l'horizon 2050. Le chapitre 6 de ce rapport présente les **mécanismes par lesquels le changement climatique affecte la disponibilité en terres cultivables**.

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

Composition du groupe de travail

• Équipe projet : conduite de l'étude

Marc-Antoine Caillaud, INRAE, UAR[6] 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.*

[6] 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[7].

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 Vincent Mairy pour la mise en page de la couverture du document.

[7] 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. Changement climatique : manifestations et évolutions à l'horizon 2050

Serge Planton, Eric Sauquet, Anaïs Tibi, Philippe Debaeke

Le réchauffement global du système climatique, dont l'une des caractéristiques est la hausse de la moyenne globale de la température de surface[8] depuis la fin du XIX^{e} siècle, résulte d'une déstabilisation de l'équilibre radiatif[9] de la Terre sous l'action d'agents de forçage externes au système. Il est désormais bien établi par le GIEC dans son 5^{e} rapport d'évaluation (IPCC, 2013) que le CO_2 est le principal facteur de forçage radiatif depuis la fin du XVIII^{e} siècle[10], et que son rôle est prépondérant dans l'évolution de ce forçage depuis 1970.

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

Depuis le 4^{e} rapport d'évaluation du GIEC, les preuves du lien de causalité entre les émissions anthropiques de GES et le réchauffement climatique passé se sont renforcées, et le GIEC estime extrêmement probable que les effets de ces émissions aient été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{e} siècle (IPCC, 2013). Les scénarios d'évolution future du climat dépendent donc largement de l'évolution des émissions anthropiques de GES. Depuis son 5^{e} rapport d'évaluation, le GIEC fonde ses projections climatiques sur des « Profils représentatifs d'évolution de concentration » (ou RCP pour *Representative Concentration Pathways*), décrivant des trajectoires possibles d'émissions ou de concentration de GES, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols. Les quatre RCP retenus par le GIEC sont issus d'une sélection effectuée par ses experts sur la base de centaines de scénarios publiés dans la littérature. Le RCP2.6[11] est un scénario d'atténuation dans lequel des politiques climatiques efficaces sont mises en place et conduisent à limiter le réchauffement planétaire en 2100 à environ +2°C au-dessus des niveaux préindustriels. Les RCP4.5 et 6.0 sont des scénarios intermédiaires, et le RCP8.5 correspond à un scénario d'émissions très élevées de GES. En guise d'illustration, la concentration atmosphérique en CO_2, qui a évolué rapidement depuis le début du XX^{e} siècle pour atteindre 390,5 ppm en 2011, devrait atteindre 442,7 et 540,5 ppm en 2050 selon, respectivement, les RCP2.6 et 8.5, avec une faible variabilité régionale et saisonnière. Pour estimer les évolutions futures possibles de la température de surface et des précipitations induites par l'évolution des concentrations en GES des différents scénarios RCP, le GIEC reprend les projections obtenues par un ensemble de modèles climatiques dans le cadre du projet CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5*[12]).

Les effets du changement climatique sur la production agricole à l'horizon 2050 dépendront mécaniquement de l'intensité du changement climatique à venir. L'objet central de l'étude étant d'analyser l'effet du changement climatique sur les bilans emplois-ressources des produits agricoles en Europe et dans le monde, deux trajectoires de changement climatique (« tendanciel » et « aggravé ») ont été considérées dans le volet de quantification de l'étude, permettant de définir deux hypothèses de climat en 2050, et d'analyser les effets différenciés de ces deux trajectoires de changement climatique sur les rendements végétaux et les disponibilités en surfaces cultivables.

[8] Terres émergées et océans.

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

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

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

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

Au-delà de l'évolution moyenne des paramètres climatiques (températures et précipitations annuelles moyennes), le changement climatique se manifestera aussi par des événements extrêmes plus nombreux avec des intensités plus fortes (sécheresses intenses, tempêtes, inondations – Voir Encadré 1-1). Le modèle GlobAgri-AE2050 n'est cependant pas adapté à l'analyse des conséquences de ces accroissements en nombre et intensité des évènements extrêmes sur le système alimentaire mondial en 2050.

Après avoir décrit la nature du changement climatique à l'œuvre dans la première moitié du XXIe siècle en termes de variations de la température et de la pluviométrie annuelles moyennes liées à l'évolution de la concentration en GES, ce chapitre conclut sur la définition des deux trajectoires de changement climatique « tendanciel » et « aggravé » retenues dans le volet de quantification de l'étude.

1.1. Évolution future de la température moyenne annuelle de surface

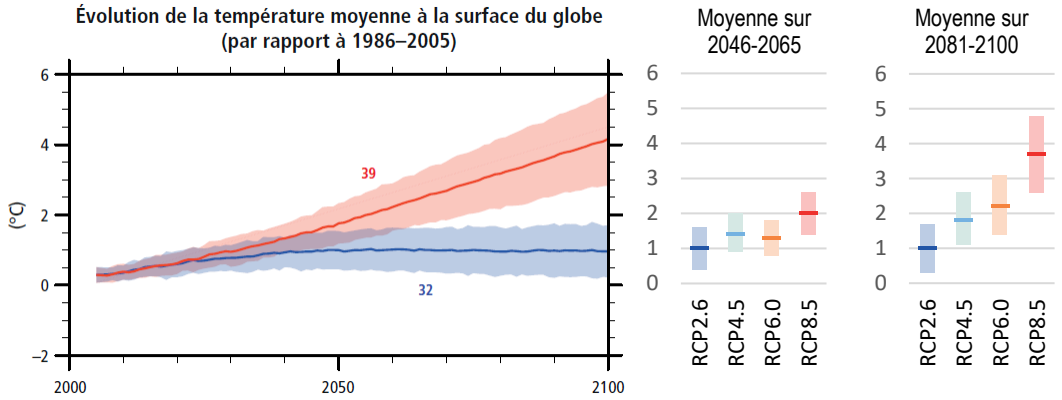
Quel que soit le scénario d'émissions considéré, les projections indiquent une augmentation de la température au cours du XXIe siècle (Figure 1-1). L'ampleur des changements projetés dépend fortement du choix du scénario d'émissions. Ainsi, dans le scénario médian RCP6.0, la variation de la température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

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

Projections moyennes multi-modèles de la température moyenne annuelle à la surface du globe (moyenne mondiale).

Les séries chronologiques des projections et une mesure de l'incertitude (parties ombrées) sont présentées pour les scénarios RCP2.6 (en bleu) et RCP8.5 (en rouge). Le nombre de modèles CMIP5 utilisés pour calculer la moyenne est indiqué dans le graphique.

Les moyennes et incertitudes (plage de 5-95 % de l'ensemble des modèles) associées sur les périodes 2046-2065 et 2081-2100 sont fournies pour les différents scénarios RCP sous forme de bandes verticales de couleur sur les deux panneaux de droite.

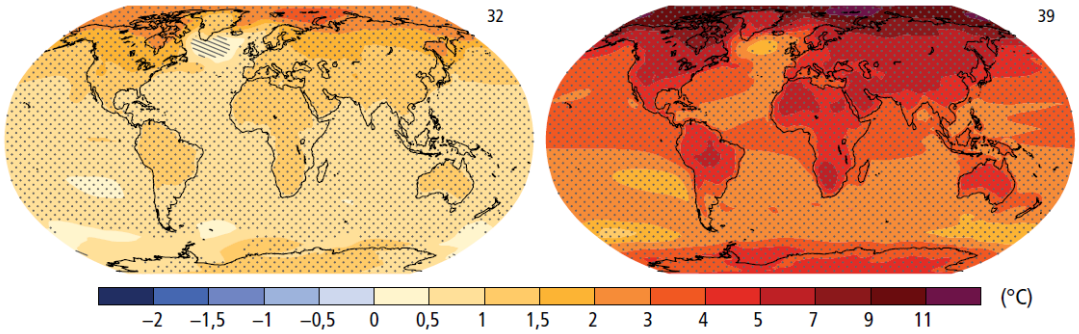


Source : IPCC, 2014

Les modèles calculent des évolutions non uniformes des températures à la surface du globe (Figure 1-2). Il est très probable que la région arctique se réchauffe plus rapidement que la moyenne mondiale, et que le réchauffement moyen soit plus important à la surface des continents qu'à la surface des océans, comme observé par le passé.

Figure 1-2. Variations de la température moyenne annuelle de surface entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite)

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



Source : IPCC, 2014

Encadré 1-1. Changement climatique et événements extrêmes

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

L'évolution future des températures extrêmes (fréquence, intensité et durée des vagues de chaleur[13]) est désormais bien établie. Ainsi, le 5e rapport du GIEC (IPCC, 2013) estime de façon quasi certaine que dans la plupart des régions continentales, les extrêmes chauds seront plus nombreux et les extrêmes froids moins nombreux aux échelles quotidienne et saisonnière, à mesure que la température moyenne à la surface du globe augmentera. Il est également jugé très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et dureront plus longtemps.

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

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

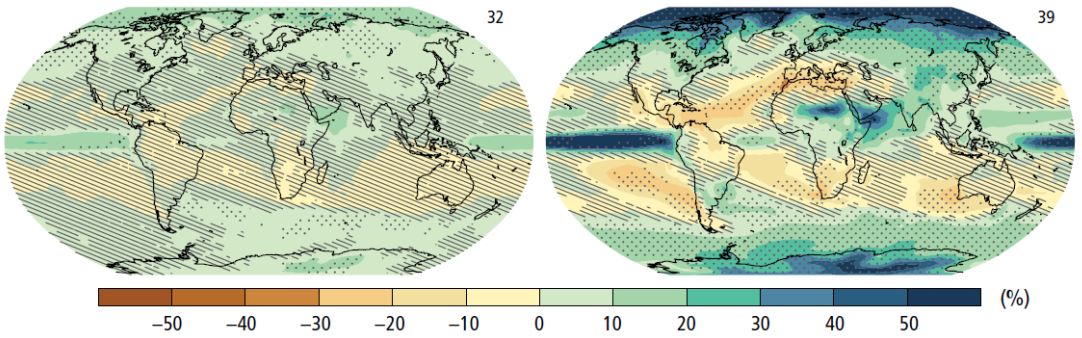
[13] Périodes de plusieurs jours consécutifs avec des températures diurnes et nocturnes anormalement élevées.

1.2. Évolution future des précipitations moyennes annuelles

Le consensus entre modèles pour ce qui concerne les précipitations futures est moins fort que celui relatif aux températures, et ce sans que les raisons des différences de prédiction soient aujourd'hui totalement comprises. Les projections concernant les précipitations sont donc plus incertaines que celles concernant les températures. Quel que soit le scénario RCP considéré, l'évolution projetée des précipitations moyennes ne se distingue pas de la variabilité climatique naturelle dans de nombreuses régions continentales du globe, surtout dans la première moitié du XXIe siècle. En revanche, selon les grandes zones géographiques considérées, on s'attend vraisemblablement à une accentuation des contrastes entre régions sèches et humides, même si des régions pourront déroger à cette règle globale, dans la deuxième moitié du XXIe siècle ; ceci est plus particulièrement le cas avec le scénario RCP8.5 (Figure 1-3). Il est probable que les précipitations moyennes annuelles augmentent aux hautes latitudes et dans certaines régions humides de latitude moyenne d'ici la fin du XXIe siècle.

Figure 1-3. Variations des précipitations moyennes annuelles entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite)

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



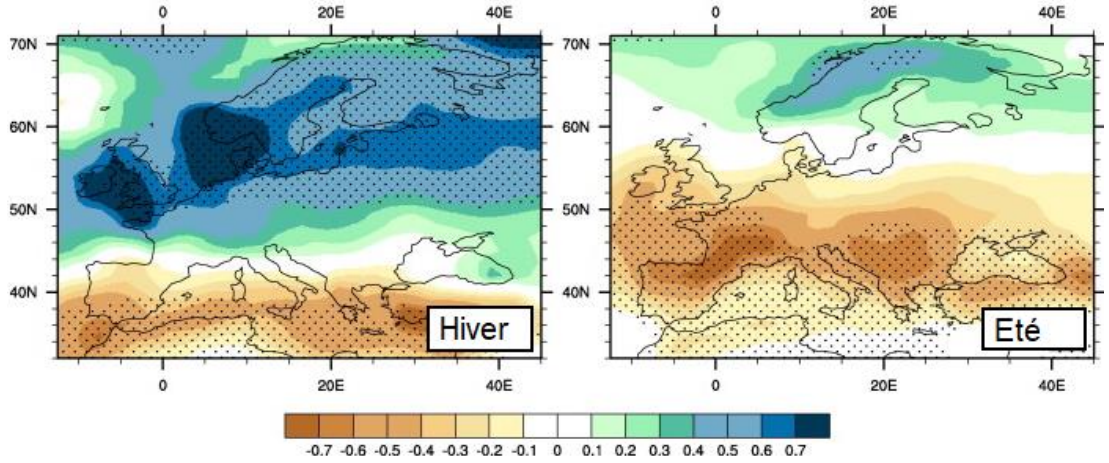
Source : IPCC, 2014.

Au contraire, les précipitations tendraient à diminuer dans la plupart des régions de latitude moyenne, et dans les régions subtropicales arides (bien que le degré de confiance soit moindre). Ainsi, le pourtour méditerranéen devrait connaître un plus fort déficit pluviométrique (hot spot du changement climatique) à l'avenir alors que les régions septentrionales de l'Europe pourraient bénéficier d'un supplément de précipitations (surtout en hiver), ces différences étant renforcées par le scénario RCP8.5 relativement aux autres scénarios RCP (Figure 1-4).

Notons qu'un consensus entre modèles souhaitable pour la prise de décision n'est pas nécessairement synonyme d'une grande robustesse des résultats. En effet, certaines comparaisons entre observations et simulations du climat passé récent montrent que les modèles climatiques peuvent être pris en défaut en termes de précipitations dans certaines régions.

Figure 1-4. Variation relative (mm.jour^{-1}) à l'échelle de l'Europe des précipitations saisonnières par rapport à la période de référence 1900-1929 projetée en fin de XXI^{e} siècle (2070-2099)

Les zones pointillées indiquent les régions où le changement relatif absolu est supérieur à 20%.



Source : d'après Terray et Boé, 2013

1.3. Évolution de la ressource en eau disponible

Au-delà des précipitations évoquées plus-haut, l'analyse se concentre ici sur les autres termes du bilan en eau qui influencent le devenir de l'« eau bleue », eau douce présente dans le réseau hydrographique, les systèmes lacustres et les aquifères, mais également utilisée en agriculture : les écoulements en rivière, qui quantifient la capacité à prélever la ressource dans les cours d'eau et/ou à la stocker pour des besoins d'irrigation, et l'humidité du sol, qui caractérise les déficits hydriques en surface. On exploitera principalement des projections multi-modèles qui fournissent une vision plus lissée masquant les comportements très contrastés de certains modèles de climat.

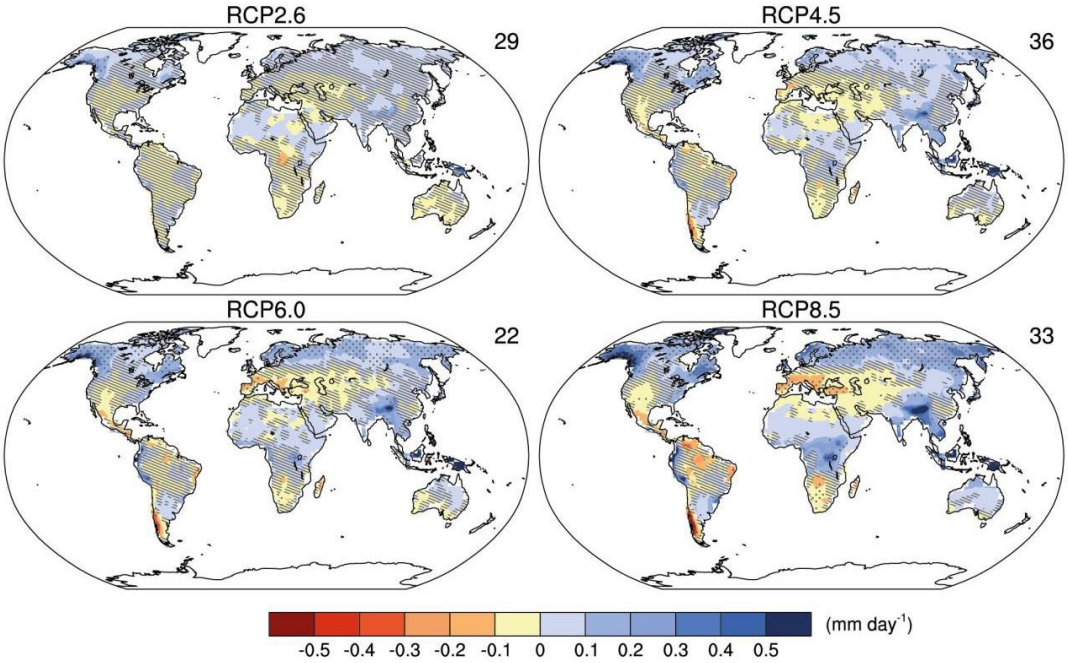
1.3.1. Évolution des écoulements

En hydrologie de surface, le terme d'« écoulement» concerne exclusivement la circulation de l'eau dans le réseau hydrographique. Il s'agit d'un phénomène qui peut se quantifier par des mesures directes de débits. La Figure 1-5 montre une intensité des changements dans les écoulements augmentant avec les scénarios d'émissions croissants de GES.

Les évolutions projetées et les contrastes spatiaux avec le scénario RCP8.5 sont plus forts que celles et ceux obtenus avec le scénario optimiste RCP2.6 en fin de siècle. Toutes les régions ne subiront pas les mêmes changements. Ainsi, selon le scénario RCP8.5, il est probable que les ressources diminueront au sud de l'Europe, au Moyen-Orient et en Afrique australe. À l'inverse, les ressources vont probablement augmenter aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, en cohérence avec une augmentation des précipitations. Ces évolutions étaient déjà perceptibles dans des précédents exercices du GIEC mais avec des intensités différentes.

Figure 1-5. Variation relative de l'écoulement annuel moyen (mm.jour^{-1}) par rapport à la période de référence 1986-2005 projetée en fin de XXI^{e} siècle (2081-2100) pour différents RCP.

Le nombre de modèles issus de CMIP5 est mentionné en haut à droite de chaque planisphère. Les régions hachurées sont celles où le changement moyen multi-modèle est inférieur à un écart-type de la variabilité interne ; de manière simplifiée, *le signal ou le consensus entre modèles est faible sur ces secteurs*. Les régions avec des pointillés sont celles où le changement moyen multi-modèle est supérieur à deux écarts-types de la variabilité interne et où au moins 90 % des modèles s'accordent sur le signe du changement ; de manière simplifiée, *il s'agit de changements notables avec un large consensus entre modèles*.

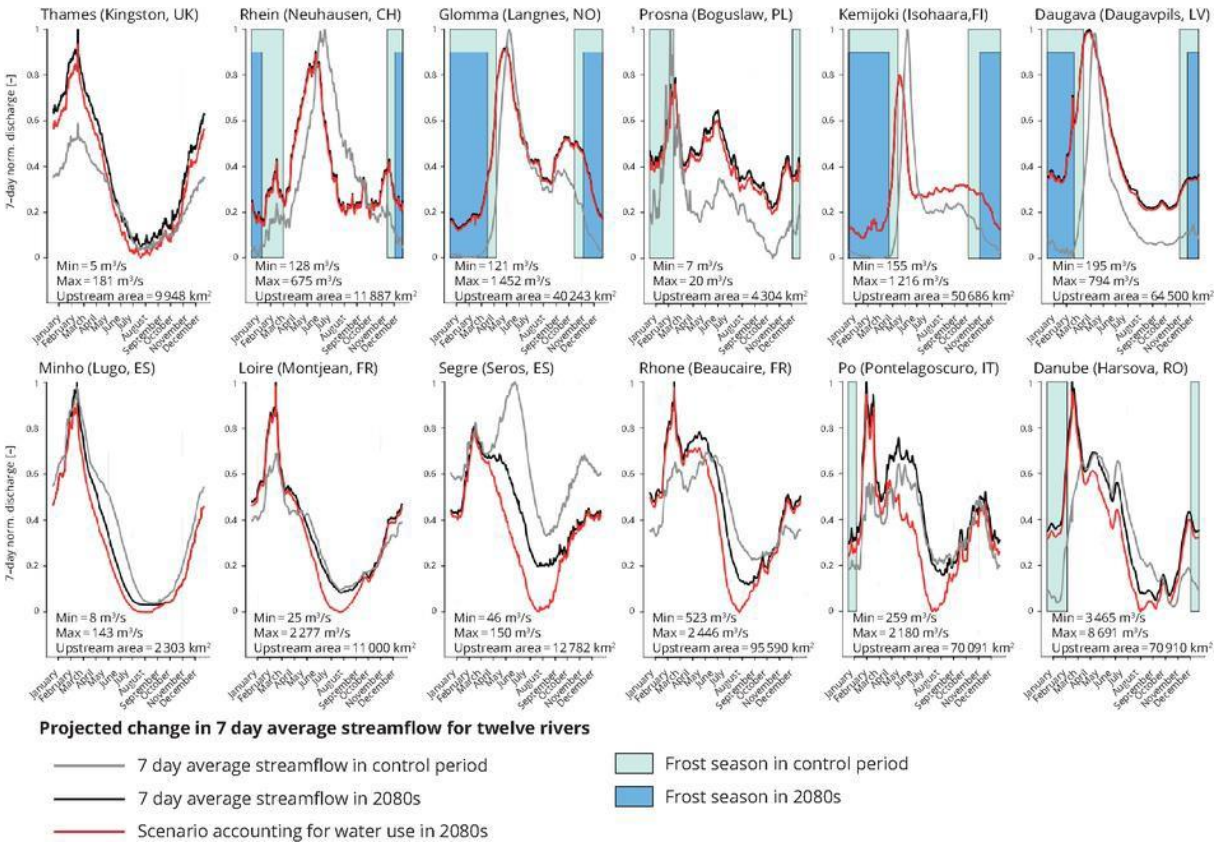


Source : Collins *et al.*, 2013

A l'échelle globale, des travaux ont été effectués sur de grands bassins où des modèles hydrologiques ont pu être déployés (ex. Forzieri *et al.*, 2014 ; Alfieri *et al.*, 2015 ; Vetter *et al.*, 2015 ; Eisner *et al.*, 2017). Ainsi, Eisner *et al.* (2017) ont examiné le devenir de onze grands bassins. Leurs résultats montrent une augmentation des hautes eaux sur les bassins de l'hémisphère nord influencés par la mousson (Gange, Yangzi Jiang (ou Fleuve Bleu), Fleuve Jaune) mais avec des intensités différentes. A partir d'une étude portant sur douze fleuves européens, Forzieri *et al.* (2014) montrent une baisse des débits naturels au cours de l'année pour la plupart des fleuves à l'horizon 2080, affectant plus particulièrement ceux situés dans la moitié sud de l'Europe (Figure 1-6). Cette baisse pourrait être accentuée par des actions anthropiques sur la ressource.

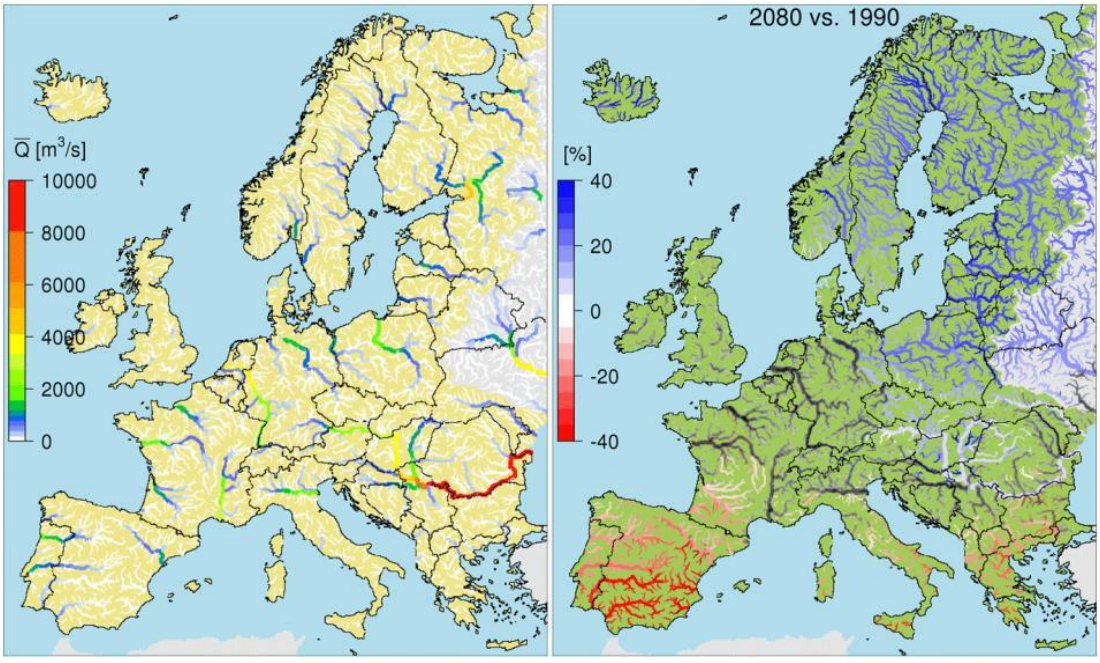
En Europe, les débits annuels devraient diminuer dans le sud et le sud-est et augmenter dans le nord et le nord-est (Figure 1-7). On prévoit des changements dans le régime hydrologique, *i.e.* la saisonnalité des débits, non uniformes à l'échelle de l'Europe. Les changements les plus profonds concernent les régions influencées par la neige, telles que les Alpes, la Scandinavie et certains secteurs autour de la Baltique : une rétention hivernale sous forme de neige diminuée et la fonte plus précoce du manteau neigeux devraient entraîner une augmentation des débits hivernaux.

Figure 1-6. Débits moyens sur 7 jours interannuels pour différents bassins versants européens en temps présent (1961-1990) et en fin de siècle (2071-2100) sous RCP 8.5



Source : Forzieri *et al.*, 2014

Figure 1-7. Débits annuels en Europe (1976–2005) (gauche) et leur évolution relative en fin de siècle (2066–2095) (droite)

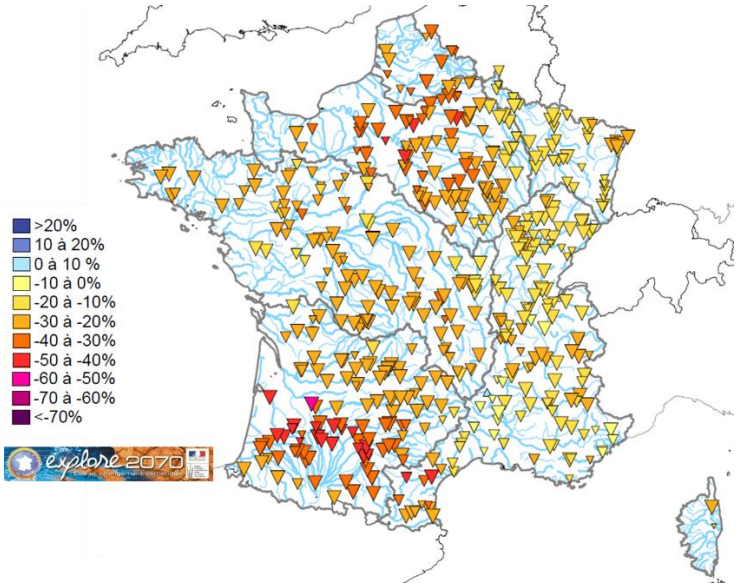


Source : Alfieri *et al.*, 2015

A une échelle plus fine, celle de la France, l'étude Explore 2070, projet initié en 2010 par le ministère chargé de l'écologie, a évalué les impacts possibles à l'échelle du territoire en milieu de siècle (Figure 1-8). Les projections ont été obtenues sous scénarios A1B prédisant une évolution de la température annuelle de l'ordre de +2°C et une baisse des précipitations annuelles majoritairement entre -5% et -10%. Les débits annuels moyens en France risquent de connaître des baisses marquées d'ici le milieu de siècle, pouvant aller de 10 à 40 % sur les différents cours d'eau avec les valeurs les plus extrêmes dans le sud-ouest de la France (Chauveau *et al.*, 2013).

Figure 1-8. Carte d'évolution relative des débits annuels moyens entre 1961-1990 et 2046-2065

La couleur des points est fonction de l'intensité moyenne des changements. Plus la taille des symboles est grande, plus grande est la confiance dans les résultats



Source : Explore 2070, https://professionnels.ofb.fr/fr/node/441

L'intensité du changement, notamment sur le débit annuel, dépend fortement des scénarios d'émission des GES. Des résultats plus récents (Dayon *et al.*, 2018) annoncent des débits estivaux diminués de l'ordre de 40 % sur la Loire et le Rhône à l'horizon de fin de siècle sous scénario RCP8.5. Malgré leurs incertitudes, ces chiffres sont extrêmement préoccupants, notamment dans les secteurs où des tensions sur le partage de la ressource existent. Les travaux de recherche menés en France s'accordent sur :

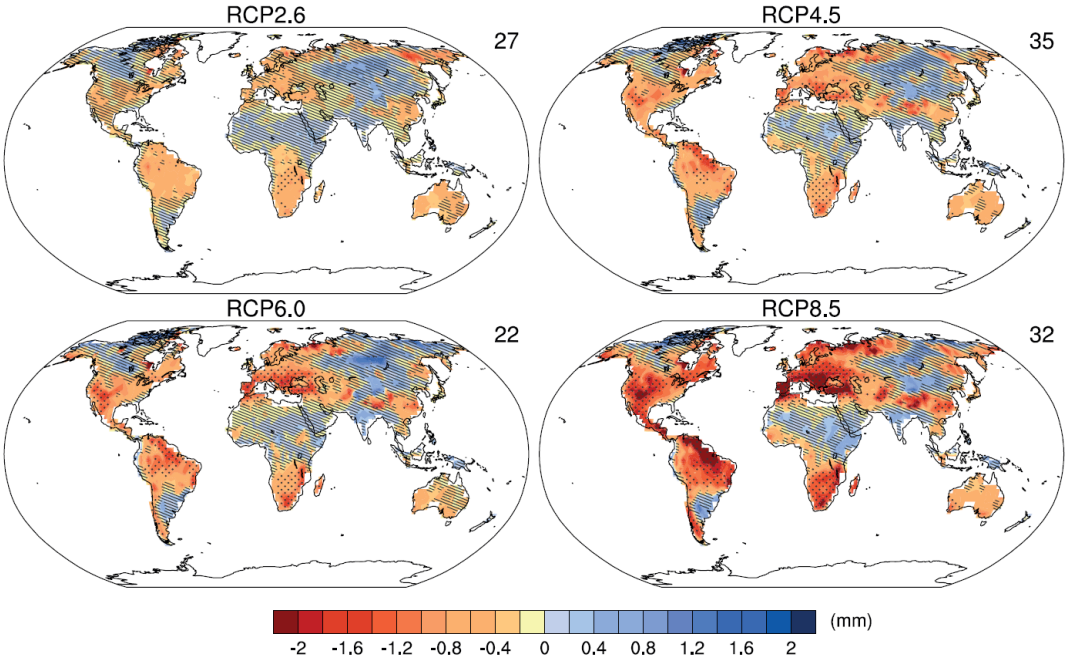
- une intensification des contrastes saisonniers avec des étiages estivaux plus sévères, affirmée par quasiment tous les modèles hydrologiques sur une majeure partie du territoire métropolitain ;
- une diminution significative quasi-généralisée de la ressource en eau ;
- une modification des régimes des rivières de montagne avec une réduction de l'épaisseur du manteau neigeux, une fonte plus précoce et une baisse de l'enneigement.

1.3.2. Évolution de l'humidité du sol

L'humidité du sol est la résultante de processus complexes (précipitation, évaporation, drainage…) interagissant dans des systèmes complexes (pente, nature, texture des sols). L'évolution de cette composante est encore plus incertaine à grande échelle. Néanmoins sur la Figure 1-9 on notera une certaine cohérence avec les projections portant sur les écoulements de surface et les précipitations : le secteur Méditerranée semble « s'aridifier ».

Figure 1-9. Variation relative de l'humidité moyenne de surface des sols (0-10 cm) par rapport à la période de référence 1986-2005 projetée en fin de XXIe siècle (2081-2100) pour différents RCP

Le nombre de modèles issus de CMIP5 est mentionné en haut à droite de chaque planisphère. Les régions hachurées sont celles où le changement moyen multi-modèle est inférieur à un écart-type de la variabilité interne ; de manière simplifiée, *le signal ou le consensus entre modèles est faible sur ces secteurs*. Les régions avec des pointillés sont celles où le changement moyen multi-modèle est supérieur à deux écarts-types de la variabilité interne et où au moins 90 % des modèles s'accordent sur le signe du changement ; de manière simplifiée, *il s'agit de changements notables avec un large consensus entre modèles*.

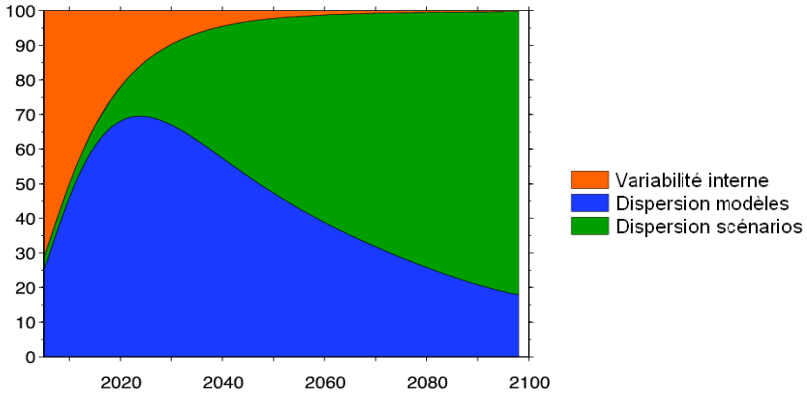


Source : Collins *et al.*, 2013

1.4. Conclusion opérationnelle pour la caractérisation du changement climatique dans l'étude AE2050

Jusqu'à 2050 environ, à l'échelle mondiale, la dispersion des estimations de la variation de température (T°) moyenne (par rapport à T° moyenne actuelle) est davantage due à la multiplicité des modèles utilisés (qui n'ont pas tous la même sensibilité aux variables d'entrée) qu'à la dispersion des RCP en eux-mêmes (trajectoires d'émissions). Jusqu'à 2050, les différents scénarios climatiques ne se différencient donc pas distinctement en termes d'évolution de la T°C moyenne (Figure 1-10).

Figure 1-10. Incertitudes des projections du GIEC (CMIP3) : fraction de variance totale de la variation de la T° moyenne globale et décennale par rapport à sa moyenne « actuelle » (1971-2000), expliquée selon la source de variabilité (en %)



Source : d'après Hawkins et Sutton (2009)

Cependant, les projections du GIEC les plus proches de l'horizon examiné dans AE2050 sont celles correspondant à l'horizon « 2065 » (période 2046-2065) : à cet horizon, les scénarios climatiques (évolution de la température et des précipitations) commencent à se différencier davantage.

En résumé, le milieu du XXIe siècle correspond à une période « charnière » dans l'évolution du climat telle que prédite par les modèles, à partir de laquelle :

- les projections climatiques selon les différents RCP se distinguent les unes des autres,

- l'évolution de la pluviométrie se distingue plus nettement de la variabilité interne, avec des différences plus marquées entre les différentes régions.

Les scénarios AE2050 adoptent une logique essentiellement tendancielle, projetant à l'horizon 2050 les caractéristiques « majoritaires » du monde d'aujourd'hui et des évolutions actuellement en cours. D'après le rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire de 1,5 °C (Allen *et al.*, 2018), l'atteinte des objectifs nationaux actuels de réduction des émissions de GES conduirait à un réchauffement compris entre +3 et +4 °C en 2100 relativement aux températures préindustrielles. Cette estimation se situe dans la fourchette haute des projections 2100 sous scénario RCP6.0 (de +2,0 à +3,7 °C[14]), et dans la fourchette basse des projections 2081-2100 sous scénario RCP8.5 (de +3,2 à +5,4 °C). Si le RCP8.5 peut être qualifié de « laisser faire », le RCP6.0 est également représentatif des scénarios de la littérature dans lesquels les politiques climatiques sont peu efficaces (ou, en tout état de cause, insuffisantes pour maintenir l'augmentation des températures en dessous de la barre des +2°C en 2100) : le RCP8.5 peut être considéré comme une variante pessimiste du RCP6.0.

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

1.5. Hypothèses d'évolution de la disponibilité hydrique pour les cultures sous l'effet du changement climatique à l'horizon 2050 formulées dans l'étude AE2050

Les moyens actuels ne permettent pas d'estimer les impacts régionaux du changement climatique sur la disponibilité en eau pour l'irrigation. La première difficulté concerne la quantification de l'évolution de la disponibilité totale en eau « bleue » (liée à l'évolution des capacités de stockage et des débits d'écoulement), indépendamment de ses usages potentiels. En second lieu, traduire cette disponibilité totale en quantité d'eau disponible pour l'irrigation nécessiterait de formuler des hypothèses sur la répartition des usages de l'eau bleue à l'horizon 2050, autrement dit de conduire une réflexion prospective sur les usages de l'eau.

Or la disponibilité en eau pour l'irrigation conditionne la part des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées. À titre d'exemple, Elliott *et al.* (2014) simulent dans certaines régions irriguées (Ouest des USA, Chine, Asie du Sud, de l'Est et Centrale) le retour aux cultures non irriguées pour 20–60 Mha d'ici la fin du siècle, alors que dans d'autres régions du monde (Nord et Est des USA, Amérique du Sud en partie, Europe en partie, Asie du SE), le surplus de ressource hydrique pourrait permettre d'augmenter la part des surfaces irriguées.

En l'absence de données permettant d'estimer les évolutions possibles de la disponibilité en eau d'irrigation dans les 21 régions du monde considérées dans notre étude, nous avons fait l'hypothèse d'une stagnation de la part des surfaces irriguées dans les surfaces récoltées totales entre « 2010 » et 2050.

On peut faire par ailleurs l'hypothèse que si la ressource disponible pour l'irrigation est insuffisante, l'agriculteur peut également choisir de répartir le volume disponible sur l'ensemble de la sole irriguée quitte à ne pas satisfaire le besoin de chaque culture, plutôt que de réduire la part de cultures irriguées et en continuant d'apporter à ces dernières la dose nécessaire en évitant tout déficit. Cette stratégie d'irrigation « limitée » ou « déficitaire », qui peut présenter un intérêt certain selon le climat de l'année et la nature des cultures (en particulier de leur capacité à valoriser de faibles apports d'eau pendant les phases sensibles), peut néanmoins diminuer les rendements par rapport au rendement de référence en situation d'irrigation non limitante.

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

Les effets d'une irrigation limitée (ou sub-optimale) sur les rendements des cultures sont néanmoins difficiles à quantifier car la réponse entre rendement et taux de satisfaction du besoin en eau n'est pas linéaire pour les valeurs élevées du taux de satisfaction : la baisse d'un mm d'irrigation ne se traduit pas par une baisse proportionnelle de transpiration de la culture. Le passage par un modèle dynamique sol-plante-atmosphère est ici nécessaire. En outre, la suppression de l'irrigation sur certaines surfaces devrait théoriquement conduire à des modifications des choix des cultures au moins sur une partie des terres qui ne seraient plus irriguées. Sans possibilité de formuler des hypothèses complexes d'évolution de l'assolement, il a été choisi dans cette étude de ne pas formuler d'hypothèse de mise en œuvre d'irrigation limitée mais de considérer une réduction de la part de la surface irriguée dans l'étude de sensibilité.

Références citées dans le Chapitre 1

Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G., 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 2247-2260, https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015.

Allen M.R., Dube O.P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K. (2018). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., de Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? La Houille Blanche, 4 : 5-15.

Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver, M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [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.

Dayon, G., Boé, J., Martin, E., 2018. Impacts of climate change on the hydrological cycle over France. Comptes Rendus Géosciences, 350, 141–153, https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.03.001.

Eisner, S., Flörke, M., Chamorro, A., Daggupati, P., Donnelly, C., Huang, J., Hundecha, Y., Koch, H., Kalugin, A., Krylenko, I., Mishra, V., Piniewski, M., Samaniego, L., Seidou, O., Wallner, M., Krysanova, V., 2017. An ensemble analysis of climate change impacts on streamflow seasonality across 11 large river basins. Clim. Change, 141(3), 401–17.

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B. M., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S. N., Haddeland, I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Satoh, Y., Schmid, E., Stacke, T., Tang, Q., Wisser, D., 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 111(9), 3239-3244; doi: 10.1073/pnas.1222474110.

Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A., 2014. Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 85-108, https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Hawkins, E., Sutton, R.T., 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bulletin of the American Meteorological Society 90(8), doi :10.1175/2009BAMS2607.1

Terray, L., Boé, J., 2013. Quantifying 21st Century France Climate Change and Related Uncertainties, Comptes Rendus Géosciences, 345, 136-149, doi:10.1016/j.crte.2013.02.003

Vetter, T., Huang, S., Aich, V., Yang, T., Wang, X., Krysanova, V., Hattermann, F., 2015. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents. Earth Syst. Dynam., 6, 17-43, https://doi.org/10.5194/esd-6-17-2015.

Chapitre 2. Principaux effets du changement climatique sur la production agricole végétale : mécanismes physiologiques, estimations et incertitudes associées

David Makowski, Tamara Ben-Ari, Elodie Marajo-Petitzon

2.1. Contexte et objectif

2.1.1. Résumé des principaux mécanismes d'action du climat sur la production

La production agricole subit l'impact du changement climatique principalement à travers l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère de surface, la hausse des températures et la modification des régimes de précipitations. Les impacts subis par la production agricole sont de natures diverses. Les impacts les plus documentés dans la littérature scientifique concernent les dates d'atteinte de stades physiologiques, les dates de récolte et les rendements. Mais le changement climatique peut aussi avoir un impact important sur la qualité de la production. Des études récentes ont par exemple montré que la concentration en protéines des grains de blé (Asseng et al. 2019) ou la qualité nutritionnelle des grains de riz (Nevame et al. 2018) pourraient être impactées par le changement climatique. Pour le blé, l'augmentation de teneur en CO_2 peut provoquer un effet de dilution de l'azote dans les grains qui peut conduire à une diminution de teneur en protéines (Seneweera et Norton, 2011).

Ces impacts sont susceptibles de varier en fonction de nombreux facteurs, notamment en fonction du type de culture, des caractéristiques du sol et des pratiques agricoles, dont certaines permettent d'atténuer les impacts négatifs du climat. Les facteurs socio-économiques déterminent aussi en partie l'impact du changement climatique, notamment à travers l'évolution des prix des intrants, des prix de vente des productions agricoles, des tarifs douaniers et des changements d'usage des sols. L'effet des facteurs socio-économiques n'est pas abordé dans ce chapitre.

Effet d'une augmentation du CO_2 sur les cultures

L'ampleur de l'effet dit 'fertilisant' de la concentration atmosphérique de CO_2 sur la production de biomasse, en particulier la possibilité pour cet effet de compenser tout ou partie de l'effet négatif lié aux températures, est un aspect très discuté de l'impact du changement climatique sur les cultures (Long et al. 2006). Les dernières générations d'expérimentation en conditions naturelles dites *Free Air Concentration Enrichment* (FACE), qui permettent entre autres de ne pas isoler les plantes de leur environnement abiotique, ont montré que les résultats expérimentaux précédemment obtenus en chambres de culture avaient possiblement surévalué l'impact positif du CO_2 sur la production de biomasse (Long et al. 2006). Les voies de métabolisation du carbone ont un impact majeur sur l'effet d'une augmentation de la concentration en CO_2 sur la photosynthèse et la production de biomasse. Les plantes dites en C3 (blé, soja, riz) sont celles qui pourraient le plus bénéficier d'une augmentation de CO_2 (Fitzgerald et al. 2016; Long et al. 2006). L'effet du CO_2 interagit avec de nombreux autres facteurs, notamment la température et l'humidité du sol (Fitzgerald et al. 2016), mais aussi l'azote disponible (Kimball et al. 2002). Les mécanismes sous-jacents sont décrits en détail dans le chapitre 3 qui réalise un focus sur les effets écophysiologiques du CO_2.

Effet d'une augmentation des températures sur les cultures

La durée totale du cycle d'une culture dépend de la température moyenne de la saison culturale. En effet, les espèces végétales répondent à l'accumulation thermique qui se calcule comme une somme de degrés-jours au-dessus d'une température de base spécifique de la culture (Soltani & Sinclair 2012). Si cette somme est atteinte plus tôt dans la saison

culturale (e.g., du fait d'une température en moyenne plus élevée induite par le changement climatique), les besoins en température nécessaires au développement (e.g., le déclenchement de la floraison) seront plus rapidement satisfaits, ce qui pourra pénaliser la croissance potentielle des plantes (Brisson & Levrault 2010). En effet, la réduction de la durée de croissance induite par l'augmentation de température conduit à une diminution de la quantité de rayonnement intercepté, ce qui impacte négativement l'accumulation de biomasse potentielle. Il est cependant possible que la réduction de la durée de croissance ait également un effet positif sur la croissance de la plante lorsque cette réduction permet une croissance sous un régime thermique et hydrique plus favorable, par exemple lorsque la durée d'exposition à un stress hydrique est plus courte du fait d'une vitesse de croissance plus rapide et d'une récolte plus précoce (notion d'esquive).

La date d'atteinte de certains stades clés (ex : stades épi 1cm et épiaison du blé) dépend également de la réponse à la photopériode qui est spécifique à chaque variété (Brisson & Levrault 2010). Une modification des dates des stades phénologiques peut avoir des effets bénéfiques (e.g., en évitant des périodes de stress thermiques ou hydriques ou encore en allongeant la période de remplissage des grains (Zhu et al. 2018)), ou néfastes (e.g., du fait d'une non satisfaction des besoins en vernalisation, par exemple pour le blé d'hiver (Wu et al. 2017)) pour le rendement.

Outre leurs effets sur la durée du cycle de croissance, les températures extrêmes peuvent avoir des effets délétères sur les cultures et provoquer, par exemple, un échaudage thermique qui pénalise le rendement (Hunt et al. 2018) ou encore une sénescence accélérée par altération du photosystème (De la Haba et al., 2014). La diminution de la fréquence de températures extrêmement basses, par exemple à l'automne, pourrait au contraire avoir un effet positif sur le rendement des cultures d'hiver dans certaines régions (Yadav 2010).

Effet d'une modification du régime des précipitations sur les cultures

L'effet de la pluviométrie sur les rendements des cultures dépend lui aussi de plusieurs facteurs, liés à la quantité des précipitations, leur répartition dans la saison de culture, la profondeur d'enracinement et la réserve utile du sol (Schlenker & Lobell 2010; Ray et al. 2015; David B Lobell & Asseng 2017), mais aussi aux pratiques agricoles, notamment l'irrigation (Saadi et al. 2015) et plus généralement aux besoins en eau des espèces et variétés cultivées (surface foliaire, conductance stomatique…). En agriculture pluviale, une augmentation des précipitations a le plus souvent un effet bénéfique sur le rendement notamment dans les régions arides ou semi-arides. Les excès de pluie peuvent néanmoins être délétères, surtout s'ils sont très concentrés dans le temps et qu'ils impactent des phases particulièrement sensibles comme la levée ou la floraison (Ben-Ari et al. 2018). La prédiction de l'évolution future des précipitations étant incertaine, il est difficile d'anticiper l'effet d'une modification du régime des précipitations sur les cultures. Donatelli et al. (2015) utilisent ainsi deux modèles climatiques simulant des niveaux de précipitations contrastés et montrent que les rendements de blé, colza et tournesol simulés à partir de ces deux types de projections climatiques sont très différents en Europe. Pour les régions tropicales, les divergences entre projections sont également importantes, notamment en Afrique subsaharienne (Giannini et al. 2018).

Effet sur les bioagresseurs

Les effets des variables climatiques sur les bioagresseurs sont multiples et sont détaillés dans la section 7.1 de ce rapport. L'humidité relative de l'air et du sol impactent la survie et la reproduction des bioagresseurs (Roos et al. 2011). Les températures hivernales peuvent avoir un impact important sur la survie des pathogènes et des insectes ravageurs (Gouache et al. 2013; Bale et al. 2002; Roos et al. 2011). Des effets thermiques sur la répartition spatiale des populations d'insectes ne sont pas à exclure (Bale et al. 2002). Récemment, il a été montré que le changement climatique pourrait impacter fortement le niveau de destruction des cultures par les insectes (entre 10 et 25% de pertes supplémentaires pour le blé, maïs et riz par degré Celsius de réchauffement) via un effet de la température sur le métabolisme des insectes (Deutsch et al. 2018).

2.1.2. Mécanismes d'adaptation

Diverses stratégies d'adaptation ont été identifiées et mises en œuvre pour atténuer ou compenser l'effet du changement climatique sur la production agricole (Hasegawa et al. 2013). Nous ne traitons ici que des stratégies de type incrémental, pouvant être mises en place progressivement et ne remettant pas en question l'ensemble du système de production. Les stratégies d'adaptation dites systémiques et transformationnelles sont traitées dans le Chapitre 5 de ce rapport.

L'irrigation (lorsque la disponibilité en eau le permet) est un moyen direct de se prémunir contre des sècheresses plus fréquentes induites par le changement climatique (Li & Troy 2018). L'irrigation peut cependant augmenter les émissions de gaz à effet de serre créant ainsi une rétroaction négative à long terme (Lipper et al. 2014). Une augmentation de la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation peut par ailleurs générer des conflits d'usages de l'eau, comme par exemple en Californie (Grantham & Viers 2014). Son usage peut être raisonné grâce à certaines technologies plus économes, comme l'irrigation de précision (Wolfe et al. 2018).

L'amélioration variétale constitue un autre levier d'adaptation car elle permet le développement de variétés plus précoces ou plus tardives, la modification des besoins photopériodiques (Olesen et al. 2011) ou encore la production de variétés tolérantes à la sècheresse (Nuccio et al. 2018). Voir la section 7.2 de ce rapport pour plus d'informations.

Les agriculteurs peuvent également s'adapter aux changements climatiques en modifiant les dates de semis, les dates de récoltes ou les densités de semis sans nécessairement changer de variété (Caubel et al. 2018). Ce type d'adaptation est déjà observée dans de nombreux endroits du monde par exemple pour la vigne française avec des dates de vendanges de plus en plus précoces (Webb et al. 2012, Jones et al. 2005). Des stratégies d'adaptation de dates de semis peuvent être mises en place de manière incrémentale pour moduler les effets d'un raccourcissement du cycle cultural (Brisson & Levrault 2010). Notons qu'un raccourcissement de la période de croissance des cultures pourrait faciliter l'implantation d'une culture supplémentaire au cours de la même année, par exemple une double culture blé-soja aux USA (Seifert & Lobell 2015).

Des études récentes montrent que la distribution spatiale des zones cultivées peut être influencée par le changement climatique. Souvent, cela se traduit par une extension progressive des zones cultivées vers les hautes latitudes et une diminution des zones favorables à l'agriculture dans les zones tropicales ou arides (Zabel et al. 2014). Par exemple, une étude récente a montré que la zone de culture du riz en Chine tendait à se déplacer vers le nord du pays (Dong et al. 2016), ou de façon similaire pour la production d'amandes en Californie (Parker & Abatzoglou 2018). Une autre étude a montré que le changement climatique risquait d'impacter fortement l'altimétrie des zones de production de café (Moat et al. 2017). Ces expansions et réductions des surfaces cultivables se basent le plus souvent sur l'estimation et la projection de niches bioclimatiques (prenant en compte la photopériode, la température, une estimation de la réserve utile des sols, etc.).

L'efficacité de certaines des stratégies d'adaptation a été évaluée avec des modèles de culture (Basso et al. 2015; Wilcox et Makowski 2014), notamment le changement de dates de semis, l'adaptation variétale et l'irrigation, et les résultats de ces études montrent que ces stratégies permettent de compenser partiellement les effets négatifs du changement climatique. De nombreuses autres stratégies d'adaptation plus systémiques existent (voir le Chapitre 5 de ce rapport); elles reposent sur des modifications profondes des systèmes agricoles e.g., adoption de systèmes de conservation des sols (Powlson et al. 2016) ou de systèmes basés sur l'agroforesterie (Verchot et al. 2007), sur des modifications dans la composition des rotations ou des substitutions entre espèces (Olesen et al. 2011). Enfin, il est important de garder en tête que l'efficacité de ces stratégies est dépendante du contexte socio-économique, et peut présenter des résultats hétérogènes à l'échelle mondiale (Hoegh-Guldberg et al. 2018).

2.1.3. Méthodes pour étudier l'impact du changement climatique

La littérature scientifique montre donc que le changement climatique peut avoir un impact sur la durée des cycles, sur les niveaux moyens des rendements, et sur les probabilités de gains ou de pertes de production. L'impact du changement climatique dépend donc de nombreux facteurs dont les effets individuels ou combinés peuvent être estimés selon trois approches principales : (i) les expérimentations, (ii) les modèles de culture et (iii) les modèles statistiques.

Deux types d'expérimentations ont été mises en place dans différentes régions du monde pour mesurer l'effet du changement climatique sur la productivité des espèces cultivées en parcelles expérimentales. D'une part les '*field warming experiments*' (Zhao et al. 2017; Zhao et al. 2016) dans lesquelles des placettes sont mises en conditions modifiées soit par l'utilisation de radiateurs chauffants ou encore sous des abris permettant de contrôler les précipitations. D'autre part, les expérimentations FACE qui permettent d'étudier l'effet d'une augmentation de la teneur en CO_2 grâce à des diffuseurs de CO_2 mécaniques maintenant une concentration de CO_2 quasi-constante (Ainsworth & Long 2005; Long et al. 2006). L'avantage principal de ces expérimentations est qu'elles permettent aux scientifiques de collecter des observations directement sur les cultures exposées à des températures et/ou des concentrations en CO_2 plus élevées, sans se baser sur des modèles de simulation. L'inconvénient de cette approche est qu'elle ne permet de tester qu'un petit nombre de couples température/concentration en CO_2 et de ne couvrir qu'un nombre limité de sites et d'années climatiques.

Les modèles de culture mécanistes permettent de réaliser des expériences *in silico* où différentes combinaisons de variables climatiques sont testées, par exemple en appliquant une modification forfaitaire des variables d'entrée (+2°C, +180ppm, etc.) ou en simulant le développement d'une culture pour des scénarios de changement climatique générés par des modèles climatiques. Ils présentent plusieurs avantages ; ils permettent de prendre en compte les processus biologiques et physiques impliqués dans le développement et la croissance des cultures ainsi que leurs interactions, simulent de nombreuses variables d'intérêt (biomasse, dates d'atteinte de stades clés, rendements, etc.) et peuvent être utilisés pour simuler les cultures dans de nombreuses conditions pédoclimatiques. Leurs résultats sont cependant entachés de fortes incertitudes dues aux erreurs d'estimation de leurs paramètres, à la difficulté d'obtenir des variables d'entrée fiables et à l'incertitude structurelle de leurs équations (Wallach et al. 2018). Du fait de ces différentes sources d'incertitude, les simulations de rendement obtenues par différents modèles de cultures sont bien souvent très différentes même lorsque ces modèles sont utilisés dans les mêmes conditions pédoclimatiques (Bassu et al. 2014; Asseng et al. 2013; Makowski et al. 2015). Pour analyser cette incertitude liée aux modèles de cultures, il convient d'analyser les résultats de plusieurs modèles. Asseng et al. (2013) chiffrent le nombre de modèles de cultures à partir duquel on peut considérer les résultats robustes à cinq pour une hausse des températures en dessous de 3°C. Bassu et al. (2014) considèrent qu'il faut au minimum huit modèles de cultures pour simuler des rendements pertinents. Quoi qu'il en soit, il est important de comparer les résultats obtenus avec plusieurs modèles de culture et de ne pas se fier aux résultats d'un seul modèle.

Les modèles statistiques (ex : régression linéaire) représentent une alternative intéressante aux modèles de culture. Ils peuvent être également utilisés pour estimer l'effet du changement climatique sur les rendements. Ces modèles sont développés à partir d'observations historiques (par exemple des statistiques publiques) ou expérimentales (Roberts et al. 2017; David B. Lobell & Asseng 2017; Lobell et al. 2011). Plus récemment, certaines méthodes de *machine learning* (i.e., reposant sur des algorithmes d'apprentissage) ont été appliquées pour étudier l'impact du climat sur les rendements agricoles (Crane-Droesch 2018) et l'évolution des zones de culture. Ces méthodes sont comparées dans certaines publications récentes (Roberts et al., 2017). Contrairement aux modèles de culture mécanistes, les modèles statistiques ou basés sur du *machine learning* ne décrivent pas en détail les processus biophysiques en jeu. Ils présentent par contre l'avantage de pouvoir être facilement calibrés à partir de séries chronologiques de rendement et d'utiliser un nombre de variables d'entrée réduits, sans que la précision de leurs prédictions soit nécessairement plus faible que celle des modèles mécanistes (Roberts et al., 2017).

2.1.4. Objectif de notre analyse

Nous présentons ici une synthèse quantitative globale des estimations - publiées dans la littérature scientifique - des effets de changements de température, de teneur en CO_2 et de précipitations sur les rendements des cultures. Notre analyse permet ainsi de synthétiser les pertes ou gains de rendement associés à différents niveaux de température, CO_2, et précipitations obtenues par expérimentation ou modélisation (statistique ou mécaniste) et reportés dans la littérature scientifique internationale. Cette synthèse nous permet d'obtenir des estimations d'impact sur le rendement à l'échelle globale et à l'échelle des continents, en distinguant différents types de cultures et en tenant compte de l'application ou non de stratégies d'adaptation. Nous présentons des résultats obtenus pour les plantes en C3 et C4, et séparément pour quatre cultures majeures : maïs, blé, soja, riz.

Notre analyse repose sur une synthèse de données publiées dans des articles scientifiques. Compte-tenu de la forte variabilité des résultats obtenus entre sites et entre modèles (Asseng et al., 2013 ; Bassu et al., 2014 ; Li et al., 2015 ; Makowski et al., 2015), nous avons choisi de nous focaliser uniquement sur les références bibliographiques rapportant au moins trois sources d'information différentes (e.g., trois modèles de culture ou plus dans des exercices d'inter-comparaison). Notre synthèse inclut ainsi à la fois des résultats produits par des ensembles de modèles de cultures (comme ceux du projet AgMip, Rosenzweig et al., 2014) et par des méta-analyses de rendements simulés (e.g., Challinor et al., 2014 ; Wilcox et Makowski, 2014) ou de données expérimentales (e.g., Zhao et al., 2017).

Cette approche présente plusieurs avantages. Elle nous permet de synthétiser un grand nombre d'études individuelles à partir d'un nombre restreint d'articles, chacun mobilisant plusieurs sources d'information pour estimer l'impact du changement climatique sur les rendements. Les articles sélectionnés fournissent des estimations quantitatives qui peuvent être décrites et combinées entre elles afin d'obtenir une vision synthétique des connaissances disponibles sur l'impact du changement climatique sur les rendements. Enfin, comme chaque estimation repose sur plusieurs sources d'information, il

est possible d'évaluer l'hétérogénéité entre ces sources et de pondérer chaque estimation par une mesure de précision inversement proportionnelle au niveau d'hétérogénéité.

Les articles pris en compte dans ce travail ont été sélectionnés de façon systématique selon une procédure reposant sur des critères explicites. Les données extraites de ces articles ont été analysées à l'aide de modèles statistiques à effets aléatoires, couramment utilisés en méta-analyse. Les niveaux d'incertitudes associées à nos estimations sont présentés de manière systématique pour permettre une évaluation transparente de la robustesse des conclusions.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Recherche bibliographique

Une recherche bibliographique a été effectuée dans le Web of Science pour identifier les études de type « méta-analyse » ou « ensemble de modèles » quantifiant l'impact du changement climatique sur la production agricole. L'équation de recherche suivante a été utilisée :

TITLE: ((Climat* and (change* or event* or condition* or factor* or variability or regime*)) or future or trend* or projecti* or "warming" or forecast* or 2030 or 2040 or 2050 or 2100)

AND TITLE: (Crop or Cereal* or Maize or corn or wheat or rice or barley or sorghum or oat* or rye or triticale or "Sugar plant*" or sugarbeet or sugarcane or beet* or "sugar cane" or Oilcrop* or oleaginous or proteaginous or "oilseed crop*" or Rape* or Soya* or soybean* or Sunflower or "Protein crop*" or pulse* or pea* or "faba bean*" or lupin* or alfalfa or Forages or Grass or fodder or pasture* or canola or bean or grass* or "grain legume*")

AND TOPIC: (meta-analys* OR (meta NEAR analys*) OR meta-model* OR (model* NEAR inter-comp*) OR (model* NEAR intercomp*) OR (model* NEAR ensemble*))

NOT TITLE: (peak or beetle)

Cette requête bibliographique nous a permis de récupérer 113 articles au 14/05/2018.

2.2.2. Sélection des références

Pour être sélectionné, un article doit respecter les critères suivants : (i) il doit concerner une étude de l'impact du changement climatique sur le rendement d'au moins une culture, (ii) il doit présenter les résultats d'au moins trois méthodes d'estimation du rendement différentes et/ou d'au moins trois modèles de culture différents, (iii) il doit présenter des valeurs de rendement ainsi que les caractéristiques des changements climatiques testées (changement de température, CO2, précipitation). Après application des critères de sélection, le corpus final comporte 16 articles de synthèse, publiés entre 2008 et 2018 (Annexe 1). Les cultures représentées sont le blé (6 articles), le maïs (5), le soja (5), le riz (7), l'orge (1) et un article traitant des prairies (1). Selon les cas, ces études sont menées à l'échelle d'une grande région géographique (ex : Europe), d'un pays, ou d'un site local. Les pays les plus représentés sont la Chine (4 articles), le Brésil (4 articles), les USA (3 articles), l'Inde (3 articles) et la France (2 articles). Au total, 15 zones géographiques distinctes sont concernées. Les résultats publiés dans les articles reposent sur la modélisation mécaniste (11) ou statistique (5). Deux articles analysent un ensemble d'expérimentations. Certains articles mobilisent plusieurs méthodes.

2.2.3. Extraction des données

Les informations suivantes ont été extraites des articles sélectionnés :

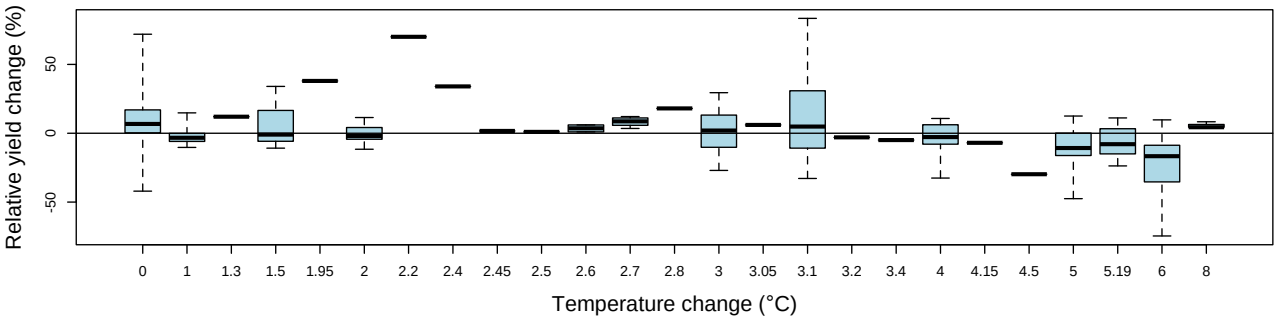
- les références des articles (titre, auteurs, date de publication)
- les coordonnées géographiques pour les études sur site ou les pays ou régions
- les espèces cultivées concernées
- les scénarios du GIEC (RCP) et les changements de température, précipitation et de CO_2 correspondantes

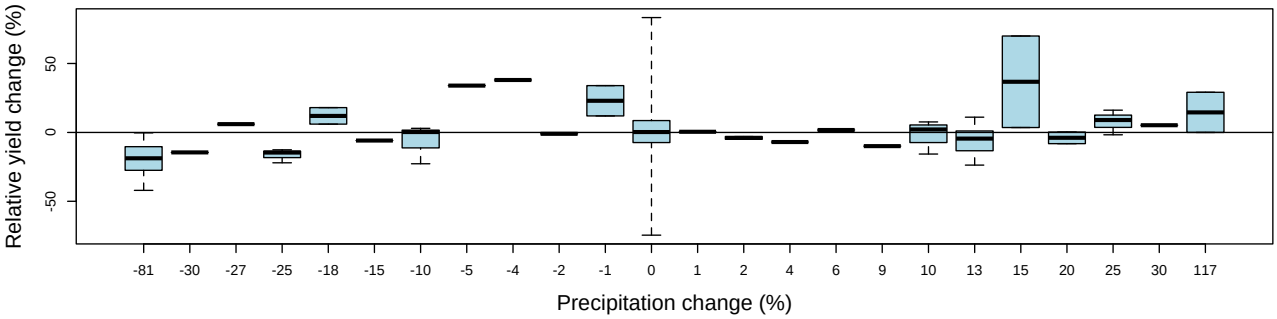
- les horizons futurs considérés et la période de référence
- les impacts moyens du changement climatique sur les rendements (changement relatif du rendement en % de la référence estimé en combinant l'ensemble des modèles/études individuelles disponibles)
- les informations concernant l'incertitude des impacts moyens reportés dans les articles (écarts-types)
- le nombre d'études individuelles ou de modèles analysés
- les stratégies d'adaptation considérées (changement de dates de semis, irrigation, amélioration variétale, lorsqu'elles ont été testées).

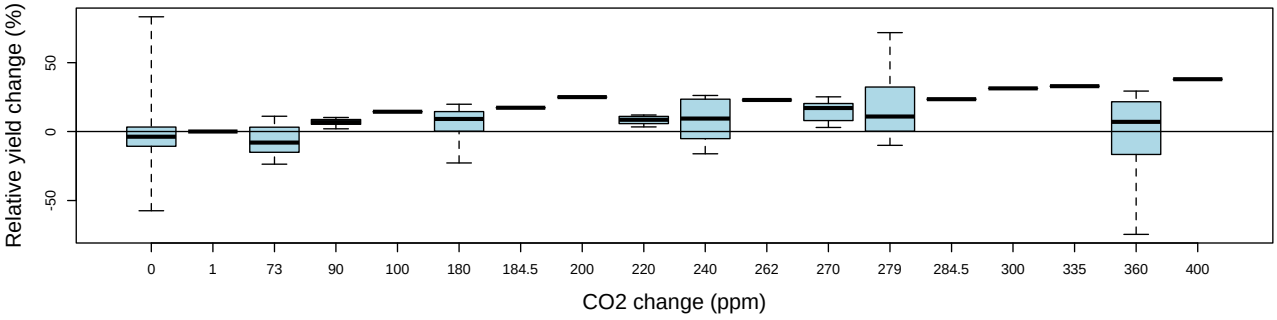
Les données ont été extraites à partir du texte ou des tableaux des 16 articles sélectionnés. Lorsque les données n'étaient pas directement accessibles, le logiciel web plot digitizer[15] a été utilisé pour les extraire à partir des figures. Enfin, certaines informations manquantes ont été récupérées directement auprès des auteurs. Le nombre total de valeurs de changement relatif de rendement extraites des 16 articles est égal à 310. Ces données sont présentées sur la figure 2-1 en fonction des changements de températures, de précipitations, et de concentrations en CO_2 considérés dans les articles sélectionnés. Les valeurs de changement relatif de rendement sont en majorité comprises entre -10% et +10%. Le fichier incluant les données est disponible dans le matériel supplémentaire.

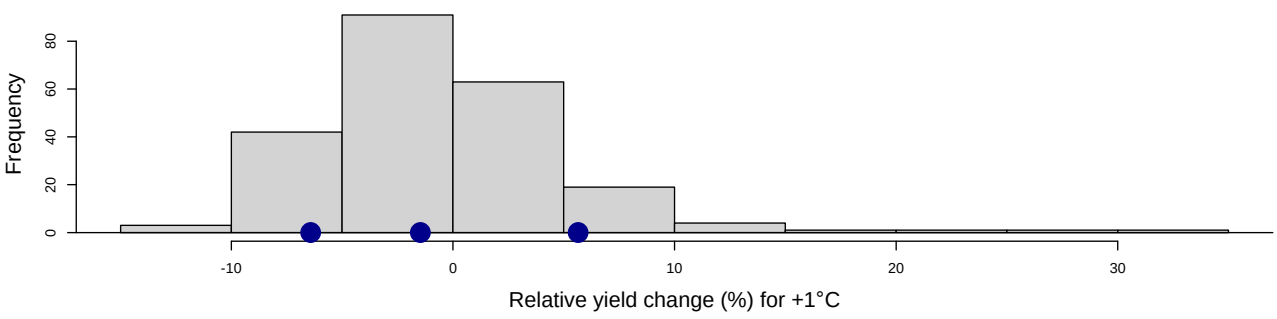
[15] https://apps.automeris.io/wpd/

Figure 2-1. Données extraites de la littérature. Pourcentage relatif de changement de rendement en fonction d'une augmentation de température allant de 0 à +8°C, d'un changement de précipitation allant d'environ -100 à +100%, d'une augmentation de la concentration en CO_2 jusqu'à +400ppm par rapport à la période de référence considérée dans les études. Chaque boite décrit les valeurs minimum, 1er quartile, médiane, 3ème quartile, et maximum à partir de l'ensemble des données disponibles. Lorsqu'une seule donnée est disponible, elle est indiquée par un tiret noir horizontal. Bas : distribution des changements relatifs de rendement pour +1°C, médiane et quartiles de la distribution (points bleus).









2.2.4. Analyse statistique

L'objectif de notre analyse statistique est de modéliser le changement relatif de rendement dû au changement climatique (*Y*) en fonction des changements de température (*T*), de précipitation (*P*), des voies métaboliques de fixation du carbone (i.e., plantes en C3 ou C4), de la concentration atmosphérique de CO_2 (*C*) et de l'adaptation au changement climatique (i.e., modification de date de semis, du choix variétal, et/ou de l'irrigation). Cependant, compte-tenu des données disponibles, une variable globale indiquant l'application ou non de stratégies d'adaptation a été considérée, sans distinguer les différents types d'adaptation.

L'analyse est réalisée avec un modèle mixte incluant un effet aléatoire associé aux différentes études (définies par les combinaisons Articles*Sites car un même article de synthèse peut contenir plusieurs sites). L'effet aléatoire permet de tenir compte de l'hétérogénéité entre les différentes études incluses dans notre base de données. Ce type de modèle est souvent utilisé pour gérer l'hétérogénéité dans les méta-analyses (i.e., des synthèses quantitatives de données collectées dans différentes situations). Un modèle global a été ajusté à l'ensemble des cultures C3, et d'autres modèles ont été ajustés espèce par espèce pour le blé, le maïs, le soja et le riz. Comme la seule espèce C4 incluse dans notre base de données est le maïs, il n'a pas été nécessaire de définir un modèle C4 en plus du modèle maïs.

Le modèle global pour les cultures C3 est défini par :

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

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 précipitation 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 changement climatique, 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 adaptation, et égales à zéro sinon.

Ce modèle comporte deux termes aléatoires. L'effet température a_{Ti} est supposé varier d'une étude à l'autre selon une loi Gaussienne $a_{Ti} \sim N(\mu_T, \sigma_T^2)$, avec μ_T l'espérance de a_{Ti} et σ_T l'écart-type inter-études de a_{Ti}. Ce terme aléatoire permet de tenir compte du fait que l'effet de la température sur le rendement est susceptible de varier en fonction des caractéristiques du milieu et de la culture, mais également de la méthode utilisée (e.g., des modèles de culture sélectionnés). Le terme ε_{ij} est une erreur aléatoire distribuée selon une loi Gaussienne $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \tau_{ij}^2)$, décrivant la variabilité intra-étude, avec τ_{ij} l'écart-type résiduel pour l'étude *i* et le scénario *j*. Les valeurs de τ_{ij} sont supposées être proportionnelles aux écart-types extraits des articles sélectionnés de manière à donner moins de poids aux études les plus incertaines.

Plusieurs variantes du modèle (1) ont été testées selon les hypothèses suivantes : (i) les effets des précipitations, du CO_2, et de l'adaptation varient entre études (comme l'effet de la température a_{Ti} présenté ci-dessus), (ii) d'autres interactions existent entre température et précipitation, et entre précipitation et CO_2. Ces variantes du modèle global (1) n'ont pas été retenues ; soit elles ne pouvaient pas être ajustées aux données du fait de problème d'identifiabilité (modèle trop complexe par rapport aux données disponibles), soit elles conduisaient à des valeurs de AIC (critère d'information d'Akaïke) supérieures reflétant un compromis entre vraisemblance et complexité moins optimal que celui offert par le modèle initial, soit elles incluaient des effets non statistiquement significatifs. L'analyse des résidus n'a pas révélé de problème particulier.

Les analyses espèce par espèce ont été réalisées à l'aide du modèle (1) en estimant ses paramètres à partir des données reportées spécifiquement pour l'espèce considérée. Pour certaines espèces, des versions simplifiées du modèle (1) ont été sélectionnées car elles conduisaient à une réduction du critère AIC. Dans ces situations, les effets de P_{ij}, de l'interaction $C_{ij}T_{ij}$ et/ou de l'adaptation I_{Aij} n'étaient pas significatifs (p>10%).

Les paramètres μ_T, σ_T , a_P, a_C, a_A et a_{CT} ont été estimés par maximum de vraisemblance restreint en utilisant le package lme4 de R. Toutes les valeurs de paramètres estimés des modèles sélectionnés sont disponibles dans l'Annexe 2. Un intervalle de confiance à 95% a été calculé par bootstrap pour chaque estimation.

Un modèle incluant un effet fixe « continent » (Amérique du nord, Amérique du sud, Asie, Afrique, Europe, Océanie) a également été ajusté aux données de manière à fournir des estimations pour les différentes régions du globe (Annexe 3). Les résultats de ce modèle doivent cependant être interprétés avec précaution car ils sont basés sur un nombre faible de données (tout particulièrement pour l'Afrique) et il existe des risques importants de confusion d'effets entre les continents, les régions

considérées dans les études (la plupart des études sont localisées dans des régions particulières et ne couvrent pas l'ensemble d'un continent) et les pratiques agricoles.

La qualité de l'ajustement des modèles statistiques ajustés est semblable pour les deux sources de données considérées (c.-à-d. les ensembles modèles et les méta-analyses) et est meilleure pour le blé (R^2=0,85), le maïs (R^2=0,84) et le soja (R^2=0,89) que pour le riz (R^2=0,5) (Annexe 4). La qualité inférieure obtenue pour le riz est due aux résidus relativement importants obtenus pour un changement de température de +6°C. Les résultats obtenus pour ce niveau doivent donc être interprétés avec prudence pour le riz.

Une fois les paramètres estimés, le modèle C3 global et les modèles sélectionnés espèce par espèce ont été utilisés pour estimer le changement relatif de rendement résultant d'augmentations de température de +2, +3, +4°C, pour des augmentations de teneurs en CO_2 de +0, +100, et +200ppm, des diminutions de précipitation de 0 et -10%, avec et sans adaptation au changement climatique. Les modèles proposés peuvent facilement être réutilisés pour tester d'autres combinaisons de températures et de CO_2 que celles considérées ici.

2.3. Résultats et discussion

2.3.1. Effets marginaux des changements de température, précipitation, concentration en CO_2 et de l'adaptation incrémentale

Les valeurs estimées des paramètres μ_T , a_P , a_C , a_{CT} , et a_A décrivent respectivement les effets marginaux des augmentations de température, précipitation, concentration en CO_2, de l'interaction entre CO_2 et température, et de l'adaptation au changement climatique. Chaque effet marginal quantifie l'impact sur le rendement de l'augmentation d'une unité d'une des variables prise de manière individuelle, i.e., sans tenir compte de l'effet des autres variables. Les valeurs estimées de ces effets sont présentées dans les figures 2-2 et 2-3.

Pour la température (Figure 2-2A), les valeurs estimées vont de -1.42% (pour le riz, C3) à -4.52% (pour le maïs, C4) de rendement pour une augmentation de +1°C. L'estimation globale sur l'ensemble des cultures C3 est égale à -2.40%. Les valeurs estimées sont toutes significatives ($p<0.05$) sauf pour le rendement du soja où l'incertitude est grande et ne permet pas de conclure de manière précise sur l'effet d'une augmentation de température.

Pour le CO_2 (Figure 2-2B), l'effet d'une augmentation de +1ppm est significatif et positif dans tous les cas, mais est nettement plus faible pour le maïs que pour les cultures en C3 (+0.02% de rendement par ppm, soit 2% pour 100ppm). Globalement pour l'ensemble des C3, l'effet atteint +0.09% par ppm soit 9% pour 100ppm. L'interaction entre température et CO_2 est significative pour le riz (Figure 2-2C). Cette interaction est négative ce qui indique que l'effet positif de l'augmentation de CO_2 s'atténue lorsque la température augmente. Cette interaction est due au fait qu'une augmentation de teneur en CO_2 peut générer une augmentation de température au niveau du couvert végétal (Li et al., 2015). Par exemple pour le riz, cette interaction induit une diminution supplémentaire de rendement de -0.02% pour +1ppm et +1°C ou, de manière équivalente, de -2% pour +100ppm et +1°C.

L'effet d'une augmentation de 1% des précipitations sur le rendement est significatif et positif pour les cultures C3 lorsqu'elles sont analysées simultanément (+0.27%), ainsi que pour le blé (+0.43%) et pour le soja (+0.32%) (Figure 2-2D). Pour le maïs, l'effet est proche de zéro et non significatif, en partie parce que le maïs est irrigué par défaut dans la plupart des études sélectionnées mais aussi parce que peu de scénarios prennent en compte une diminution des précipitations pour le maïs dans notre jeu de données. Pour le riz, l'incertitude est grande et ne permet pas de conclure.

L'effet de l'adaptation (toutes adaptations confondues) (Figure 2-3) est significatif lorsque toutes les cultures C3 sont analysées simultanément (+7.25%) et pour le blé (+10.4%). L'effet est proche de zéro pour le maïs. Le fort effet obtenu pour le blé est en partie dû à l'article de Challinor *et al.* (2014) qui reporte un fort effet adaptation (date de semis, variété, irrigation) pour cette culture. Pour le riz et le soja, les résultats sont très incertains et ne permettent pas de conclure.

Figure 2-2. Effets marginaux (quel que soit le niveau d'adaptation) sur le rendement de la température (A), du CO_2 (B), de l'interaction entre température et CO_2 (C), et des précipitations (D) pour toutes les cultures C3 confondues et pour chacune des espèces majeures (blé, maïs, soja, riz). Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. %. La taille du carré est proportionnelle à la précision de chaque estimation. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.

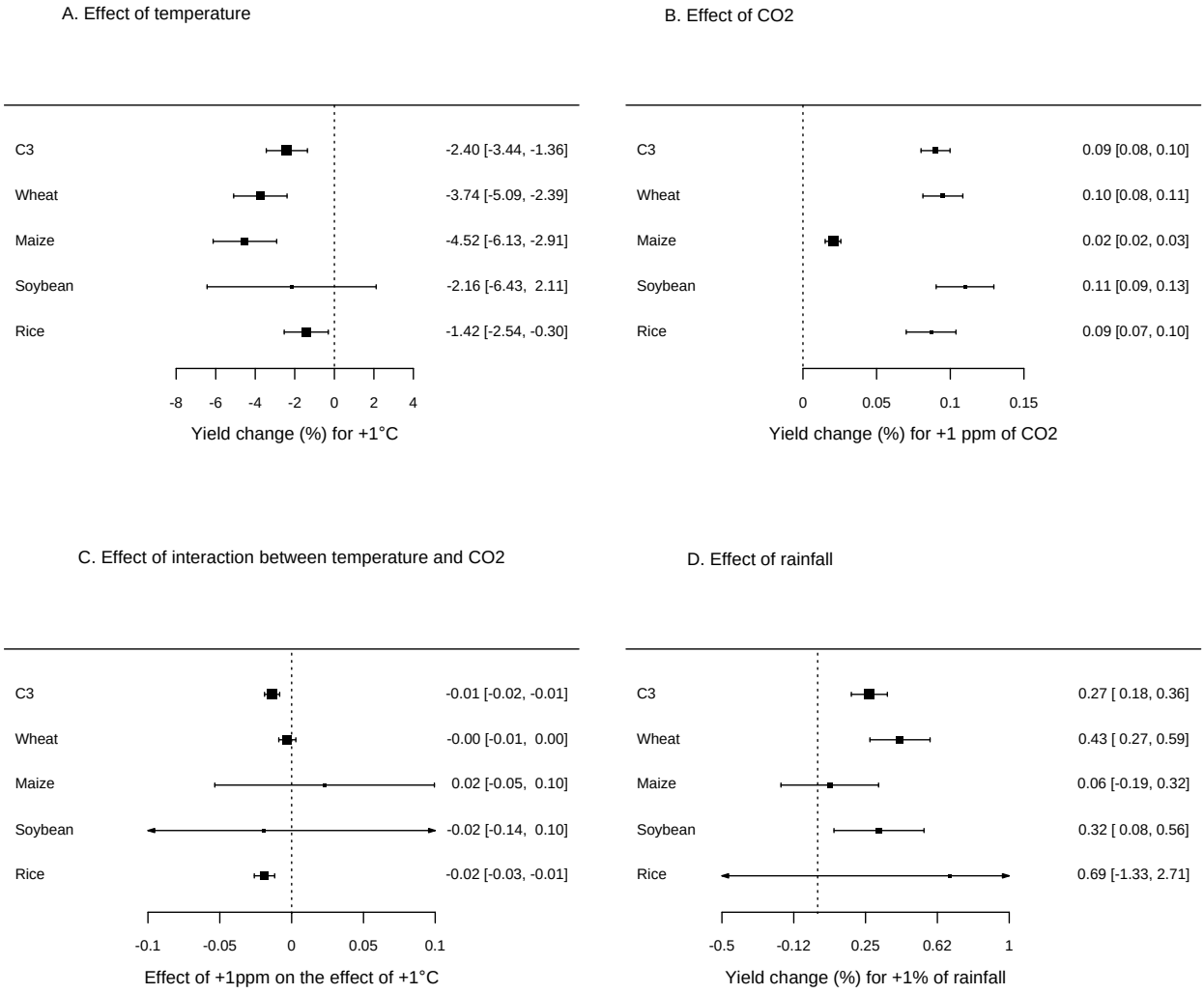
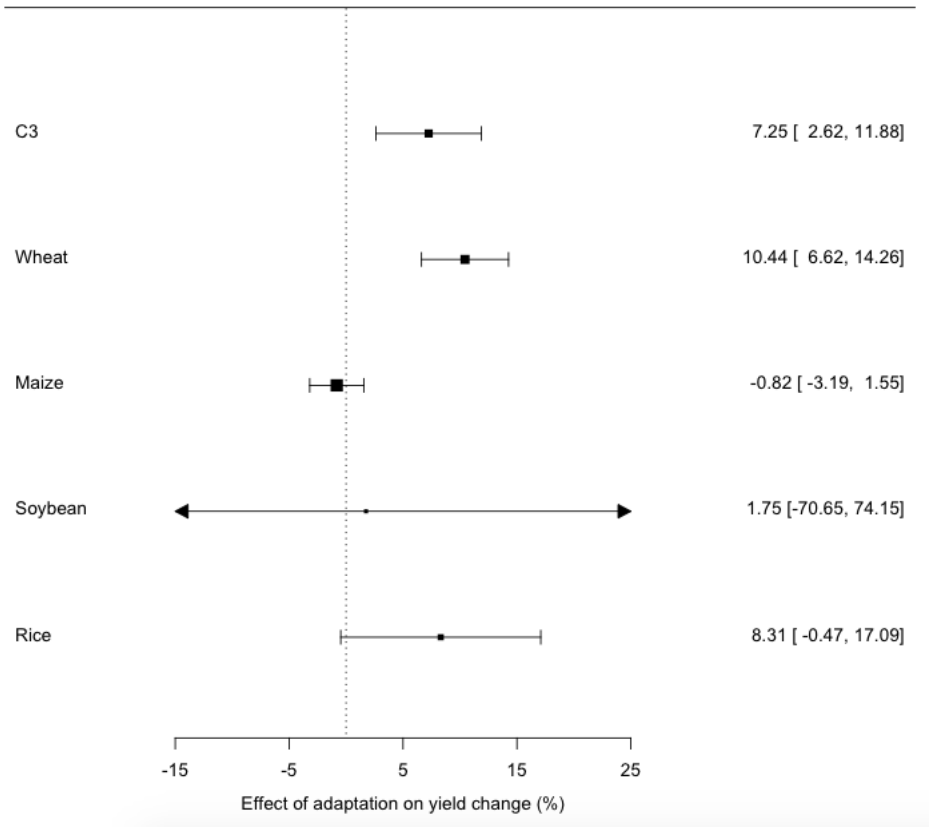


Figure 2-3. Valeurs estimées du paramètre quantifiant l'effet de l'adaptation au changement climatique sur la variation relative de rendement pour toutes les cultures C3 confondues, et pour les espèces majeures. Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.



2.3.2. Estimation de l'effet combiné de changements de température et de teneur en CO2 sur les cultures C3

Dans cette section, nous considérons plusieurs combinaisons possibles de changements de températures et de teneurs en CO_2 et nous quantifions l'impact de ces combinaisons sur les rendements des C3, avec et sans adaptation. Le modèle (1) a été utilisé pour estimer l'effet de différentes combinaisons de changements de température et de concentration en CO_2, avec/sans adaptation, et avec/sans diminution des précipitations (Figure 2-4).

Sans adaptation, pour les cultures C3 prises globalement, des gains de rendement significatifs de +5.1 à +7.8% (selon que les précipitations soient diminuées ou non) sont obtenus lorsque l'augmentation de température est limitée à +2°C et associée à une augmentation de teneur en CO_2 de +200ppm (Figure 2-4A-B). Par contre, les pertes peuvent atteindre de -5.1 à -12.2% si l'augmentation de température atteint +4°C combinée avec une diminution de précipitation de 10% (Figure 2-4B).

En cas d'adaptation au changement climatique (Figure 2-4C-D), pour les C3, les changements relatifs de rendement sont augmentés de +7.25% en moyenne par rapport à une situation sans adaptation. L'effet d'une augmentation de +2 et +3°C sur les rendements des C3 devient soit positif, soit non significativement différent de zéro, selon le niveau d'augmentation de CO_2 considéré. Pour des augmentations de température de +4°C, des pertes de rendement sont non significatives.

Pour les C3, l'augmentation du CO_2 a donc un effet positif sur le rendement, mais cet effet positif s'atténue lorsque l'augmentation de température devient forte à cause de l'interaction entre température et CO_2, estimée à -0.01% pour +1°C et +1ppm toutes cultures C3 confondues (Figure 2-2). Ainsi, lorsque l'augmentation de température atteint +4°C, l'effet de l'interaction atteint -0.04% et compense en partie l'effet positif du CO_2 estimé pour les C3 à +0.09% par ppm. Pour que l'effet positif du CO_2 soit totalement annulé, il faudrait cependant que l'augmentation de température atteigne environ +9°C.

L'impact de l'interaction entre température et CO_2 est également illustré sur la Figure 2-5. Le changement relatif de rendement augmente avec la teneur en CO_2 du fait de l'effet positif du CO_2 sur la photosynthèse. Cependant, cet effet est nettement moins fort à +4°C qu'à +2°C. L'interaction négative entre température et CO_2 vient du fait que l'augmentation de CO_2 génère elle-même une augmentation de température au niveau du couvert végétal (Li et al., 2015).

Des estimations ont également été obtenues pour différentes régions (Amérique du nord, Amérique du sud, Afrique, Europe, Asie, Océanie) (Annexe 4). Les résultats sont incertains pour certaines de ces régions, notamment en Afrique où peu de données sont disponibles. Les pertes de rendement estimées sont plus élevées dans certaines régions, notamment en Amérique du nord et en Amérique du sud (Annexe 4), du fait d'un effet négatif plus fort de l'augmentation des températures sur les rendements. Analyser les résultats par continent implique de regrouper toutes les espèces de façon à avoir un jeu de données de taille suffisante. On ne peut donc pas exclure que cet effet région soit partiellement confondu avec d'autres effets, notamment des effets espèces, pratiques agricoles ou avec le type de méthode utilisée pour estimer l'impact du changement climatique.

Figure 2-4. Effets combinés de différents niveaux d'augmentation de température (+2, +3, +4°C) et de teneur en CO_2 (+0, +100, +200ppm) sur les rendements des cultures en C3. Pas de diminution de précipitation et pas d'adaptation (A), diminution de 10% des précipitations sans adaptation (B), pas de diminution de précipitation avec adaptation (C), diminution de 10% des précipitations avec adaptation (D). Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite des graphiques.

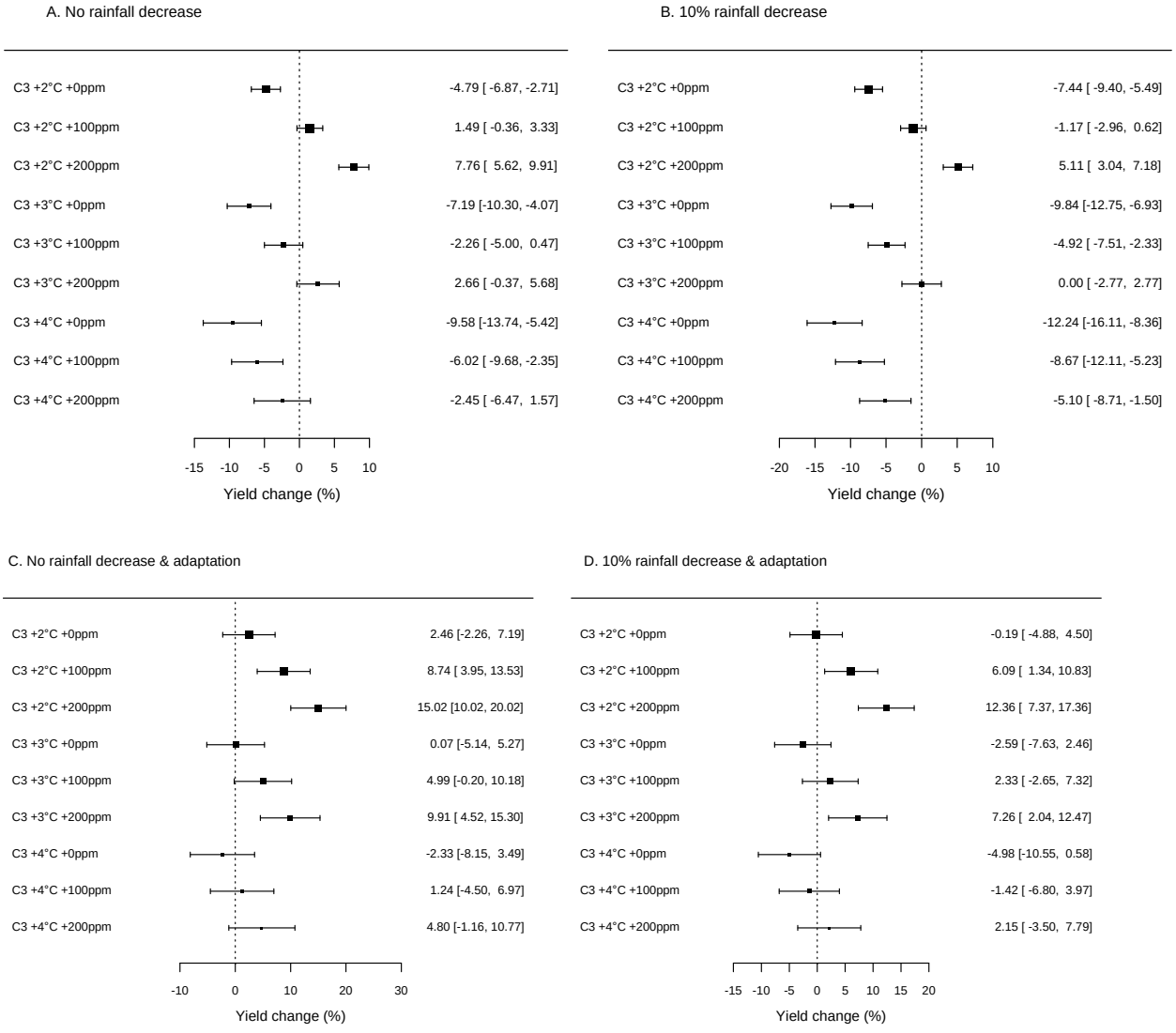
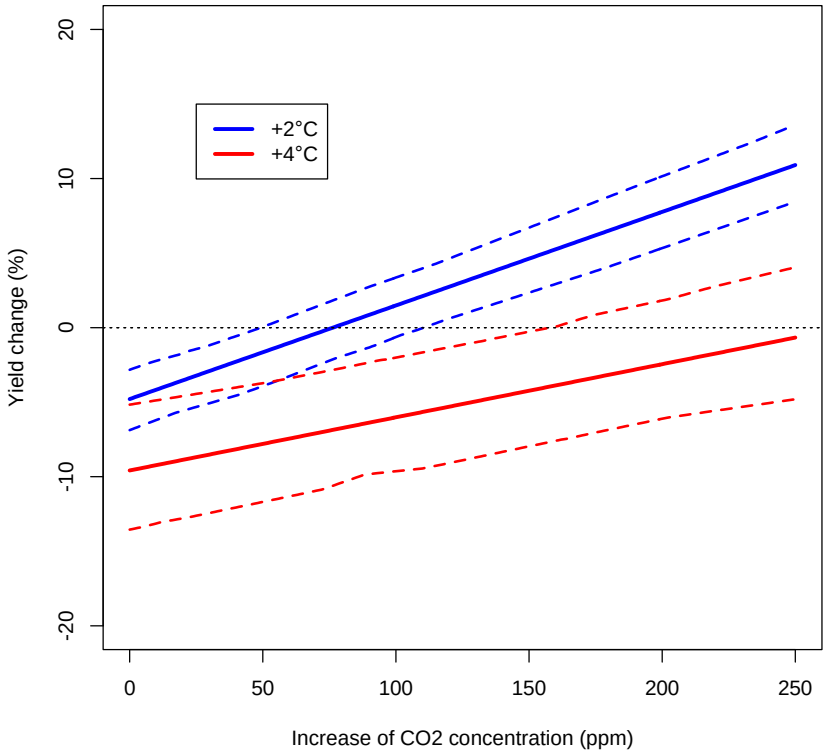


Figure 2-5. Réponse du changement relatif de rendement des cultures en C3 à une augmentation de la teneur en CO_2 (+0 à +250ppm) pour deux niveaux d'augmentation de température (+2 ou +4°C), sans diminution de précipitation et sans adaptation. Les lignes en tirets représentent les intervalles de confiance à 95%. L'effet du CO_2 est moins fort pour les fortes augmentations de température.



2.3.3. Estimation de l'effet du changement climatique sur maïs, blé, soja, riz

Le modèle statistique sélectionné pour le maïs (plante en C4) inclut un effet température et un effet CO_2, mais pas d'effet précipitation, d'interaction, ni d'adaptation (non significatifs, cf. Figures 2-2 et 2-3). Le nombre de données disponibles n'est pas suffisant pour estimer correctement ces effets pour le maïs. Pour cette culture, l'effet conjoint des augmentations de température et de CO_2 est systématiquement négatif (l'effet positif de l'augmentation de la concentration en CO_2 ne compense pas totalement les effets négatifs des températures, en cohérence avec la physiologie des plantes en C4) ; les pertes de rendement estimées sont ainsi comprises entre -4.6% et -17.3% selon le scénario considéré (Figure 2-6). Les pertes estimées pour +4°C dépassent systématiquement -13% mais les niveaux d'incertitudes obtenus pour cette augmentation de température sont élevés et nettement supérieurs à ceux obtenus pour +2 et +3°C.

Pour le blé (plante en C3), le modèle sélectionné inclut tous les effets du modèle (1) sauf l'interaction température/CO_2 qui n'est pas significative (Figure 2-2). Lorsqu'il n'y a pas d'adaptation, l'augmentation de la température est associée à des gains significatifs de rendement si la teneur en CO_2 atteint +200ppm, mais elle peut conduire à des pertes de rendement lorsque l'augmentation de CO_2 est plus faible (Figure 2-7A et B). Les pertes sont plus fortes en cas de diminution des précipitations de -10% mais, malgré l'effet négatif de cette diminution, la perte de rendement du blé n'est pas statistiquement significative lorsque combinée à une augmentation de +4°C et de +200ppm de CO_2(Figure 2-7B). Lorsqu'une stratégie d'adaptation est appliquée, aucune perte significative de rendement n'est estimée pour le blé, avec pour seule exception un cas physiquement peu vraisemblable correspondant à une augmentation de température de +4°C sans augmentation de CO_2 (Figure 2-7C et D). Pour une augmentation de CO_2 de +200ppm associée à une augmentation de température de +4°C, un gain de rendement de 9 à 13% est estimé pour le blé en cas d'adaptation. Dans les études synthétisées ici, l'adaptation repose sur des simulations des effets sur les rendements d'un ajustement des dates de semis et récolte, d'une modification des densités de semis, de l'usage de l'irrigation, ou une modification de la précocité des variétés. Il ne s'agit donc pas de données observées mais de données simulées par des modèles mathématiques.

Pour le soja (plante C3), le modèle sélectionné inclut des effets température, CO_2 et précipitation, mais pas d'effet adaptation ni d'interaction température/CO_2 (effets non significatifs, voir Figures 2-2 et 2-3). Les estimations obtenues sont assez proches de celles obtenues sur blé sans adaptation avec des pertes légèrement plus faibles et des gains légèrement plus forts pour les mêmes combinaisons de température et de CO_2 (Figure 2-8). Pour des augmentations des teneurs en CO_2 de +200ppm, le gain de rendement estimé dépasse 10% pour +2°C, même en cas de diminution de 10% des précipitations. Le gain dépasse également 10% pour une augmentation de température de +3°C si les précipitations ne sont pas diminuées. Le gain de rendement devient par contre non significatif pour +4°C (Figure 2-8).

Pour le riz (plante en C3), le modèle sélectionné inclut des effets température, CO_2, interaction température/CO_2 et adaptation, mais pas d'effet des précipitations (effet non significatif, voir Figure 2-2). Sans adaptation, des pertes de rendement de -3 à -5% sont estimées pour une augmentation de température de +4°C, mais un gain de rendement est estimé si la température n'augmente que de +2°C et si la teneur en CO_2 augmente de +100 ppm et plus (Figure 2-9A). Un léger gain est également estimé si la température augmente de +3°C et la teneur en CO_2 de +200 ppm. Avec adaptation, aucune perte significative de rendement n'est estimée pour des augmentations de température inférieures ou égales à +4°C; les gains de rendement peuvent même atteindre 15% si la température n'augmente que de +2°C et que la teneur en CO_2 augmente de +200ppm (Figure 2-9B).

Figure 2-6. Effet de différents niveaux d'augmentation de température et de teneur en CO_2 sur les rendements du maïs. Notons que certaines combinaisons sont physiquement peu probables (e.g., une augmentation de +4°C pour 0 ppm). Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.

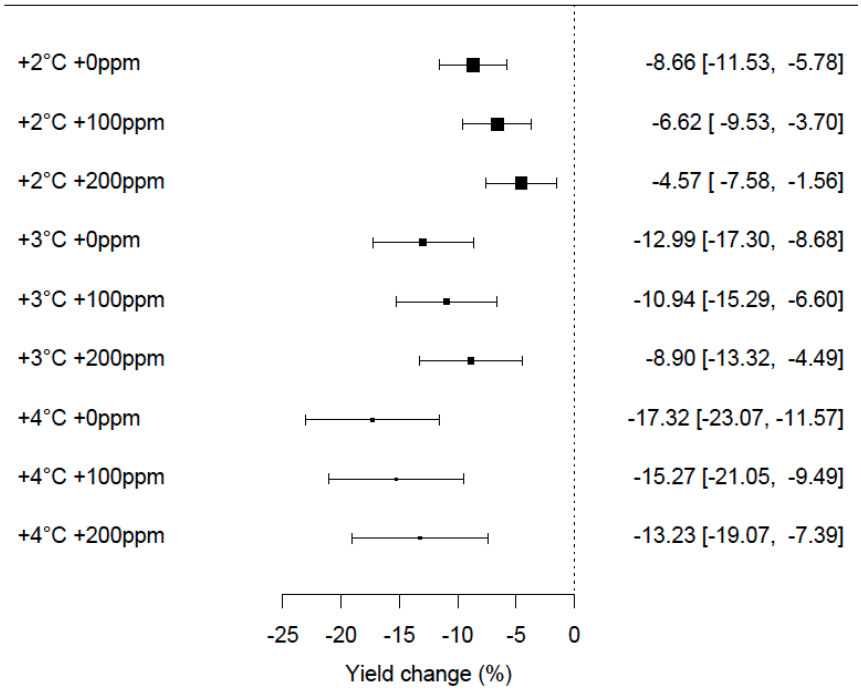


Figure 2-7. Effet de différents niveaux d'augmentation de température (+2, +3, +4°C), de teneur en CO_2 (+0, +100, +200ppm) et de précipitation sur les rendements du blé. Pas de diminution de précipitation et pas d'adaptation (A), diminution de 10% des précipitations sans adaptation (B), pas de diminution de précipitation avec adaptation (C), diminution de 10% des précipitations avec adaptation (D). Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.

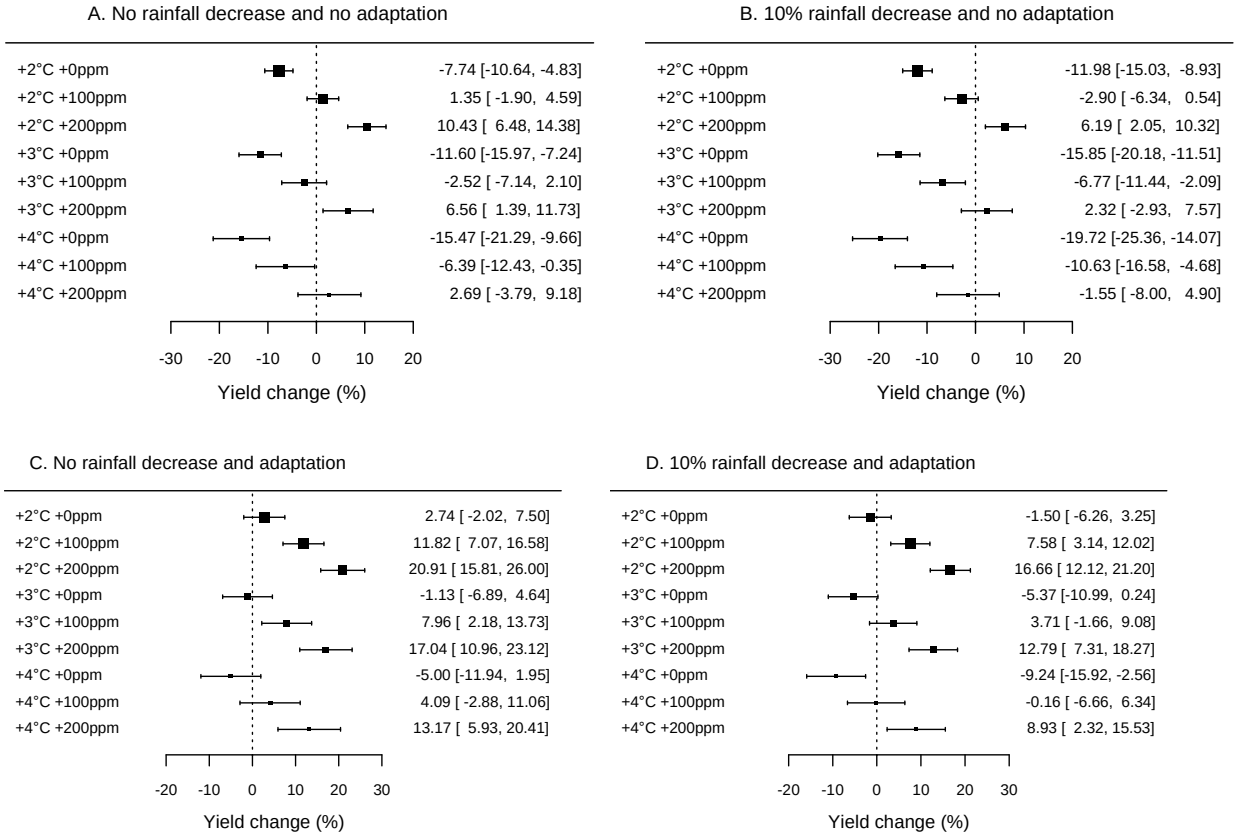


Figure 2-8. Effet de différents niveaux d'augmentation de température (+2, +3, +4°C), de teneur en CO_2 (+0, +100, +200ppm) et de précipitation sur les rendements du soja. Pas de diminution de précipitation (A), diminution de 10% des précipitations (B). L'effet de l'adaptation n'est pas présenté car non significatif pour le modèle soja. Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.

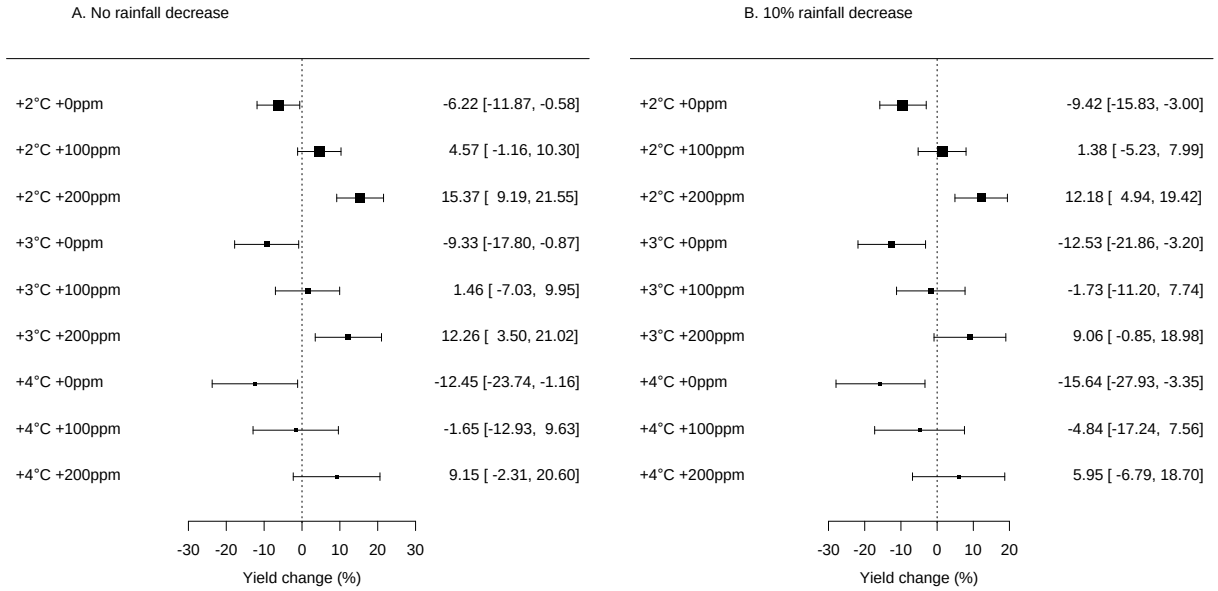
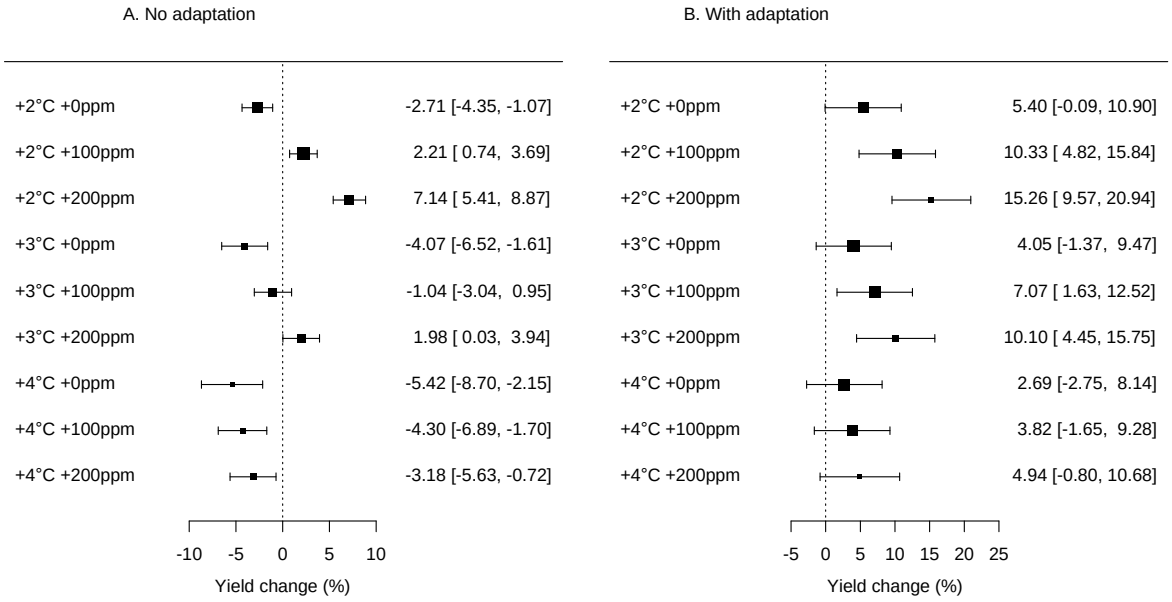


Figure 2-9. Effet sur le rendement du riz de différents niveaux d'augmentation de température (+2, +3, +4°C), et de teneur en CO_2 (+0, +100, +200ppm) avec et sans adaptation. L'effet d'une modification des précipitations n'est pas présenté ici car non significatif. Les carrés correspondent aux valeurs estimées et les barres horizontales représentent les intervalles de confiance à 95%. La taille des carrés est proportionnelle à la précision des estimations. Les valeurs numériques correspondantes sont disponibles à droite.



2.3.4. Comparaison avec des rapports internationaux sur le changement climatique

Nous décrivons ici les principaux résultats de six rapports internationaux suivants :

- Rapport du Joint Research Center (JRC) de 2012 (Donatelli et al., 2012) dont certains résultats ont été repris et complétés dans Donatelli et al. (2015).
- Le rapport Muller et al. (2010) issu du World Development Report 2010 de la Banque mondiale.
- La partie A du 5e rapport du GIEC (IPCC, 2014)
- Le chapitre 3 du rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C (Hoegh-Guldberg et al., 2018)
- Le chapitre 5 « Food security » (Mbow et al. 2019) du rapport du GIEC "Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems"
- Le rapport FAO (2018) (The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050)

Le rapport du JRC (Donatelli et al., 2012) évalue l'effets de plusieurs scénarios de changement climatique sur les rendements du maïs, blé, riz, colza et tournesol. Cette évaluation est faite à l'échelle nationale et à l'échelle des régions NUTS2 dans les pays de l'Union Européenne. Deux modèles climatiques HadCM3 (« warm scenario ») et ECHAM5 (« cold scenario ») sont utilisés, mais un seul modèle de culture (BIOMA_CropSyst) est mobilisé. L'effet du CO_2 est pris en compte mais seules des stratégies d'adaptation incrémentales sont également considérées (groupe de maturité, date de semis). Les projections de rendements sont réalisées à des horizons temporels proches, 2020 (+45ppm de CO_2) et 2030 (+65ppm de CO_2) par rapport à une période de référence correspondant à 1996-2005. Les résultats sont présentés en détail dans la partie 5 du rapport. A titre d'exemple, nous résumons ici les résultats de Donatelli et al. (2012) à l'échelle de l'Union Européenne à l'horizon 2030. Pour le maïs, les simulations de rendement indiquent un gain de rendement de +10% et une perte de -9% pour les scénarios « cold » et « warm », respectivement. Pour riz, l'effet du changement climatique est faible, +1% et -1% pour les scénarios « cold » et « warm », respectivement. Des pertes importantes sont simulées pour le tournesol, -10 à -16% selon le scénario. Pour le blé, une perte de -5% et un gain de +3% sont estimés pour les deux scénarios climatiques considérés. Enfin, pour le colza, une perte de -7% et un gain de +2% sont estimés selon le scénario climatique. Le tournesol mis à part, les pertes moyennées sur les deux scénarios sont donc assez faibles, proches de zéro pour le maïs et le riz, de -1% pour le blé et de -2.5% pour le colza. Ces moyennes cachent cependant de fortes disparités régionales, décrites dans la partie 5 du rapport. Par exemple, pour le blé, les pertes estimées ont tendance à être plus importantes dans le nord que dans le sud. Ces valeurs moyennes sont assez proches de celles que nous obtenons pour le scénario +2°C et +100ppm de CO_2 pour le blé et pour le riz. Les pertes estimées que nous obtenons pour le maïs sont par contre supérieures à celle de Donatelli et al. (2012), ces derniers considérant pour le maïs une irrigation possible à hauteur de 150 mm.

Dans le rapport de Müller et al. (2010), les projections de rendement sont réalisées en moyenne sur un large ensemble de cultures (blé, riz, maïs, mil, pois, betterave sucrière, patate douce, soja, arachide, tournesol, colza). Les rendements simulés ne sont pas présentés culture par culture, mais sont moyennés sur l'ensemble des espèces. Les résultats obtenus pour les plantes en C3 et C4 ne sont donc pas présentés séparément dans ce rapport. Une trentaine de scénarios climatiques sont considérés et les rendements sont simulés avec le modèle LPJmL à l'échelle mondiale. Deux séries de simulations sont réalisées successivement, d'abord sans effet fertilisant du CO_2, puis en prenant en compte cet effet. Lorsque l'effet CO_2 est pris en compte, les résultats indiquent un gain moyen de rendement de 12.4% à l'échelle mondiale. Par contre, sans effet CO_2, une perte moyenne de -6.5% est estimée. Ce résultat est cohérent avec les forts effets positifs du CO_2 sur les rendements estimés dans notre étude pour les plantes en C3. Les auteurs indiquent que la variabilité des scénarios climatiques est une source importante d'incertitude. Des valeurs simulées aux échelles régionales sont disponibles dans le rapport.

Le rapport 5 du GIEC (AR5) publié en 2014 inclut les résultats d'une revue de la littérature sur l'impact du changement climatique. Cinquante-six études basées sur différentes méthodes sont considérées (approches statistiques, mécanistes à l'échelle mondiale et en séparant zones tempérées ou tropicales). L'impact des tendances climatiques sur le rendement est présenté en % par décade pour toutes les espèces confondues. Plus de 20 études reportent une perte de rendement comprise entre 0 et -2.5% par décade et quelques études indiquent un effet plus large, compris entre -2.5 et -5% par décade (p. 492 du rapport AR5). La grande majorité des études synthétisées (54 vs. 2) ne prend pas en compte l'effet du CO_2. Sur l'ensemble des études sans effet du CO_2, la perte médiane atteint environ -0.7% par décade, avec de fortes disparités entre espèces : environ -1.9% (-4%, 0%) par décade pour le blé, proche de zéro pour le soja, proche de zéro pour le riz, environ -1.1% par décade (-3%, -0.5%) pour le maïs. Ces valeurs étant exprimées par décade, il est difficile de les comparer à nos estimations.

Les bénéfices de l'adaptation au changement climatique sont également quantifiés dans le rapport AR5 et varient selon les cultures, les régions et les niveaux de changement de température. Le rapport AR5 indique un effet moyen de +10% de l'adaptation (WGII AR5 Section5.5.1). Cette valeur est assez proche de notre estimation de +7.25% en moyenne sur toutes les cultures C3 et de 10.4% pour le blé. Le fort effet estimé sur le blé est en partie dû à l'article de Challinor (2013) répertorié dans l'AR5. Mais la capacité de certaines stratégies d'adaptation (adaptation variétale et changement des dates de semis) à compenser l'effet négatif du changement climatique sur les rendements a été confirmée dans d'autres études, en particulier par Donatelli et al., (2015) pour le blé, colza et tournesol en Europe.

Le rapport AR5 présente également une comparaison entre régions tempérées et tropicales et montre que les impacts négatifs du changement climatique sont plus forts pour le blé en zone tropicale. Des résultats aux échelles régionales sont disponibles dans le rapport (Part B Regional aspects).

Le rapport du GIEC « 1.5 » (Hoegh-Guldberg et al., 2018) contient une section dédiée aux rendements des cultures mais celle-ci ne présente pas de synthèse. Une conclusion qualitative souligne logiquement l'impact plus important d'un réchauffement de 2°C comparativement à 1.5°C sur les rendements des cultures à l'échelle mondiale.

Le chapitre 5 « Food security » du rapport du GIEC de 2019 (Mbow et al. 2019) présente des résultats d'études récentes évaluant l'impact du changement climatique sur les rendements. Ce chapitre présente notamment plusieurs résultats de Iizumi et al. (2018) obtenus à l'échelle globale, en particulier des gammes d'incertitude (90%) décrivant les impacts probables du changement climatique sur les rendements pour la période 1981-2010. Ces valeurs ont été obtenues en comparant des rendements observés sur cette période à ceux qui auraient pu être obtenus sans changement climatique. Ces gammes sont : [-8.5% ; +0.5%] pour le maïs, [-7.5% ; +4.3%] pour le blé, [-8.4 ; -0.5%] pour le soja et [−9.6 to +12.4%] pour le riz. Ces gammes sont donc assez larges et incluent à la fois des valeurs positives et négatives, sauf pour le soja. Le chapitre 5 de Mbow et al. (2019) présente également des estimations régionales basées soit sur l'analyse des rendements passés, soit sur des projections futures (voir notamment la partie 5.2.2.1 du chapitre 5). Ces résultats montrent que les pertes de rendement risquent d'être plus importantes dans les zones tropicales, en particulier en situation de stress azoté. Le chapitre 5 mentionne l'effet positif du CO_2 sur le rendement mais présente également des résultats montrant l'existence d'un effet négatif du CO_2 sur la qualité de certains produits agricoles, en particulier une diminution de la teneur en protéines, du zinc et du fer.

Le rapport FAO (2018) présente des estimations d'impacts du changement climatique sur les rendements de différents types de cultures à l'horizon 2050 à l'échelle mondiale. Ces estimations sont issues de simulations FAO-IIASA GAEZ obtenues à l'aide d'un ensemble de données climatiques provenant de cinq modèles climatiques différents. Les scénarios RCP 4.5, 6 et 8.5 ont été considérés successivement et ces scénarios correspondent à des augmentations de température d'environ 2.5, 3.5 et 4.5°C respectivement (voir Tableau 3.6 du rapport FAO). Les résultats de ces modèles (voir Figure 3.9 du rapport FAO) suggèrent que le changement climatique aura principalement des impacts négatifs sur les rendements, avec des réductions d'environ 5% au niveau mondial d'ici 2050 par rapport à 2012 toutes cultures confondues. Ce chiffre cache cependant de fortes disparités entre régions et entre cultures. D'après le rapport, l'effet du changement climatique est négatif sur les rendements du blé, y compris en Europe. Il est par contre positif pour le maïs dans la plupart des régions considérées, notamment lorsque celui-ci est irrigué, à l'exception de l'Afrique subsaharienne où le changement climatique a un effet dépressif sur le rendement du maïs même en situations irriguées. L'effet du changement climatique est proche de zéro pour le riz irrigué, sauf en Afrique sub-saharienne où il est négatif et en Chine où l'effet serait nettement positif pour les rendements de cette culture. Il est cependant important de noter que ces résultats ont été obtenus sans prendre en compte l'effet CO_2, qui a un effet positif sur les rendements, notamment sur ceux du blé et du riz.

2.4. Conclusion

Notre étude repose sur une synthèse quantitative d'une grande diversité d'études estimant l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures. Ces études mettent en œuvre différentes méthodes : expérimentations, modèles statistiques, modèles mécanistes ou des combinaisons de ces approches. Les études comparatives récentes entre méthodes montrent qu'il n'y a pas de différence systématique entre ces approches, mais que leur niveau de convergence est variable, et qu'une combinaison de méthodes permet souvent d'obtenir des résultats plus fiables. Chacune de ces méthodes ayant ses propres avantages et inconvénients (par exemple dans leur compromis entre représentation des processus et incertitude), nous avons choisi de toutes les prendre en compte, de les synthétiser quantitativement et d'analyser les incertitudes.

Pour les plantes en C3, notre synthèse montre que les effets positifs de l'adaptation (+7.25% pour l'ensemble des C3) et du CO_2 (+9% pour +100ppm pour l'ensemble des C3) seraient suffisamment élevés pour compenser les effets négatifs d'une augmentation de température, même de +4°C. Par contre, pour le maïs (seule plante C4 représentée dans notre base de données), le faible effet positif du CO_2 et l'absence d'effet significatif des stratégies d'adaptation entrainent des pertes de rendement élevées, de l'ordre de -10% pour +4°C. Ces estimations sont des estimations moyennes qui peuvent masquer une forte variabilité interannuelle et spatiale.

Ces résultats soulignent l'importance d'obtenir des estimations fiables de l'effet du CO_2 et de l'effet des stratégies d'adaptation aux changements climatiques. En particulier, les mécanismes à l'origine de l'interaction entre température et CO_2 (significative pour certaines cultures) mériteraient d'être étudiés de manière plus précise.

Les effets de l'adaptation sont également assez incertains, notamment pour le soja et le riz, mais aussi pour le maïs. Il est important de noter que, dans les études considérées ici, les stratégies d'adaptation ont été testées par modélisation dans des conditions optimales, et les bénéfices simulés doivent être considérés comme des valeurs potentielles. La faisabilité de leur utilisation pratique doit être prise en compte en fonction des contraintes locales et de leurs coûts de mise en œuvre. Des contraintes pratiques ou sociales, ou encore les impacts environnementaux pourraient réduire l'intérêt de certaines stratégies d'adaptation comme, par exemple, l'irrigation.

Références citées dans le Chapitre 2

Ainsworth, E.A. & Long, S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO2. *New Phytologist*, 165(2), pp.351–372.

Asseng, S. et al., 2019. Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global change biology*.

Asseng, S. et al., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), pp.827–832.

Bale, J.S. et al., 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global change biology*, 8(1), pp.1–16.

Basso, B. et al., 2015. Can impacts of climate change and agricultural adaptation strategies be accurately quantified if crop models are annually re-initialized? *PLoS One*, 10(6), p.e0127333.

Bassu, S. et al., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology*, 20(7), pp.2301–2320.

Ben-Ari, T. et al., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nat Comm*.

Brisson, N. & Levrault, F., 2010. *Climate change, agriculture and forests in France: simulations of the impacts on the main species. The Green Book of the CLIMATOR project (2007–2010)*, Anfers: ADEME.

Caubel, J. et al., 2018. Assessing future meteorological stresses for grain maize in France. *Agricultural Systems*, 159, pp.237–247.

Challinor et al. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Climate Change. Vol 4.

Crane-Droesch, A., 2018. Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. *Environmental Research Letters*, 13(11), p.114003.

De la Haba, P., De la Mata, L., Molina, E., Agüera, E., 2014. High temperature promotes early senescence in primary leaves of sunflower (Helianthus annuus L.) plants. *Canadian Journal of Plant Science* 94 (4), pp. 656-669

Deutsch, C.A. et al., 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), pp.916–919.

Donatelli M., G. Duveiller, D. Fumagalli, A. Srivastava, A. Zucchini, V. Angileri, D. Fasbender, P. Loudjani, S. Kay, V. Juskevicius, T. Toth, P. Haastrup, R. M'barek, M. Espinosa, P. Ciaian, S. Niemeyer. 2012. Assessing Agriculture Vulnerabilities for the design of Effective Measures for Adaption to Climate Change. Joint Research Center

Donatelli M., Kumar Srivastava A., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D. 2015. Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. Environ. Res. Lett. 10, 075005

Dong, J. et al., 2016. Northward expansion of paddy rice in northeastern Asia during 2000–2014. *Geophysical research letters*, 43(8), pp.3754–3761.

FAO (2018). The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Rome. 224 pp

Fitzgerald, G.J. et al., 2016. Elevated atmospheric [CO2] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Global change biology*, 22(6), pp.2269–2284.

Gouache, D. et al., 2013. Modelling climate change impact on Septoria tritici blotch (STB) in France: accounting for climate model and disease model uncertainty. *Agricultural and forest meteorology*, 170, pp.242–252.

Grantham, T.E. & Viers, J.H., 2014. 100 years of California's water rights system: patterns, trends and uncertainty. *Environmental Research Letters*, 9(8), p.84012.

Hasegawa, T. et al., 2013. Climate change impact and adaptation assessment on food consumption utilizing a new scenario framework. *Environmental science & technology*, 48(1), pp.438–445.

Hoegh-Guldberg O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S. I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, G. Zhou, 2018, Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)].

Hunt, J.R. et al., 2018. Opportunities to reduce heat damage in rain-fed wheat crops based on plant breeding and agronomic management. *Field Crops Research*, 224, pp.126–138.

Jones, G. V et al., 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3), pp.319–343.

Kimball, B.A., Kobayashi, K. & Bindi, M., 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO2 enrichment. In *Advances in agronomy*. Elsevier, pp. 293–368.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Li, T. et al. 2015. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions Glob. Chang. Biol. 21, 1328–1333

Li, X. & Troy, T.J., 2018. Changes in rainfed and irrigated crop yield response to climate in the western US. *Environmental Research Letters*, 13(6), p.64031.

Lipper, L. et al., 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature climate change*, 4(12), p.1068.

Lobell, D.B. & Asseng, S., 2017. Comparing estimates of climate change impacts from process- based and statistical crop models. *Environmental Research Letters*, 12, pp.1–12. Available at: http://doi.org/10.1088/1748-9326/015001.

Lobell, D.B. & Asseng, S., 2017. Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models. *Environmental Research Letters*, 12(1), p.15001.

Lobell, D.B., Schlenker, W. & Costa-Roberts, J., 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 333(6042), pp.616–620. Available at: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21551030 [Accessed May 26, 2014].

Long, S.P. et al., 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO2 concentrations. *Science*, 312(5782), pp.1918–1921.

Makowski D. et al. 2015. A statistical analysis of ensembles of crop model responses to climate change factors. Agriculture and Forest Meteorology 214–215, 483–493

Mbow C. et al., 2019. Chapter 5 Food security. In: "Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems".

Moat, J. et al., 2017. Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. *Nature plants*, 3(7), p.17081.

Müller, Christoph; Bondeau, Alberte; Popp, Alexander; Waha, Katharina; Fader, Marianela. 2010. Climate Change Impacts on Agricultural Yields. Washington, DC: World Bank. © World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9065 License: CC BY 3.0 IGO.

Nevame, A.Y.M. et al., 2018. Relationship between High Temperature and Formation of Chalkiness and Their Effects on Quality of Rice. *BioMed Research International*, 2018, pp.1–18. Available at: https://www.hindawi.com/journals/bmri/2018/1653721/.

Nuccio, M.L. et al., 2018. Where are the drought tolerant crops? An assessment of more than two decades of plant biotechnology effort in crop improvement. *Plant Science*.

Olesen, J.E. et al., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), pp.96–112.

Parker, L.E. & Abatzoglou, J.T., 2018. Shifts in the thermal niche of almond under climate change. *Climatic Change*, 147(1–2), pp.211–224.

Powlson, D.S. et al., 2016. Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, pp.164–174.

Ray, D.K. et al., 2015. Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nat Commun*, 6. Available at: http://dx.doi.org/10.1038/ncomms6989.

Roberts, M.J. et al., 2017. Comparing and combining process-based crop models and statistical models with some implications for climate change. *Environmental Research Letters*, 12(9).

Roos, J. et al., 2011. The impact of global warming on plant diseases and insect vectors in Sweden. *European Journal of Plant Pathology*, 129(1), pp.9–19.

Rosenzweig et al. 2014. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111, 3268-3273, doi:10.1073/pnas.1222463110

Saadi, S. et al., 2015. Climate change and Mediterranean agriculture: impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, pp.103–115.

Schlenker, W. & Lobell, D.B., 2010. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1), p.14010.

Seifert, C.A. & Lobell, D.B., 2015. Response of double cropping suitability to climate change in the United States. *Environmental Research Letters*, 10(2), p.24002.

Seneweera, S. & Norton, R.M. (2011) Plant responses to increased carbon dioxide. In : Crop Adapatation to Climate Change, 1st edition, pp. 198-217, John Wiley & Sons, Ltd.

Soltani, A. & Sinclair, T.R., 2012. *Modeling physiology of crop development, growth and yield*, Wallingford, Oxfordshire, Cambridge, UK: CABI.

Verchot, L. V et al., 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(5), pp.901–918.

Wallach, D. et al., 2019. *Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment*, Academic Press. Third edition.

Webb, L.B. et al., 2012. Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices. *Nature Climate Change*, 2(4), p.259.

Wilcox, J. & Makowski, D. 2014. Field Crops Research 156, 180-190, doi:10.1016/j.fcr.2013.11.008

Wolfe, D.W. et al., 2018. Unique challenges and opportunities for northeastern US crop production in a changing climate. *Climatic Change*, 146(1–2), pp.231–245.

Wu, X. et al., 2017. Responses of Winter Wheat Yields to Warming-Mediated Vernalization Variations Across Temperate Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, p.126. Available at: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fevo.2017.00126.

Yadav, S.K., 2010. Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review. Agron Sustain Dev 30: 515–527.

Zabel, F., Putzenlechner, B. & Mauser, W., 2014. Global agricultural land resources–a high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. *PloS one*, 9(9), p.e107522.

Zhao, C. et al., 2016. Field warming experiments shed light on the wheat yield response to temperature in China. *Nature Communications*, 7, p.8.

Zhao, C. et al., 2017. Plausible rice yield losses under future climate warming. *Nature Plants*, 3(1), p.5.

Zhu, P. et al., 2018. The important but weakening maize yield benefit of grain filling prolongation in the US Midwest. *Global change biology*.

Annexes du Chapitre 2

Annexe 2-1. Références incluses dans la base de données

ID Paper	Références	Année	Cultures étudiées	Régions étudiées
1	Bassu et al. 2014. Global change biology 20 2301-2320	2014	Maïs	France; Usa; Brésil ; Tanzanie
2	Zhao et al. 2017 PNAS	2017	Maïs ; Blé ; Riz ; Soja	Global; France; Chine; Inde; France, USA; Brésil; Russie; Vietnam; Bangladesh
5	Asseng, S. et al. 2013. Nature Climate Change 3, 827-832,	2013	Blé	Australie, Argentine, Inde, Pays-Bas
6	Battisti, R. et al. 2018. Crop & Pasture Science 69, 154-162	2018	Soja	Brésil
7	Li, T. et al. 2015. Glob. Chang. Biol. 21, 1328–1333	2015	Riz	Japon; Chine; Inde; Philippines
8	Yin et al. 2014. Earth System Dynamics 6, 45-59	2014	Maïs; Blé; Riz; Soja	Chine
9	Rosenzweig et al. 2014. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111, 3268-3273	2014	Riz	Global
10	Roberts et al. 2017. Environmental Research Letters 12	2017	Maïs	USA
12	Tao, F. L. et al. 2018. Global Change Biology **24**, 1291-1307,	2018	Orge	Finlande, Espagne
13	Zhao, C. et al. 2017. Nat. Plants 3, 5	2017	Riz	Global
15	Battisti, R. et al. 2018. International Journal of Biometeorology. 62:823-832	2018	Soja	Brésil
3	Challinor et al. 2014. Nature Climate Change.Vol 4.	2014	Blé; Maïs; Riz; Soja; All	Global
4	Ainsworth, E. A. 2008. Global Change Biology **14**, 1642-1650,	2008	Riz	Global
11	Wilcox, J. & Makowski, D. 2014. Field Crops Research 156, 180-190	2014	Blé	Global
13	Zhao, C. et al. 2017. Nat. Plants 3, 5	2017	Riz	Global
14	Zhao, C. et al. 2016. Nat. Commun. 7, 8	2016	Blé	Chine
16	Dellar, M et al. 2018. Agriculture, Ecosystems and Environment 265, 413-420	2018	Pastures	Europe

Annexe 2-2. Valeurs estimées des paramètres des modèles sélectionnés

Modèle C3 global

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT + DP + DCO2 + DT:DCO2 + Adapt - 1 + (DT - 1 | Site)
   Data: DATA3
Weights: W

REML criterion at convergence: 1901.1

Scaled residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-3.0668 -0.4620  0.0169  0.5135  3.4705

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT    3.583   1.893
 Residual      28.615   5.349
Number of obs: 250, groups:  Site, 36

Fixed effects:
          Estimate Std. Error         df t value Pr(>|t|)
DT       -2.395322   0.528638  22.600000  -4.531 0.000156 ***
DP        0.265387   0.048195 227.890000   5.507 9.84e-08 ***
DCO2      0.089903   0.005520 222.690000  16.287  < 2e-16 ***
Adapt     7.253265   2.364640 149.900000   3.067 0.002563 **
DT:DCO2  -0.013563   0.002667 238.280000  -5.085 7.44e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
        DT     DP     DCO2   Adapt
DP       0.004
DCO2    -0.020  0.022
Adapt   -0.153 -0.003 -0.032
DT:DCO2 -0.321 -0.002 -0.491 -0.019
```

Modèle « maïs »

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT + DCO2 - 1 + (DT - 1 | Site)
   Data: DATA
Weights: W

REML criterion at convergence: 337.8

Scaled residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.60850 -0.47480  0.07408  0.55207  2.75979

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT   6.243    2.499
 Residual      3.597    1.897
Number of obs: 60, groups:  Site, 16

Fixed effects:
      Estimate Std. Error        df t value Pr(>|t|)
DT   -4.329564   0.750532 14.390000  -5.769 4.37e-05 ***
DCO2  0.020439   0.002654 46.000000   7.701 8.18e-10 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
     DT
DCO2 -0.004
```

Modèle « blé »

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT + DCO2 + DP + Adapt - 1 + (DT - 1 | Site)
   Data: DATA
Weights: W

REML criterion at convergence: 567.3

Scaled residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-3.8263 -0.4852 -0.0375  0.5223  1.6460

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT   4.93     2.220
 Residual      9.29     3.048
Number of obs: 88, groups:  Site, 17

Fixed effects:
       Estimate Std. Error        df t value Pr(>|t|)
DT    -3.867998   0.694177 15.270000  -5.572 5.00e-05 ***
DCO2   0.090831   0.005918 75.810000  15.347  < 2e-16 ***
DP     0.424505   0.083951 75.010000   5.057 2.93e-06 ***
Adapt 10.476884   1.946358 77.960000   5.383 7.49e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
      DT     DCO2   DP
DCO2  -0.101
DP    -0.025  0.000
Adapt -0.082  0.008  0.002
```

Modèle « Soja »

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT + DP + DCO2 - 1 + (DT - 1 | Site)
   Data: DATA
Weights: W

REML criterion at convergence: 214

Scaled residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-1.9949 -0.3951 -0.1319  0.5470  2.1524

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT   10.66    3.265
 Residual      15.60    3.950
Number of obs: 31, groups:  Site, 7

Fixed effects:
      Estimate Std. Error        df t value Pr(>|t|)
DT   -3.111516   1.501513  5.413000  -2.072   0.0887 .
DP    0.319310   0.119158 24.226000   2.680   0.0130 *
DCO2  0.107961   0.009756 25.881000  11.066 2.61e-11 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
     DT     DP
DP   -0.035
DCO2 -0.125  0.001
```

Modèle « Riz »

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT * DCO2 + Adapt - 1 + (DT - 1 | Site)
   Data: DATA
Weights: W

REML criterion at convergence: 699.5

Scaled residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.50377 -0.58099 -0.08516  0.49593  1.82144

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT    0.00    0.0
 Residual      38.44    6.2
Number of obs: 91, groups:  Site, 17

Fixed effects:
         Estimate Std. Error        df t value Pr(>|t|)
DT      -1.355885   0.559663 87.000000  -2.423   0.0175 *
DCO2     0.087291   0.008604 87.000000  10.146 2.22e-16 ***
Adapt    8.115572   4.457958 87.000000   1.820   0.0721 .
DT:DCO2 -0.019012   0.003572 87.000000  -5.322 7.88e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
        DT     DCO2   Adapt
DCO2    -0.037
Adapt   -0.382  0.014
DT:DCO2 -0.498 -0.593  0.190
```

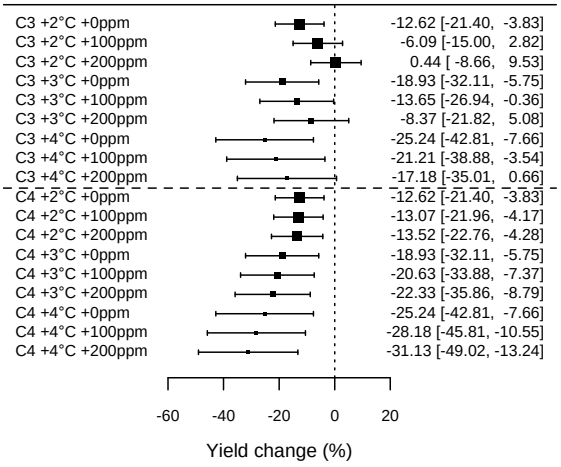
Modèle incluant un effet « continent »

```
Linear mixed model fit by REML
t-tests use  Satterthwaite approximations to degrees of freedom ['lmerMod']
Formula: Y ~ DT:Continent + DP + C3C4:DCO2 + DT:DCO2 + Adapt - 1 + (DT -      1 | Site)
   Data: DATA
Weights: W

REML criterion at convergence: 1484.9

Scaled residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-2.9948 -0.5117 -0.0201  0.4860  3.2960

Random effects:
 Groups   Name Variance Std.Dev.
 Site     DT    0.6711  0.8192
 Residual      32.3103  5.6842
Number of obs: 196, groups:  Site, 33

Fixed effects:
                       Estimate Std. Error         df t value Pr(>|t|)
DP                     0.260858   0.050351 180.970000   5.181 5.86e-07 ***
Adapt                 11.445291   3.479551   2.550000   3.289 0.058265 .
DT:ContinentAsia      -2.866790   0.663534  12.230000  -4.320 0.000953 ***
DT:ContinentEurope    -1.353741   0.833377   9.860000  -1.624 0.135797
DT:ContinentN_America -6.308332   2.199346 148.270000  -2.868 0.004730 **
DT:ContinentOceania   -2.904992   1.086055  11.320000  -2.675 0.021141 *
DT:ContinentS_America -5.682187   0.784701   3.720000  -7.241 0.002548 **
C3C4Cfour:DCO2         0.024351   0.009428 173.310000   2.583 0.010626 *
C3C4Cthree:DCO2        0.090251   0.006155 175.950000  14.663  < 2e-16 ***
DT:DCO2               -0.012479   0.002862 167.640000  -4.360 2.26e-05 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:
            DP     Adapt  DT:CnA DT:CnE DT:CN_ DT:CnO DT:CS_ C3C4Cf:DCO2 C3C4Ct:DCO2
Adapt       -0.014
DT:CntnntAs -0.056  0.171
DT:CntnntEr  0.027  0.069  0.121
DT:CntnnN_A -0.042  0.001  0.002 -0.001
DT:CntnntOc -0.013  0.128  0.221  0.092  0.001
DT:CntnnS_A -0.005 -0.532  0.100  0.042  0.000  0.075
C3C4Cf:DCO2 -0.002 -0.002 -0.014 -0.001  0.000 -0.002 -0.001
C3C4Ct:DCO2  0.029 -0.151 -0.021  0.003 -0.001 -0.012  0.012  0.004
DT:DCO2      0.011 -0.192 -0.459 -0.197  0.000 -0.346 -0.166  0.002      -0.502
```

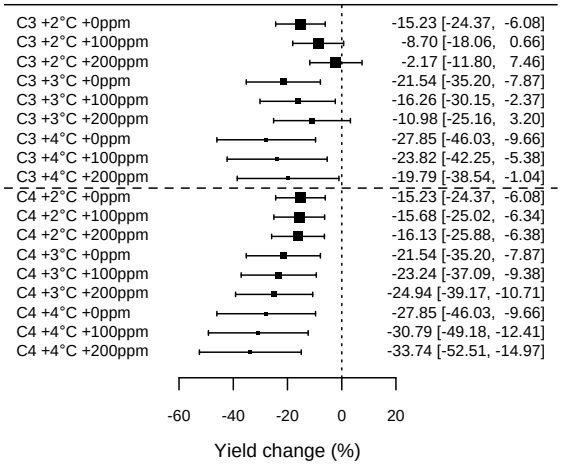
Annexe 2-3. Effets sur les rendements estimés pour différents continents

Amérique du nord

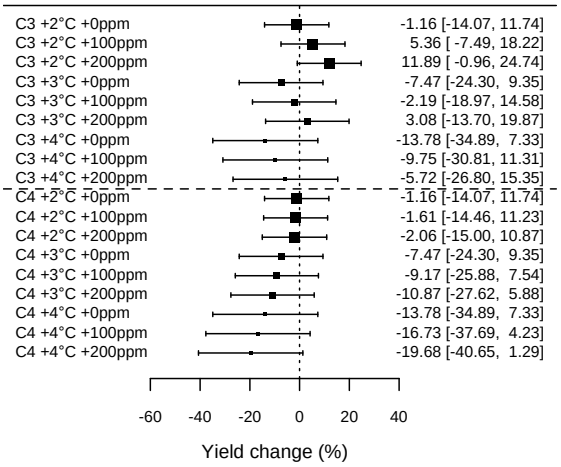
A. No rainfall decrease



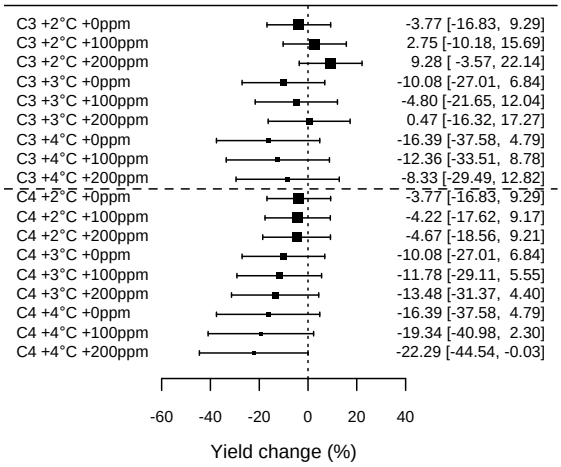
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

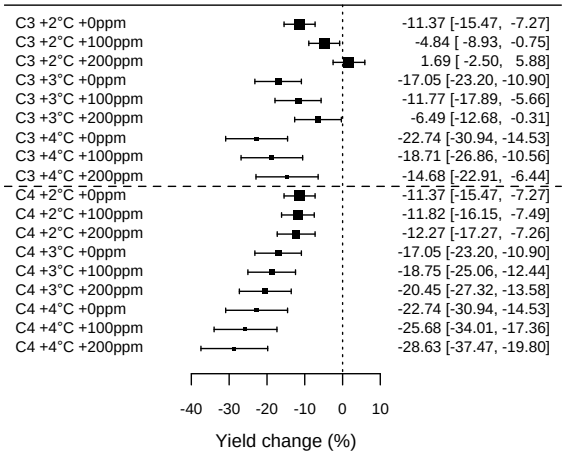


D. 10% rainfall decrease & adaptation

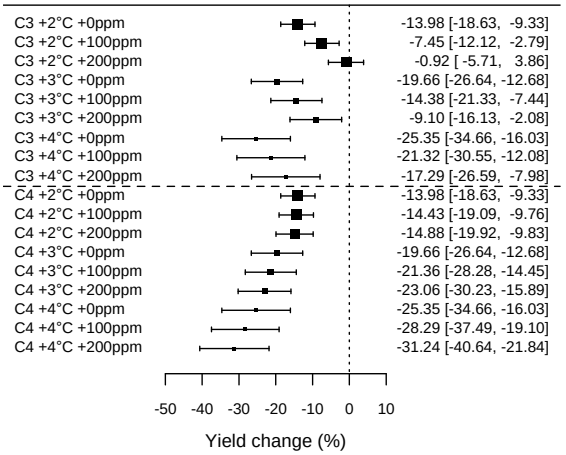


Amérique du sud

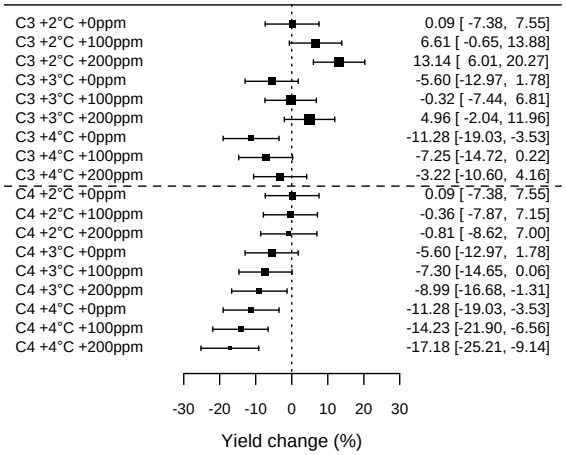
A. No rainfall decrease



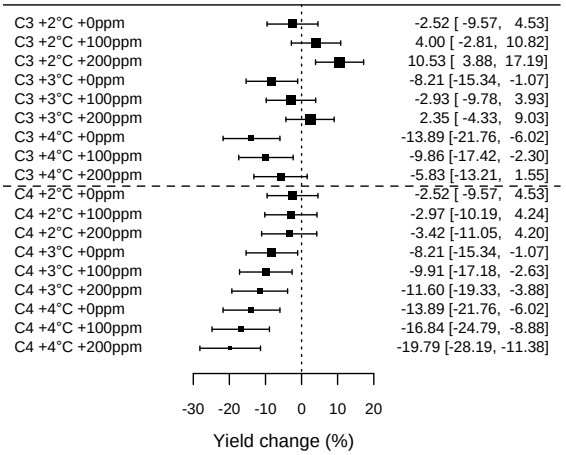
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

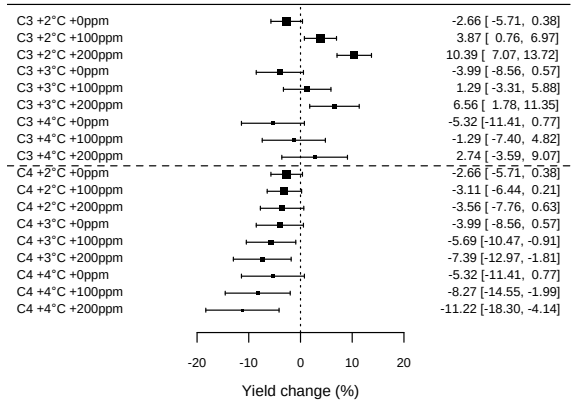


D. 10% rainfall decrease & adaptation

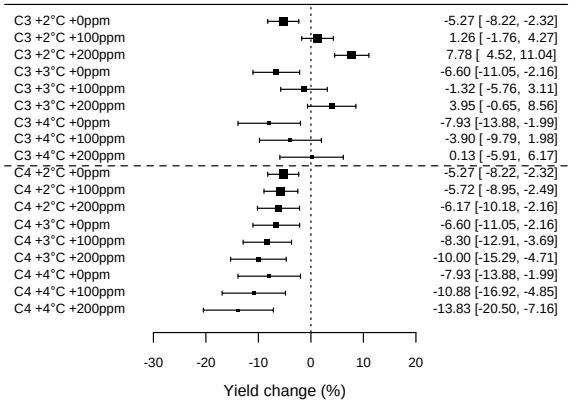


Europe

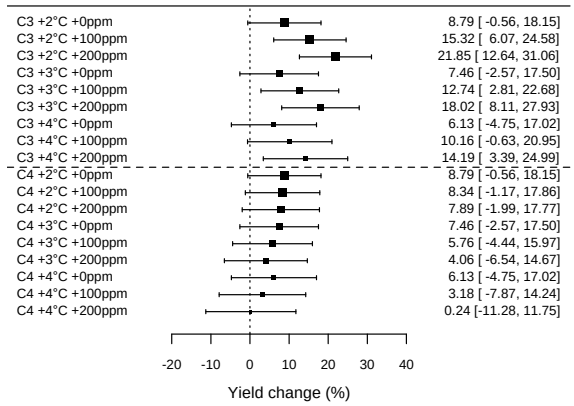
A. No rainfall decrease



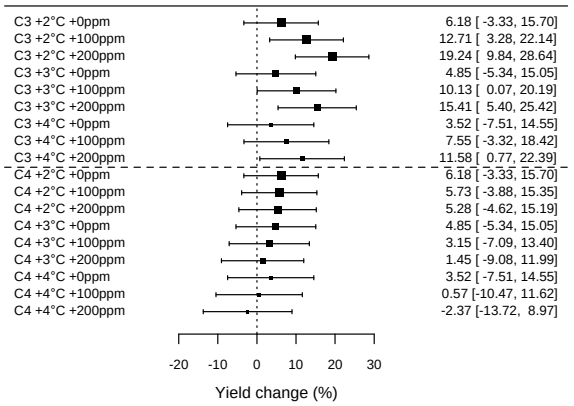
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

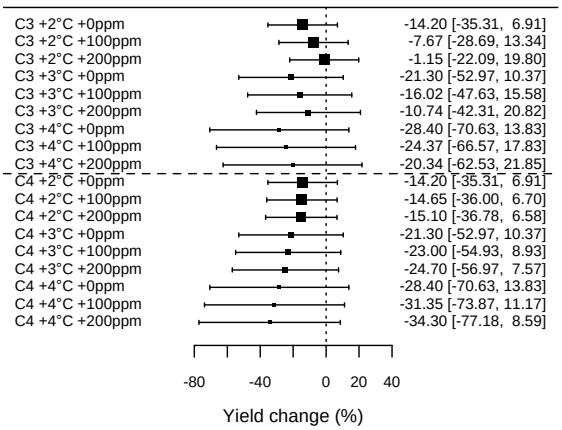


D. 10% rainfall decrease & adaptation

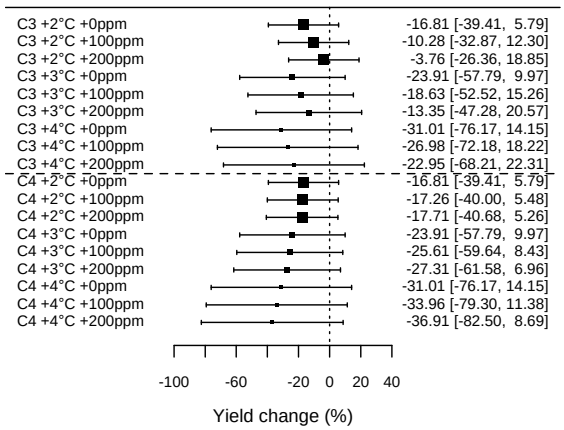


Afrique

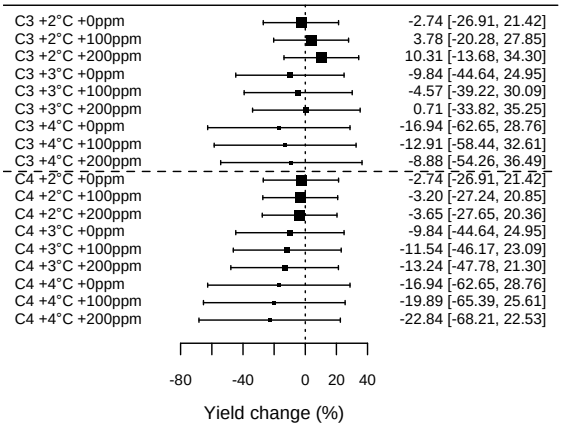
A. No rainfall decrease



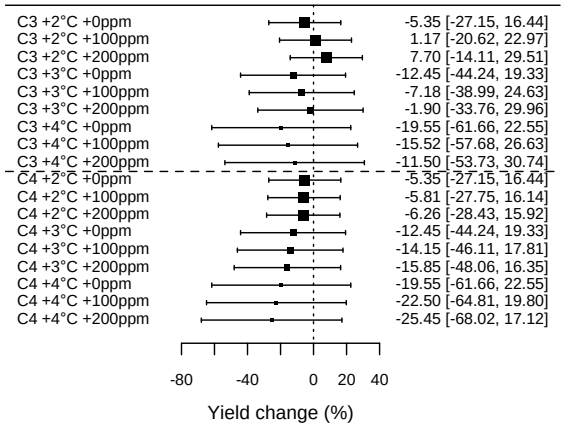
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

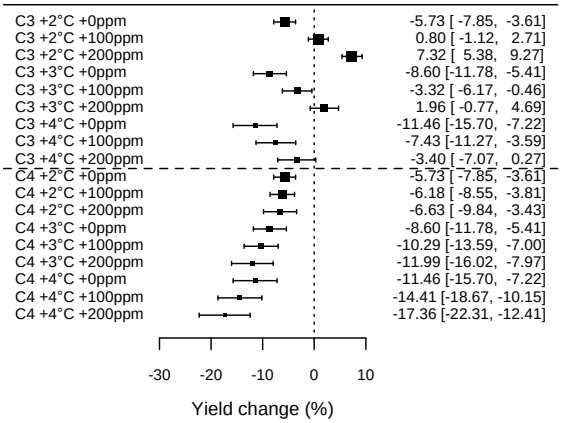


D. 10% rainfall decrease & adaptation

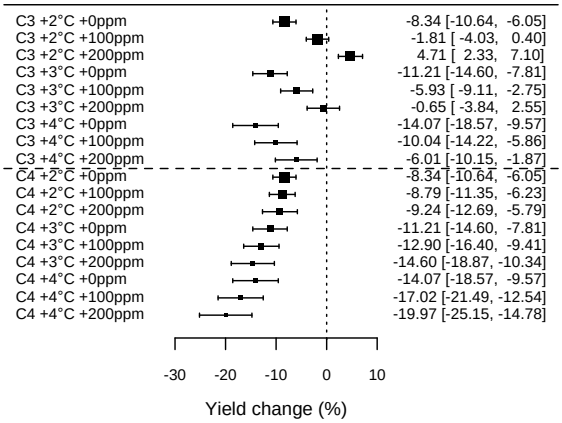


Asie

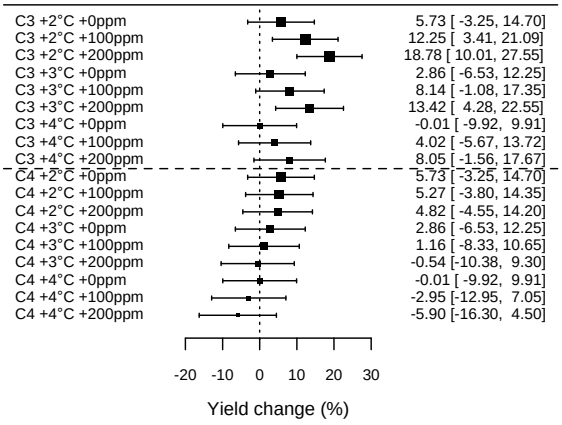
A. No rainfall decrease



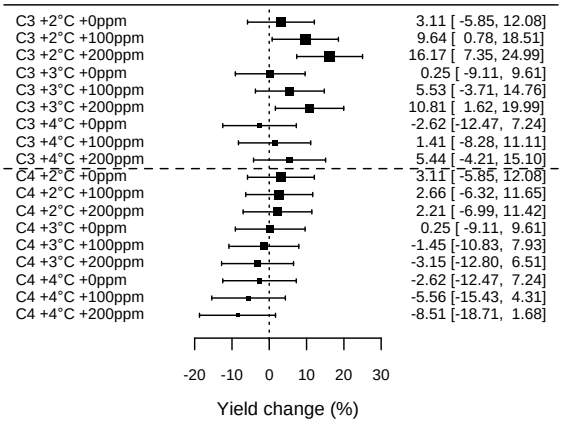
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

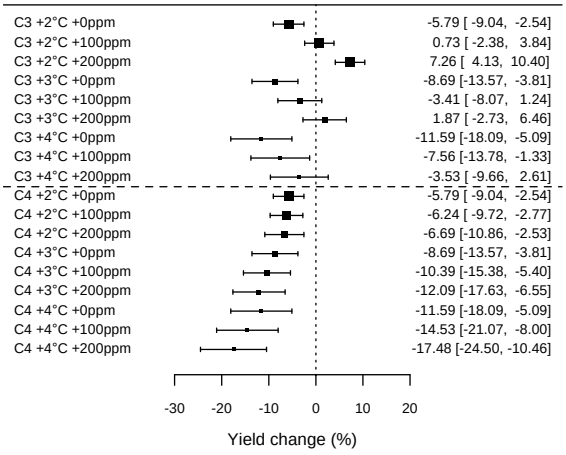


D. 10% rainfall decrease & adaptation

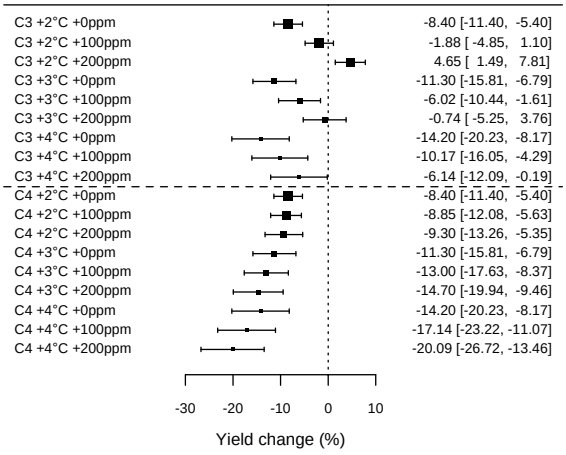


Océanie

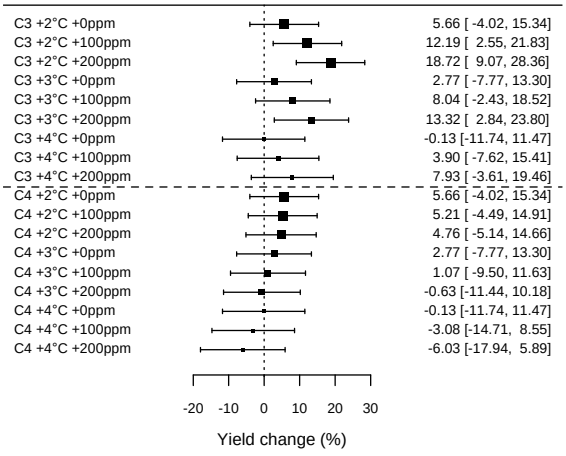
A. No rainfall decrease



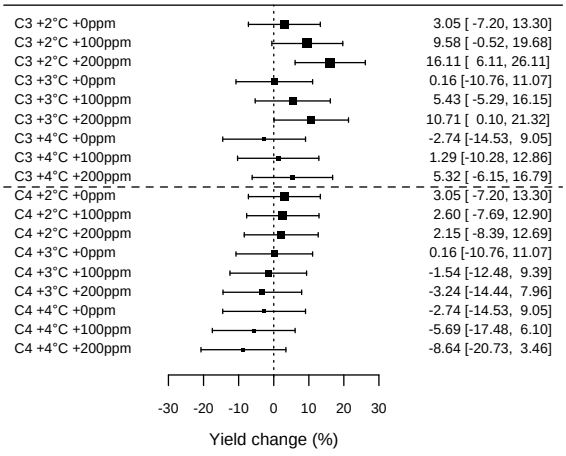
B. 10% rainfall decrease



C. No rainfall decrease & adaptation

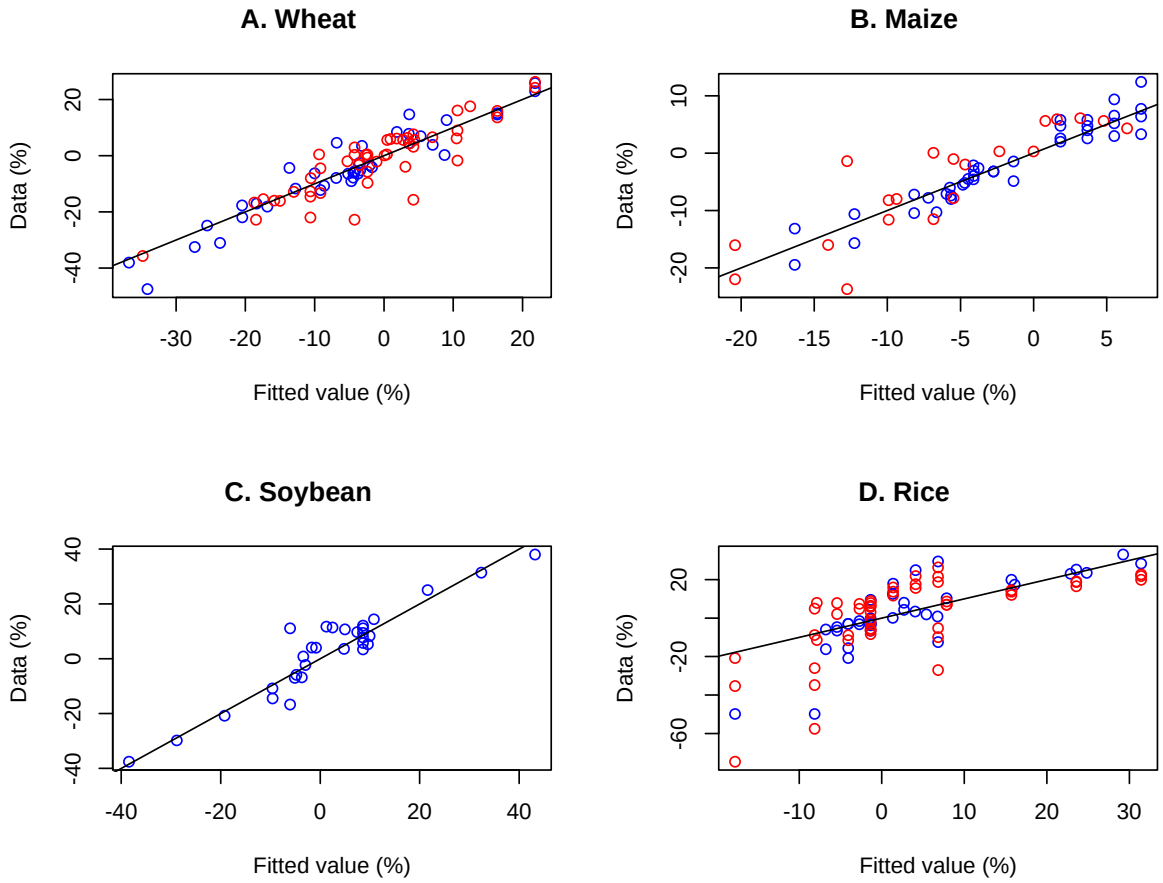


D. 10% rainfall decrease & adaptation



Annexe 3. Qualité d'ajustement des modèles statistiques pour le blé, le maïs, le soja et le riz.

Les données des ensembles modèles et des méta-analyses sont indiquées en bleu et en rouge, respectivement. Les données faisant état d'une perte de rendement < -20% pour le riz correspondent à une augmentation de température de +6°C. R2=0,85 pour le blé, R2=0,84 pour le maïs, R2=0,89 pour le soja, R2=0,5 pour le riz.



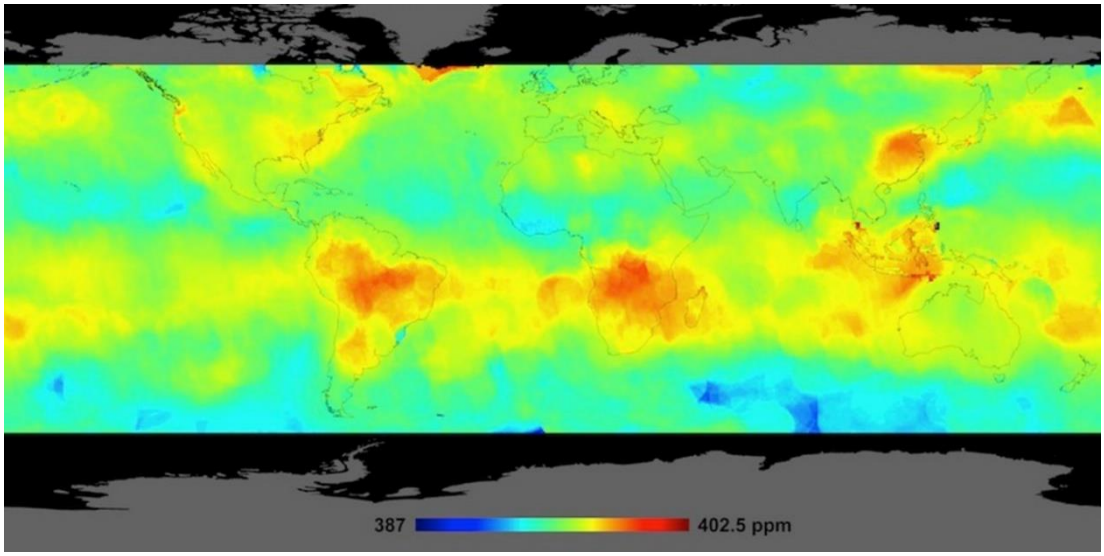
Chapitre 3. Effets écophysiologiques du CO_2 sur les cultures : focus sur les incertitudes associées à leur expression au champ à l'horizon 2050

Jean-Louis Durand

3.1. Les évolutions possibles de la teneur en CO2 d'ici 2050

L'augmentation de la teneur en CO_2 ([CO_2]) de l'atmosphère jouera un rôle central dans l'avenir de l'agriculture. D'une part, les climatologues la désignent comme la cause principale de l'augmentation des températures avec pour conséquence une modification importante du bilan hydrique (augmentation de l'évaporation), responsable dans certaines régions de forts impacts sur les plantes (IPCC, 2013). D'autre part, cette teneur détermine le niveau de photosynthèse maximum des cultures. Cette teneur qui était en 1900 de l'ordre de 300 ppm a évolué rapidement depuis le début du XXème siècle pour atteindre aujourd'hui environ 400 +/- 5 ppm selon les zones du globe (Figure 3-1), avec des variations saisonnières inférieures à 5 ppm.

Figure 3-1. Image composite réalisée à partir des données du NASA's Orbiting Carbon Observatory-2, des teneurs moyennes en CO_2 observées entre le 1er Oct.et le 11 novembre 2014



Source : NASA/JPL-Caltech

La poursuite de l'activité humaine selon la tendance actuelle, c'est-à-dire avec augmentation de la consommation d'énergie fossile (charbon, pétrole et gaz), pourrait aboutir à des teneurs comprises entre 440 et 540 ppm à l'horizon 2050 selon les scénarios du GIEC RCP 4.5 et 8.5, respectivement (voir Tableau 3-1 ci-après), Meinshausen *et al.*, 2011) ceci afin de répondre à la croissance démographique et aux besoins de développement

Les effets du CO_2 sur les plantes sont bien connus et de mieux en mieux quantifiés. Le nombre de résultats expérimentaux sur des cultures en situation de teneur en CO_2 élevée est aujourd'hui suffisamment important (plusieurs centaines sur une dizaine d'espèces végétales cultivées) pour en quantifier les impacts sur les rendements agricoles (Kimball, 2016). Ces impacts en fortes interactions avec les autres contraintes (notamment, l'eau et l'azote) sont toutefois plus ou moins bien pris en compte dans les modèles de cultures utilisés pour obtenir les projections de rendements dans des situations climatiques encore jamais rencontrées par l'agriculture.

Tableau 3-1. Concentration en CO_2 atmosphérique (ppm) selon les différents scénarios d'émissions de GES du GIEC

Table AII.4.1 | CO_2 abundance (ppm)

Year	Observed	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	A2	B1	IS92a	Min	RCP8.5[&]	Max
PI	278 ± 2	278	278	278	278	278	278	278			
2011[obs]	390.5 ± 0.3										
2000		368.9	368.9	368.9	368.9	368	368	368			
2005		378.8	378.8	378.8	378.8					378.8	
2010		389.3	389.1	389.1	389.3	388	387	388	366	394	413
2020		412.1	411.1	409.4	415.8	416	411	414	386	425	449
2030		430.8	435.0	428.9	448.8	448	434	442	412	461	496
2040		440.2	460.8	450.7	489.4	486	460	472	443	504	555
2050		442.7	486.5	477.7	540.5	527	485	504	482	559	627
2060		441.7	508.9	510.6	603.5	574	506	538	530	625	713
2070		437.5	524.3	549.8	677.1	628	522	575	588	703	810
2080		431.6	531.1	594.3	758.2	690	534	615	651	790	914
2090		426.0	533.7	635.6	844.8	762	542	662	722	885	1026
2100		420.9	538.4	669.7	935.9	846	544	713	794	985 ± 97	1142

Source : GIEC, annexe II du rapport AR5

3.2. Recherche documentaire sur l'effet du CO2 sur les rendements des principales cultures.

Une recherche bibliographique d'articles sur les titres comportant les combinaisons de vocables suivantes et désignant les objets sur lesquels nous cherchons l'impact de l'élévation de la teneur en CO_2 (CO2 ou "carbon dioxide") a été réalisée sur le Web of Science en croisant cette expression avec : yield ou product ou agricult, combinés avec les espèces ou cultures : crop ou cereal* ou maize ou corn ou wheat ou rice ou barley ou sorghum ou oat ou oats ou rye ou triticale ou "sugar plant*" ou sugarbeet ou "sugar beet" ou beet* ou sugarcane ou "sugar cane" ou oilcrop* ou oleaginous ou proteaginous ou "oilseed crop*" ou rape* ou soya* ou soybean* ou sunflower ou "protein crop*" ou pulse* ou pea* ou "faba bean*" ou lupin* ou alfalfa ou forage* ou grass ou fodder ou pasture* ou canola ou bean ou grass* ou "grain legume*".

Les titres comportant les vocables suivants ont été exclus : peat ou peatland* ou *alga* ou "CO2 emission*" ou "carbon dioxide emission*" ou "CO2 production" ou "carbon dioxide production" ou "CO2 exchange*" ou "carbon dioxide exchange*" ou "CO2 sequestration" ou "carbon dioxide sequestration" ou "CO2 efflux*" ou "carbon dioxide efflux*"

Le corpus a ensuite été trié sur les titres et résumés pour extraire les données écophysiologiques sur diverses cultures. Il a aussi été complété à l'aide d'articles rendant compte d'expérimentations récentes ou de synthèses bibliographiques. Dans la plupart des articles rapportant ces résultats, les trois variables les plus importantes du changement climatique – la température, l'eau et la teneur en CO_2 – sont très rarement manipulées en même temps ; encore moins « factoriellement » en prenant en compte plusieurs valeurs de ces variables et les interactions avec l'azote. Ces résultats sont donnés « toutes choses égales par ailleurs » ; il convient donc de prendre en compte des résultats de simulations numériques qui permettent justement d'explorer divers climats. Ce développement est détaillé dans le chapitre 2

3.3. Bases écophysiologiques de l'impact du CO_2 sur les rendements

3.3.1. Le CO_2 affecte la photosynthèse et la transpiration

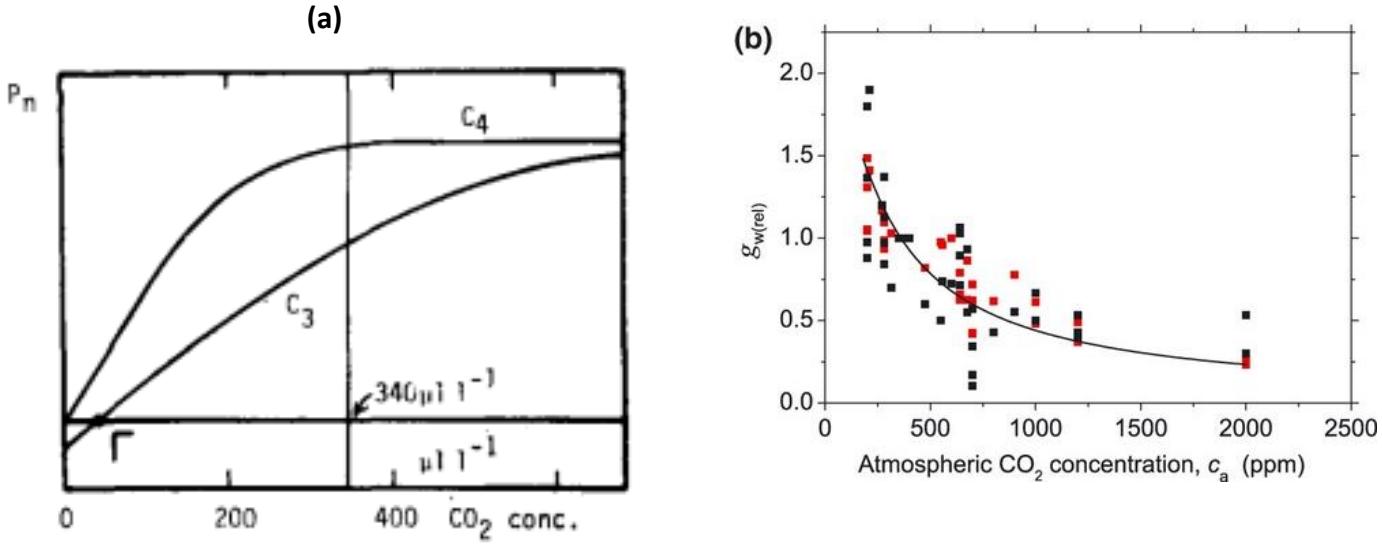
Le taux d'assimilation du CO_2 et la transpiration des végétaux *via la* conductance stomatique sont les deux variables qui répondent directement à la teneur en CO_2. De cette sensibilité résultent tous les impacts des variations de la teneur en CO_2 sur les rendements agricoles (Ainsworth et Rogers, 2007).

Taux d'assimilation du CO_2

Selon les produits végétaux (grain, huile, tige, racine…), entre 40 et 60 % de la masse sèche est constituée par le carbone. Et 100 % de ce carbone provient du CO_2 atmosphérique fixé par la photosynthèse, fixation essentiellement réalisée dans les feuilles. Le taux d'assimilation du CO_2 est alors défini comme la quantité de CO_2 fixée par unité de temps et par unité de surface de feuille. En conditions lumineuses, hydriques, thermiques et d'alimentation minérale optimales, ce taux d'assimilation dépend directement de la teneur en CO_2 (Figure 3-2a).

La réponse du taux de photosynthèse à la teneur en CO_2 a changé au cours de l'évolution des végétaux, en interaction avec cette teneur. Les plantes dites en C4 disposent d'un mécanisme d'approvisionnement en CO_2 des tissus où, dans les feuilles, se produit sa fixation sur les sucres : pour ces plantes, c'est la concentration en protéines foliaires qui limite la photosynthèse, pas la teneur en CO_2 dans la gamme des valeurs actuelles ou à venir (Fig 2a). Ces plantes incluent le maïs, le sorgho et la canne à sucre. Au contraire, toujours en conditions optimales, les plantes dites en C3 qui ne possèdent pas ces processus de concentration dans la feuille vont être limitées par la teneur en CO_2 atmosphérique (Figure 3-2a in Saugier, 1983 ; Ainsworth et al. 2007 ; Gao et al., 2015 par exemple pour les légumineuses). A 700 ppm, le taux de photosynthèse des plantes en C3 est approximativement 20% plus élevé qu'à 350 ppm. Les plantes cultivées en C3 incluent le blé, l'orge, le riz, les légumineuses (dont le soja), la betterave sucrière, les oléagineux (colza, tournesol) ainsi que les fruits et légumes.

Figure 3-2. (a) Comparaison des réponses de l'assimilation nette maximale de CO_2 en fonction de la teneur en CO_2 atmosphérique ($[CO_2]$) entre 0 et 700 ppm, en conditions optimales de lumière et d'alimentation minérale et hydrique, pour les plantes en C3 et en C4 ; d'après Saugier (1983) ; (b) réponse à la teneur en CO_2 de la conductance stomatique normée à sa valeur prise aux concentrations standard au moment de l'expérience. Cette réponse est identique pour les plantes en C3 et C4 ; d'après Francks et al. (2013).



Conductance stomatique

Par ailleurs, la productivité des plantes dépend très étroitement du niveau de satisfaction de leurs besoins en eau, qui résulte du bilan entre l'absorption de l'eau du sol et la transpiration. Si cette dernière était toujours égale à l'évapotranspiration potentielle c'est-à-dire la quantité d'eau maximale évaporable selon l'état de l'atmosphère et le rayonnement, les feuilles seraient vite fanées et hors d'état de fonctionner dès lors que le sol ne fournit plus les quantités requises. Mais la transpiration des plantes se fait à travers l'épiderme des feuilles qui est recouvert d'une cire imperméable et percé de stomates, pores à l'ouverture variable. Ces stomates régulent les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère et limitent la transpiration. Leur degré d'ouverture est mesuré par la conductance stomatique, qui est le rapport entre, au numérateur, la perte d'eau par unité de temps et de surface foliaire, et, au dénominateur, la différence de concentration en eau entre la feuille et l'atmosphère. Cette conductance est sensible aux variables de l'environnement dont la teneur en CO_2, l'eau, la lumière, ce qui permet à la plante d'optimiser ses pertes en eau et de maximiser les gains en carbone. La teneur en CO_2 modifie donc

directement la conductance stomatique (Figure 3-2b) avec une ampleur semblable à son action sur la photosynthèse, soit une réduction de la conductance d'environ 20 % en moyenne pour toutes les espèces pour un doublement de la teneur en CO_2 contemporaine (Ainsworth et Rogers, 2007). Les plantes en C3 et en C4 présentent la même sensibilité de la conductance stomatique à la teneur en CO_2.

Il ressort de ces éléments que la teneur en CO_2 tend à réduire la transpiration des feuilles, et à augmenter la photosynthèse, deux processus concourant chacun à l'augmentation de la surface de feuilles et finalement de la production de biomasse. Or, c'est la production de biomasse qui détermine au premier ordre le rendement, dans la mesure où l'indice de récolte, fraction de la biomasse effectivement récoltée, est relativement peu sensible à la teneur en CO_2 ou au déficit hydrique. Ces tendances auront donc des effets doublement positifs sur les rendements. Ils sont toutefois contrebalancés par les autres effets du changement climatique : une augmentation de la température qui très généralement tend à raccourcir le cycle de croissance d'une part, la sécheresse qui réduit fortement la croissance des feuilles et le taux d'assimilation du CO_2 d'autre part. Finalement, l'effet du CO_2 dépend donc de l'intensité des variations de ces deux autres variables.

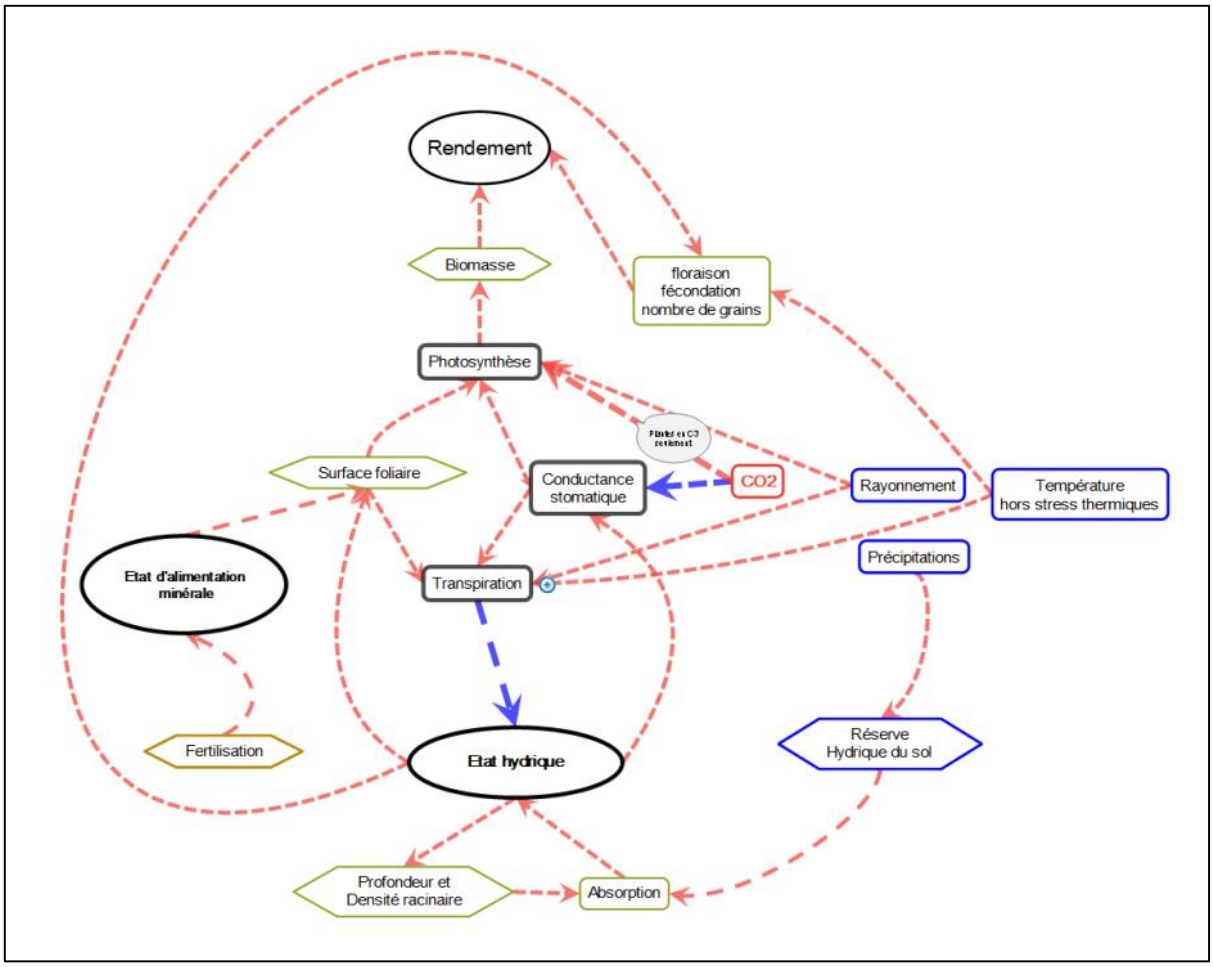
3.3.2. Conséquences de l'augmentation du taux de photosynthèse et de la diminution de la transpiration sur la production de biomasse et les rendements

Ces deux processus déterminent une cascade d'autres phénomènes qui interviennent dans l'élaboration des rendements (Figure 3-3). Ainsi, une modification de la transpiration altère l'état hydrique des feuilles et donc, leur vitesse d'expansion et la captation de la ressource lumineuse (Boyer, 1970). Elle joue également sur l'absorption de l'eau dans le sol et donc des éléments minéraux qui y sont dissous sous forme ionique et mobile (Gonzalez Dugo et al., 2010). La baisse de la transpiration tend à augmenter la température du feuillage ce qui est susceptible d'accélérer le déroulement du cycle cultural. Enfin, l'amélioration de l'état hydrique liée à la baisse de la transpiration tend à augmenter le taux de photosynthèse. Celle-ci, directement accrue par la teneur en CO_2, du moins pour les plantes en C3, augmente la quantité d'énergie dans la plante accumulée sous forme de sucres et, chez les légumineuses, permet ainsi une fixation symbiotique plus active. Les effets du [CO_2] sont ainsi en interaction avec les effets des niveaux des autres ressources du sol (en eau et en éléments minéraux), de l'éclairement et de la température de l'air (e.g., Houshmandfar *et al.*, 2016 ; Kumar *et al* ., 2017 a et b). Enfin, la répartition dans le temps de la consommation des ressources du sol et des différentes phases de développement de la culture peut changer sous l'effet de la teneur en CO_2.

Les conséquences de l'élévation de la teneur en CO_2 sont donc multiples et doivent être prises en compte sur la durée du cycle de culture en interaction avec les autres facteurs qui eux aussi jouent sur l'élaboration des rendements. A l'échelle du champ cultivé, ces conséquences diffèrent selon les espèces et le niveau d'intensification des cultures. Sauf cas très particulier, l'impact sur le rendement des accroissements de la teneur en CO_2 envisagés à l'horizon 2050 varie de presque nul, dans une situation de forte carence minérale des plantes, à nettement positif quand les conditions sont optimales. Et c'est d'ailleurs ainsi que Zhu et al. (2016) expliquent le « verdissement » global de la planète au cours des 40 dernières années, révélé par les séries de photos de satellites couvrant la surface du globe.

En régime hydrique non contraint (cultures d'hiver, cultures irriguées en été ou dans des zones suffisamment arrosées, etc.), les plantes en C3 profitent pleinement de l'élévation de la teneur en CO_2 en valorisant son impact positif sur le taux de photosynthèse. Toutefois, l'accroissement du rendement exige une augmentation concomitante de la fourniture en azote (Weigel et Manderscheid, 2012 ; Manderscheid et al. 2010 ; Rajsnerova et Klem 2013). Si l'apport d'azote n'est pas ajusté aux besoins (via la fertilisation azotée), alors l'impact positif sur les rendements, lié à l'accroissement de la teneur en CO_2, est réduit (Lakshmi et al 2017). Ceci est vrai pour les plantes en C3 de façon générale. Mais s'il s'agit de plantes légumineuses qui utilisent une partie des sucres photosynthétisés pour alimenter leurs symbiotes fixateurs d'azote, l'accroissement de la teneur en CO_2 est nettement mieux valorisé (Matsunami et al., 2009 ; Oikawa et al., 2010; Li et al., 2017). Pour toutes les autres espèces en C3, une limitation de la croissance apparaît et la teneur en protéines diminue. Ce raisonnement s'applique aux autres ressources du sol comme le phosphore et le potassium.

Figure 3-3. Action du CO_2 atmosphérique et des variables climatiques sur les principaux processus physiologiques sous-jacents à la production végétale. Relations positives (flèches rouges) et négatives (flèches bleues).



En régime de contrainte hydrique (e.g. l'été en climat tempéré), les réponses « hydriques » d'économie d'eau liées à la fermeture de stomates sont favorables aux plantes en C3 qui ont un cycle estival, comme par exemple le tournesol et les plantes fourragères, notamment les légumineuses (Ainsworth et al., 2002) ; pour ces dernières, la fixation d'azote qui est très sensible à la contrainte hydrique est améliorée par cette économie d'eau dans la phase végétative de la production.

Paradoxalement, c'est d'ailleurs en situation de contraintes hydriques plus ou moins importantes que la production des plantes en C4 répond à l'augmentation de la teneur en CO_2. Dans ce cas, la réduction de leur transpiration (Ghanoun et al., 2000 ; Meng et al., 2014), retarde et réduit l'intensité du déficit hydrique ce qui favorise la croissance initiale de la végétation. Ceci provoque une accumulation de matière sèche plus importante. Ensuite, la sécheresse est moins intense durant la formation des grains (Figure 3-3). Enfin, la durée de vie du feuillage est prolongée ce qui permet d'étendre la période d'assimilation photosynthétique pendant le remplissage de ces grains.

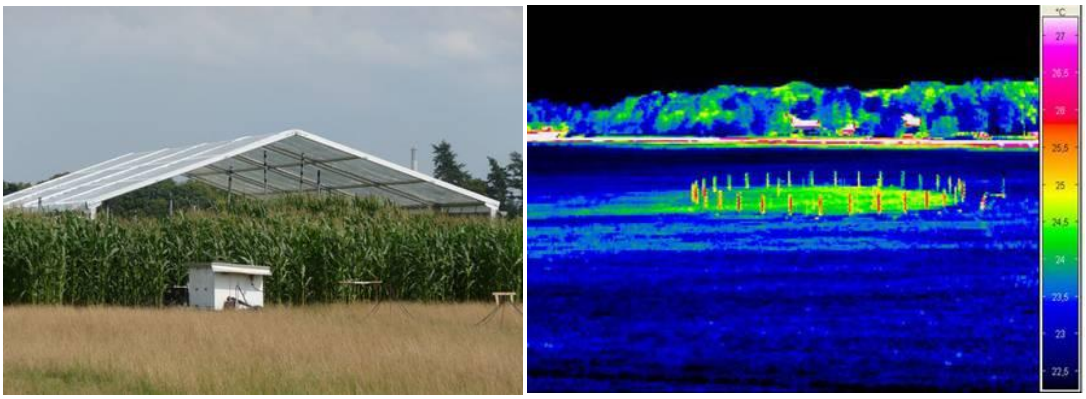
3.4. Évaluation de l'impact de la teneur en CO2 sur les rendements sur la base de dispositifs expérimentaux

3.4.1. Dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier les conséquences de l'augmentation de la teneur en CO2 sur les rendements

Les conséquences sur les rendements ont été étudiées dans des dispositifs expérimentaux où la teneur en CO_2 a été modifiée par rapport à un témoin, sous diverses conditions de culture et pour différentes espèces cultivées.

Certaines expériences ont été réalisées sur des plantes isolées ou de petites surfaces de culture en chambres climatisées. Pour mieux prendre en compte les conditions réelles de production, des chambres généralement de l'ordre du m^3 fermées ou le plus souvent sans toit (désignées alors par l'acronyme anglais OTC pour *Open Top Chambers)* ont été installées sur des parcelles cultivées durant tout le cycle cultural pour élever localement la teneur en CO_2. Il est également possible d'injecter directement du CO_2 à l'air libre (dispositifs FACE pour *Free Air Carbon Enrichment, cf.* Figure 3-4) sur la végétation, ce qui permet d'éliminer les artefacts liés aux parois des OTC (modification du vent, de la température et de l'humidité en particulier).

Figure 3-4. A gauche, dispositif de l'Institut von Thünen de Braunschweig (Allemagne) montrant l'abri à pluie et les tuyaux permettant d'injecter le CO_2 dans l'atmosphère au-dessus de la végétation, ici un champ de maïs. A droite, cartographie infra rouge du couvert végétal montrant dans la zone circulaire vert à jaune clair au milieu du reste de la parcelle bleue, une augmentation des températures du feuillage balayé d'un flux d'air enrichi en CO_2 de l'ordre de 1 °C ainsi qu'indiqué dans l'échelle à droite de l'image



© Thünen-Institut/BD

Ce sont les dispositifs FACE qui ont jusqu'ici été considérés comme les plus proches de la réalité. Les dispositifs OTC, les plus utilisés dans le monde, mettent en évidence les augmentations de rendement les plus fortes, de près de 50 % par rapport au témoin placé dans une enceinte non enrichie. On a longtemps pensé que cet écart était un artefact lié aux meilleures conditions de croissance des zones protégées en chambre de culture ou dans les OTC (Ainsworth et al., 2008). Récemment, la possibilité d'une sous-estimation par les dispositifs FACE de l'impact réel de la teneur en CO_2 sur les rendements a toutefois été soulevée. En effet, dans ces dispositifs, la teneur en CO_2 subie par les plantes varie beaucoup et très rapidement (typiquement de +/- 50 ppm par minute). Or, le taux de photosynthèse des plantes dans un régime de teneur en CO_2 stable est d'environ 50 % supérieur à celui de la même plante exposée à la très forte variabilité temporelle de la teneur en CO_2 inhérente à la technologie des dispositifs FACE actuels (Bunce, 2013).

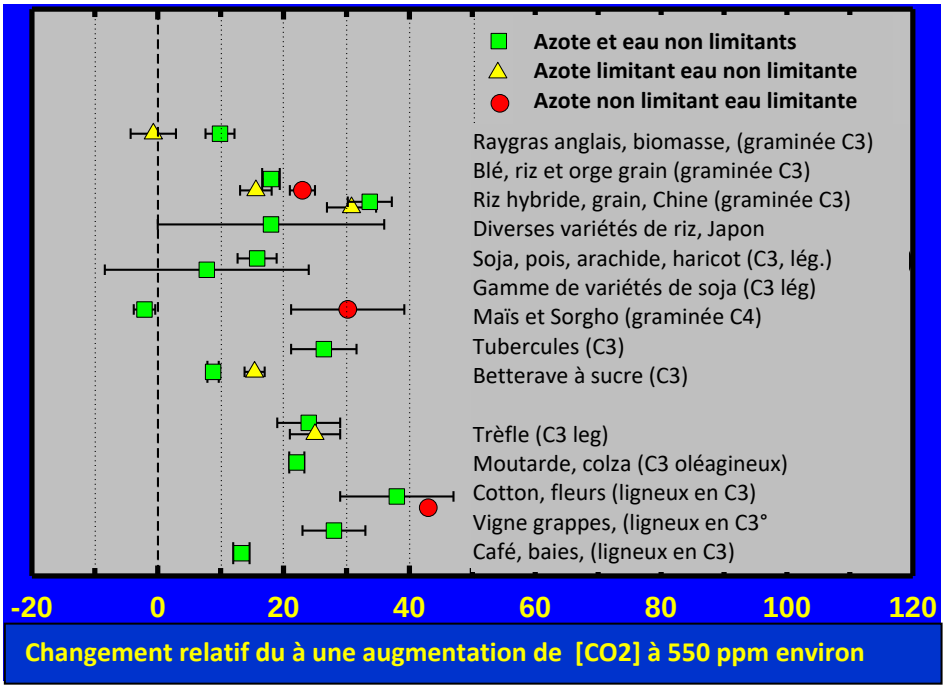
3.4.2. Résultats

Les conclusions de ces expérimentations doivent s'interpréter en fonction des mécanismes décrits dans les sections 3.2 et 3.3. Elles ont fait l'objet d'une récente synthèse par Kimball (2016) qui est résumée par la figure 3-5.

Les impacts sur les rendements obtenus sous une teneur en CO_2 de 550 ppm relativement à une atmosphère à 380 ppm, approximativement, varient de valeurs faiblement négatives ou proches de 0 pour une culture en C4 irriguée à +110 % pour le manioc (mais avec une seule expérimentation répertoriée).

Figure 3-5. Effets sur les rendements (en %) mesurés dans des dispositifs FACE d'une élévation de la teneur en CO_2 de 350 à 550 ppm, approximativement, pour différentes cultures, sous différentes conditions hydriques et azotées.

Le nombre de données répertoriées est de 18 pour le ray-grass, 151 pour les céréales en C3, 29 pour les protéagineux, 12 pour les céréales en C4, 6 pour la pomme de terre, 2 pour la betterave sucrière, 1 pour le manioc, 10 pour le trèfle et 2 pour le colza. D'après Kimball (2016).



Dans le cas des plantes en C3 en conditions optimales, les enseignements peuvent être ainsi résumés :

- Augmentation moyenne de rendement comprise entre **20 et 30 % pour le blé** (Wang et al 2013, O'Leary et al 2015, Kimball 2016, Schmid et al 2016), l'**orge** (Uddling et al 2008, Högy et al 2009, Fujimura et al 2012, Dahal et al 2014), et le **riz** (Cheng et al 2009, Fan et al 2010, Roy et al 2012, Figueiredo et al 2015, Hasegawa 2017, Chaturvedi et al 2017, Kumar et al 2017 a et b).

- Effet positif d'environ **20 % pour les protéagineux** (Vanaja et al 2007, 2011, San Saez et al 2012, Bunce 2014, 2015, Mishra et Agrawal 2014, Gao et al 2015, Kumagai et al 2015, Rao et al 2015, Kimball 2016, Thivierge et al 2016, Xu et al 2016, Lenka et al 2017), ainsi que pour le colza (Moghadam et al 2011, Kimball 2016).

- Accroissement d'environ 30 % pour le **tournesol,** sur la base de deux expériences OTC (Pal et al 2014, Lakshmi et al 2017).

- Accroissement moindre, de l'ordre de 10%, pour les **prairies** et les **plantes fourragères non légumineuses** sur la base de diverses expérimentations généralement conduites dans des conditions où la fertilisation azotée ne satisfait pas tous les besoins d'une productivité maximale (Weigel et Manderscheid 2012, Li et al 2014, Santos et al 2014, Kimball 2016, Thivierge et al 2016). En conditions minérales et hydriques non limitantes, l'effet positif du CO_2 rejoindrait celui mesuré sur les céréales en C3.

Le cas des plantes cultivées en conditions hydriques et minérales limitantes

Dans les conditions d'alimentation en eau limitante, l'impact de l'augmentation de la teneur en CO_2 sur les rendements dû à l'accroissement de la photosynthèse est plus ou moins amplifié par l'amélioration de l'état hydrique de la culture découlant de la limitation de la transpiration (Fig 3). C'est aussi le cas des graminées en C4 cultivées en période chaude comme le sorgho ou le maïs (Meng et al 2014, Manderscheid et al 2015, Li et al 2018), Le gain de rendement provient d'un accroissement de la photosynthèse lié à la prolongation de la vie des feuilles mais aussi du nombre de grains en raison d'une esquive de la sécheresse au cours des périodes de floraison et de formation des graines (Manderscheid et al., 2014). Ces impacts positifs en conditions déficitaires en eau sont toutefois observés pour des rendements qui restent globalement plus faibles que ceux des témoins irrigués. Dans les régions où la sécheresse s'accusera, l'augmentation de la teneur en CO_2 ne pourra pas compenser le manque d'eau (Long et al., 2006).

Dans les situations où la contrainte azotée est forte, l'effet positif de l'accroissement de la teneur en CO_2 sur les rendements est inchangé ou se réduit (Figure 5), ce qui s'explique notamment par le fait que l'azote peut manquer à la synthèse des enzymes photosynthétiques nécessaires à la valorisation du CO_2 supplémentaire et à la croissance foliaire (Wang et al 2013).

Selon certaines études (Högy et al. 2009, 2010, Pleijel et Högy, 2015), une baisse des teneurs en protéines et autres éléments nutritifs a été observée. Une partie de cette baisse peut être liée à l'accroissement des rendements qui dilue les éléments autres que le carbone dans la biomasse (Asseng *et al.* 2018). S'y ajoutent des processus biochimiques et/ou morphologiques moins bien connus à l'heure actuelle (Broberg et al 2017). Sans compensation par la fertilisation, on pourrait donc s'attendre à une dégradation de la qualité des grains avec l'augmentation de la teneur en CO_2 (Pal et al., 2014).

La plupart des études synthétisées par Kimball (2016) et dans le corpus bibliographique constitué ici montrent une forte variabilité génétique de la réponse des cultures à la teneur en CO_2. Les pistes ainsi ouvertes chez le riz sont remarquables, avec une réponse du rendement allant de 0 à + 35 % selon les variétés (Shimono et al 2008 ; Shimono et Okada 2013, Zhang et al 2015). On trouve aussi une forte variabilité génétique chez le blé (Matsunami et al 2009, Thilakarathne et al 2013, Mishra et al 2013,). De même chez les protéagineux, les impacts du CO_2 sur les rendements varient selon le génotype, de près de 0 à 25 % approximativement (Mishra et Agrawal 2014, Bunce 2015, Jin et al 2017, Li et al 2017).

Irrigation, fertilisation azotée et génétique conditionnent donc fortement les effets positifs de la teneur en CO_2 sur les rendements et la composition des graines.

3.5. Évaluation de la capacité des modèles numériques à simuler l'impact de la teneur en CO_2 sur les rendements.

3.5.1. Les différents modèles utilisés

Utiliser les variations historiques de la teneur en CO_2 et des séries de rendements régionaux à diverses échelles pour estimer des projections d'impact de cette teneur sur les rendements futurs ne s'est pas avéré conclusif parce que le signal historique récent du CO_2 est trop faible par rapport aux variations de rendement interannuelles, ou liées à d'autres évolutions correspondant à des progrès technologiques, à des changements de pratiques, etc. (Lobell et Field, 2008 ; Lobell et al., 2011). Il en résulte que les modèles utilisés pour simuler l'impact de la teneur en CO_2 sont des modèles mécanistes, basés sur l'intégration des connaissances écophysiologiques des plantes. Ils permettent justement d'extrapoler les réponses des cultures pour des climats encore jamais rencontrés par les pratiques agricoles contemporaines.

Pour autant, il faut encore que ces modèles aient été validés dans de telles configurations climatiques artificiellement créées comme on l'a vu dans les chapitres précédents. Plusieurs approches ont été codifiées dans les dizaines de modèles de cultures utilisés à ce jour dans le monde.

Une première approche a consisté à utiliser les sorties climatologiques donnant les valeurs des variables climatiques pour une grille de 350 km de résolution avec des modèles globaux, qui donnent certes une vision mondiale des impacts, avec une première visualisation des variations régionales de l'effet fertilisant du CO_2, mais sans rapport avec les pratiques locales d'irrigation ou de fertilisation. Or ces pratiques (i.e. irriguée ou pluviale) varient parfois plus fortement au sein d'un pays qu'entre pays (Müller et Robertson 2014, Deryng et al., 2016).

D'autres modèles de culture visent à représenter plus finement les interactions entre conditions de production et niveaux de ressources sur les rendements. Ces modèles basés sur l'écophysiologie diffèrent entre eux selon leur approche de la production primaire de biomasse et le nombre de processus pris en compte. Selon Vanuytrecht et Thorburn (2017), il est possible de distinguer quatre types de modèles selon la façon dont la production primaire est intégrée. Les effets du CO_2 sont implémentés par une modulation des efficiences de rayonnement absorbé par les feuilles ou de transpiration (tonnes de produit rapportés à la quantité d'eau consommée par la culture), ou par les mécanismes prenant en compte les concentrations en CO_2 près des sites de fixation tels que les cinétiques enzymatiques de la RuBisCO (Galmes et al 2014). Ces différences d'approches n'ont cependant pas révélé de différence essentielle quant à la qualité de leurs prédictions (Vanuytrecht et Thorburn, 2017).

3.5.2. Les modèles simulent des réponses des rendements à l'élévation de la teneur en CO2 globalement conformes aux expérimentations.

Il existe de nombreuses comparaisons de simulations avec les données expérimentales du type de celles décrites dans la section précédente. Se pose la question de la probable surestimation des valeurs de simulation quand les paramètres des modèles ont été renseignés avec des OTC (Long et al., 2006), et d'une possible sous-estimation quand ils l'ont été avec des FACE. Tubiello et al. (2007) ont discuté ce point et montré que les modèles sont plutôt non biaisés en moyenne. De nombreux modèles ont été testés en comparaison avec des données expérimentales FACE et leurs simulations de l'effet de l'élévation du CO_2, parfois en interaction avec l'eau, la fourniture d'azote, l'ozone, et la température ont été globalement validés pour le blé (Asseng et al 2018, O'Leary et al 2015), le riz (Hasegawa et al 2017), le maïs (Durand et al., 2018), la pomme de terre (Wolf et Van Oijen 2003, Raymundo et al 2018), les prairies (Li et al 2014). Cependant, l'impact du CO_2 sur certaines étapes de l'élaboration du rendement demande plus de recherches (Yin 2013). Par exemple, une étude récente sur le maïs montre que, si les modèles de culture en C4 reproduisent bien, en général, une absence d'effet sur les rendements de la teneur en CO_2 en conditions hydriques non limitantes, ils peuvent sous-estimer cet effet en cas de déficit hydrique, ceci du fait d'une trop forte imprécision temporelle du bilan hydrique pendant le cycle cultural (Durand et al., 2018).

On déplore par ailleurs une quasi absence de modèles ou de données pour les fruits et légumes (Alonso et al 2012 ; Vanuytrecht et Thorburn, 2017), ceci bien que les mécanismes sous-jacents de l'effet de la teneur en CO_2 sur les rendements soient les mêmes.

De premières simulations de l'impact de l'élévation de la teneur en CO_2 sur la qualité nutritionnelle commencent à paraître (Asseng et al 2018).

Notons enfin qu'une des utilisations de ces modèles est l'exploration de possibles idéotypes de variétés mieux adaptées à une teneur en CO_2 nettement plus élevée (Yoshida et al 2011).

La classification des modèles en fonction de leur réponse a été publiée pour un certain nombre de cultures (Riz, Maïs). Pour autant, il n'est pas possible de recommander avec certitude le recours à un modèle plutôt qu'à un autre. Il est utile de croiser plusieurs approches et utiliser plusieurs modèles mécanistes sur le même jeu de données d'entrées climatiques, pour capter un maximum de situations, notamment lorsqu'on souhaite prendre en compte la teneur en CO_2 dans des zones où les données d'entrée sur les sols ou sur les pratiques sont lacunaires. C'est ainsi que, à l'image de ce qui s'est développé dans la communauté des climatologues, l'usage d'un ensemble de modèles s'avère encore la voie la plus sûre pour simuler des projections d'impact de changement climatique sur les rendements, y compris en prenant en compte l'augmentation de la teneur en CO_2 et évaluer les incertitudes de ces projections.

3.6. Conclusion

L'état des connaissances actuelles permet d'attester de l'effet positif de la concentration atmosphérique en CO_2 sur les rendements des cultures. La littérature scientifique met en évidence une forte variabilité de cet effet selon les conditions de culture. Cette variabilité a jusqu'ici souvent été représentée, par de nombreux auteurs, par des simulations avec et sans variation de teneur en CO_2. Étant donnés les mécanismes physiologiques à l'œuvre à l'échelle de la plante, et dans certaines conditions de disponibilité en eau et en éléments nutritifs, l'augmentation de la teneur en CO_2 peut compenser partiellement les pertes de rendements induites par la variation d'autres facteurs. Les travaux plus récents intègrent désormais comme telle la variabilité des réponses à la teneur en CO_2 au lieu de suggérer que ce facteur pourrait ne pas avoir d'impact. Le premier scénario de l'étude AE2050 repose sur l'hypothèse d'un prolongement du régime actuel d'émission de GES. Les rendements pourraient en être affectés comme ils l'ont déjà été jusqu'à présent et d'une manière telle que les prolongements tendanciels pourraient permettre de l'estimer. Mais certains modèles climatiques plus sensibles à la teneur en CO_2 simulent de plus fortes hausses de températures, et donc une dégradation supplémentaire du bilan hydrique. Pour autant, les équations établies dans le chapitre 2, prenant en compte ces variations de CO_2, de pluviométrie et de température sont capables de simuler l'impact de ces évolutions plus marquées et de donner des tendances pour le scénario climatique aggravé.

Références citées dans le Chapitre 3

Ainsworth, E. A., Davey, P. A., Bernacchi, C. J., Dermody, O. C., Heaton, E. A., Moore, D. J.,Mogan, P.B., Naidu, S.L., Ra, Y-S.,Y., Zhu, X., Curtis, P. S. (2002). A meta-analysis of elevated [CO2] effects on soybean (Glycine max) physiology, growth and yield. Global Change Biology, 8(8), 695-709.

Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO2]: mechanisms and environmental interactions. Plant, cell & environment, 30(3), 258-270.

Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., Ort, D. R., & Long, S. P. (2008). FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO2] impacts on crop yield and food supply. New Phytologist, 179(1), 5-9.

Alonso, F. J., Lorenzo, P., Medrano, E. and Sanchez-Guerrero, M. C. (2012). Greenhouse Sweet Pepper Productive Response to Carbon Dioxide Enrichment and Crop Pruning. In *Xxviii International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People*, vol. 927 eds. N. Castilla O. VanKooten S. Sase J. F. Meneses W. H. Schnitzler and E. VanOs), pp. 345-351. Leuven 1: Int Soc Horticultural Science.

Asseng S, Martre P, Maiorano A, Rötter RP, O'Leary GJ, Fitzgerald GJ, Girousse C, Motzo R, Giunta F, Babar MA, Reynolds MP, Kheir AMS, Thorburn PJ, Waha K, Ruane AC, Aggarwal PK, Ahmed M, Balkovič J, Basso B, Biernath C, Bindi M, Cammarano D, Challinor AJ, De Sanctis G, Dumont B, Eyshi Rezaei E, Fereres E, Garcia-Vila M, Gayler S, Gao Y, Horan H, Hoogenboom G, Izaurralde RC, Jabloun M, Jones CD, Kassie BT, Kersebaum KC, Klein C, Koehler AK, Liu B, Minoli S, Montesino San Martin M, Müller C, Naresh Kumar S, Nendel C, Olesen JE, Palosuo T, Porter JR, Priesack E, Ripoche D, Semenov MA, Stöckle C, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Van der Velde M, Wallach D, Wang E, Webber H, Wolf J, Xiao L, Zhang Z, Zhao Z, Zhu Y, Ewert F (2018) Climate change impact and adaptation for wheat protein. Global Change Biology:1-19.

Bannayan, M., Kobayashi, K., Kim, H. Y., Lieffering, M., Okada, M. and Miura, S. (2008). Modeling the interactive effects of atmospheric CO2 and N on rice growth and yield. Field Crops Research 107, 276-276.

Boyer, J. (1970). Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. Plant physiology, 46(2), 233-235.

Broberg, M. C., Högy, P., & Pleijel, H. (2017). CO2-induced changes in wheat grain composition: meta-analysis and response functions. Agronomy, 7(2), 32.

Bunce, J. A. (2013). Effects of pulses of elevated carbon dioxide concentration on stomatal conductance and photosynthesis in wheat and rice. Physiologia plantarum 149, 214-221.

Bunce, J. A. (2014). CO2 Enrichment at Night Affects the Growth and Yield of Common Beans. Crop Science 54, 1744-1747.

Bunce, J. A. (2015). Elevated Carbon Dioxide Effects on Reproductive Phenology and Seed Yield among Soybean Cultivars. Crop *Science* 55, 339-343.

Chaturvedi, A. K., Bahuguna, R. N., Pal, M., Shah, D., Maurya, S. and Jagadish, K. S. V. (2017). Elevated CO2 and heat stress interactions affect grain yield, quality and mineral nutrient composition in rice under field conditions. *Field Crops Research* 206, 149-157.

Cheng, W. G., Sakai, H., Yagi, K. and Hasegawa, T. (2009). Interactions of elevated CO2 and night temperature on rice growth and yield. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 51-58.

Dahal, K., Knowles, V. L., Plaxton, W. C. and Huner, N. P. A. (2014). Enhancement of photosynthetic performance, water use efficiency and grain yield during long-term growth under elevated CO2 in wheat and rye is growth temperature and cultivar dependent. *Environmental and Experimental Botany* 106, 207-220.

Deryng D, Elliott J, Folberth C, Müller C, Pugh TAM, Boote KJ, Conway D, Ruane AC, Gerten D, Jones JW, Khabarov N, Olin S, Schaphoff S, Schmid E, Yang H, Rosenzweig C (2016) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO2 concentrations on crop water productivity. Nature Climate Change:8 pp.

Durand JL, Delusca K, Boote K, Lizaso J, Manderscheid R, Weigel HJ, Ruane AC, Rosenzweig C, Jones J, Ahuja L, Anapalli S, Basso B, Baron C, Bertuzzi P, Biernath C, Deryng D, Ewert F, Gaiser T, Gayler S, Heinlein F, Kersebaum KC, Kim SH, Muller C, Nendel C, Olioso A, Priesack E, Villegas JR, Ripoche D, Rotter RP, Seidel EI, Srivastava A, Tao F, Timlin D, Twine T, Wang E, Webber H, Zhao Z (2018) How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO2 concentration levels with limited water supply on water use and yield? European Journal of Agronomy 100, 65-75.

Fan, G. Z., Cai, Q. S., Li, X. C., Xie, H. and Zhu, J. G. (2010). Yield components and its conformation responded to elevated atmospheric CO2 in three rice (Oryza sativa L.) generations. *African Journal of Biotechnology* 9, 2118-2124.

Figueiredo, N., Carranca, C., Trindade, H., Pereira, J., Goufo, P., Coutinho, J., Marques, P., Maricato, R. and de Varennes, A. (2015). Elevated carbon dioxide and temperature effects on rice yield, leaf greenness, and phenological stages duration. *Paddy and Water Environment* 13, 313-324.

Franks, P. J., Adams, M. A., Amthor, J. S., Barbour, M. M., Berry, J. A., Ellsworth, D. S., Farquhar GD, Ghannoum O., Lloyd, J., Mc Dowel N, Norby RJ, Tissue DT, Von Caemmerer S. (2013). Sensitivity of plants to changing atmospheric CO2 concentration: from the geological past to the next century. New Phytologist, 197(4), 1077-1094.

Fu, T., Ko, J., Wall, G. W., Pinter, P. J., Kimball, B. A., Ottman, M. J. and Kim, H. Y. (2016). Simulation of climate change impacts on grain sorghum production grown under free air CO2 enrichment. *International Agrophysics* 30, 311-322.

Fujimura, S., Shi, P. L., Iwama, K., Zhang, X. Z., Gopal, J. and Jitsuyama, Y. (2012). Effects of CO2 Increase on Wheat Growth and Yield under Different Atmospheric Pressures and Their Interaction with Temperature. *Plant Production Science* 15, 118-124.

Galmes, J., Kapralov, M. V., Andralojc, P. J., Conesa, M. À., Keys, A. J., Parry, M. A., & Flexas, J. (2014). Expanding knowledge of the R ubisco kinetics variability in plant species: environmental and evolutionary trends. Plant, Cell & Environment, 37(9), 1989-2001.

Gao, J., Han, X., Seneweera, S., Li, P., Zong, Y. Z., Dong, Q., Lin, E. D. and Hao, X. Y. (2015). Leaf photosynthesis and yield components of mung bean under fully open-air elevated CO2. Journal of Integrative Agriculture 14, 977-983.

Ghannoum, O., Caemmerer, S. V., Ziska, L. H., & Conroy, J. P. (2000). The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO2 partial pressure: a reassessment. Plant, Cell & Environment, 23(9), 931-942.

Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., & Gastal, F. (2010). Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. Agronomy for sustainable development, 30, 529-544.

Hasegawa, T., Li, T., Yin, X. Y., Zhu, Y., Boote, K., Baker, J., Bregaglio, S., Buis, S., Confalonieri, R., Fugice, J. et al. (2017). Causes of variation among rice models in yield response to CO2 examined with Free-Air CO2 Enrichment and growth chamber experiments. *Scientific Reports* 7, 13.

Högy, P., Keck, M., Niehaus, K., Franzaring, J. and Fangmeier, A. (2010). Effects of atmospheric CO2 enrichment on biomass, yield and low molecular weight metabolites in wheat grain. *Journal of Cereal Science* 52, 215-220.

Högy, P., Wieser, H., Kohler, P., Schwadorf, K., Breuer, J., Franzaring, J., Muntifering, R. and Fangmeier, A. (2009). Effects of elevated CO2 on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO2 enrichment experiment. *Plant Biology* 11, 60-69.

Houshmandfar, A., Fitzgerald, G. J., Macabuhay, A. A., Armstrong, R., Tausz-Posch, S., Low, M. and Tausz, M. (2016). Trade-offs between water-use related traits, yield components and mineral nutrition of wheat under Free-Air CO2 Enrichment (FACE). *European Journal of Agronomy* 76, 66-74.

Jin, J., Li, Y. S., Liu, X. B., Wang, G. H., Tang, C. X., Yu, Z. H., Wang, X. J. and Herbert, S. J. (2017). Elevated CO2 alters distribution of nodal leaf area and enhances nitrogen uptake contributing to yield increase of soybean cultivars grown in Mollisols. *Plos One* 12, 16.

Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO2 and interactions with H2O, N, and temperature. Current opinion in plant biology, 31, 36-43.

Kumagai, E., Aoki, N., Masuya, Y. and Shimono, H. (2015). Phenotypic Plasticity Conditions the Response of Soybean Seed Yield to Elevated Atmospheric CO2 Concentration. *Plant Physiology* 169, 2021-2029.

Kumar, A., Nayak, A. K., Sah, R. P., Sanghamitra, P. and Das, B. S. (2017a). Effects of elevated CO2 concentration on water productivity and antioxidant enzyme activities of rice (Oryza sativa L.) under water deficit stress. *Field Crops Research* 212, 61-72.

Kumar, U., Quick, W. P., Barrios, M., Cruz, P. C. S. and Dingkuhn, M. (2017b). Atmospheric CO2 concentration effects on rice water use and biomass production. *Plos One* 12, 17.

Lakshmi, N. J., Vanaja, M., Yadav, S. K., Maheswari, M., Archana, G., Patil, A. and Srinivasa, C. H. (2017). Effect of CO2 on growth, seed yield and nitrogen uptake in sunflower. *Journal of Agrometeorology* 19, 195-199.

Lenka, N. K., Lenka, S., Thakur, J. K., Elanchezhian, R., Aher, S. B., Simaiya, V., Yashona, D. S., Biswas, A. K., Agrawal, P. K. and Patra, A. K. (2017). Interactive effect of elevated carbon dioxide and elevated temperature on growth and yield of soybean. *Current Science* 113, 2305-2310.

Li FY, Newton PCD, Lieffering M (2014) Testing simulations of intra- and inter-annual variation in the plant production response to elevated CO2 against measurements from an 11-year FACE experiment on grazed pasture. Global Change Biology 20:228-239.

Li, Y. S., Yu, Z. H., Liu, X. B., Mathesius, U., Wang, G. H., Tang, C. X., Wu, J. J., Liu, J. D., Zhang, S. Q. and Jin, J. (2017). Elevated CO2 Increases Nitrogen Fixation at the Reproductive Phase Contributing to Various Yield Responses of Soybean Cultivars. *Frontiers in Plant Science* 8, 10.

Li, X. J., Kang, S. Z., Zhang, X. T., Li, F. S. and Lu, H. N. (2018). Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO2. *Agricultural Water Management* 195, 71-83.

Lobell, D. B. and Field, C. B. (2008). Estimation of the carbon dioxide (CO2) fertilization effect using growth rate anomalies of CO2 and crop yields since 1961. Global Change Biology 14, 39-45.

Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. Science, 1204531.

Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., Nösberger, J., & Ort, D. R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO2 concentrations. Science, 312(5782), 1918-1921.

Manderscheid, R., Pacholski, A., Fruhauf, C. and Weigel, H. J. (2009). Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crops Research* 110, 185-196.

Manderscheid, R., Pacholski, A. and Weigel, H. J. (2010). Effect of free air carbon dioxide enrichment combined with two nitrogen levels on growth, yield and yield quality of sugar beet: Evidence for a sink limitation of beet growth under elevated CO2. *European Journal of Agronomy* 32, 228-239.

Manderscheid, R., Erbs, M., & Weigel, H. J. (2014). Interactive effects of free-air CO2 enrichment and drought stress on maize growth. European Journal of Agronomy, 52, 11-21.

Manderscheid, R., Erbs, M. and Weigel, H. J. (2015). Key physiological parameters related to differences in biomass production of maize and four sorghum cultivars under drought and free air CO2 enrichment. In Agriculture and Climate Change - *Adapting Crops to Increased Uncertainty*, vol. 29 eds. D. Edwards and G. Oldroyd), pp. 89-90. Amsterdam: Elsevier Science Bv.

Matsunami, T., Otera, M., Amemiya, S., Kokubun, M. and Okada, M. (2009). Effect of CO2 Concentration, Temperature and N Fertilization on Biomass Production of Soybean Genotypes Differing in N Fixation Capacity. *Plant Production Science* 12, 156-167.

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., ... & Thomson, A. G. J. M. V. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic change, 109(1-2), 213.

Meng, F. C., Zhang, J. H., Yao, F. M. and Hao, C. (2014). Interactive Effects of Elevated CO2 Concentration and Irrigation on Photosynthetic Parameters and Yield of Maize in Northeast China. *Plos One* 9, 13.

Mishra, A. K., Rai, R. and Agrawal, S. B. (2013). Differential response of dwarf and tall tropical wheat cultivars to elevated ozone with and without carbon dioxide enrichment: Growth, yield and grain quality. *Field Crops Research* 145, 21-32.

Mishra, A. K. and Agrawal, S. B. (2014). Cultivar Specific Response of CO2 Fertilization on Two Tropical Mung Bean (Vigna radiata L.) Cultivars: ROS Generation, Antioxidant Status, Physiology, Growth, Yield and Seed Quality. *Journal of Agronomy and Crop Science* 200, 273-289.

Moghadam, H. R. T., Ghooshchi, F. and Zahedi, H. (2011). Effect of UV Radiation and Evaluated CO2 on Morphological Traits, Yield and Yield Components of Canola (Brassica napus L.) Grown under Water Deficit Stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39, 213-219.

Müller, C., & Robertson, R. D. (2014). Projecting future crop productivity for global economic modeling. Agricultural Economics, 45(1), 37-50.

O'Leary, G. J., Christy, B., Nuttall, J., Huth, N., Cammarano, D., Stockle, C., Basso, B., Shcherbak, I., Fitzgerald, G., Luo, Q. Y. *et al.* (2015). Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO2 under a Free-Air CO2 Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. *Global Change Biology* 21, 2670-2686.

Oikawa, S., Miyagi, K. M., Hikosaka, K., Okada, M., Matsunami, T., Kokubun, M., Kinugasa, T. and Hirose, T. (2010). Interactions between elevated CO2 and N-2-fixation determine soybean yield-a test using a non-nodulated mutant. *Plant and Soil* 330, 163-172.

Pal, M., Chaturvedi, A. K., Pandey, S. K., Bahuguna, R. N., Khetarpal, S. and Anand, A. (2014). Rising atmospheric CO2 may affect oil quality and seed yield of sunflower (Helianthus annus L.). *Acta Physiologiae Plantarum* 36, 2853-2861.

Pleijel, H. and Hogy, P. (2015). CO2 dose-response functions for wheat grain, protein and mineral yield based on FACE and open-top chamber experiments. *Environmental Pollution* 198, 70-77.

Qiao, Y. Z., Liu, H. L., Kellomaki, S., Peltola, H., Liu, Y. Y., Dong, B. D., Shi, C. H., Zhang, H. Z., Zhang, C., Gong, J. N. *et al.* (2014). Comparison of the effects of symmetric and asymmetric temperature elevation and CO2 enrichment on yield and evapotranspiration of winter wheat (Triticum aestivum L.). *Ecology and Evolution* 4, 1994-2003.

Rajsnerova, P. and Klem, K. (2013). Interactive effects of elevated CO2 concentration, drought and nitrogen nutrition on yield and grain quality of winter wheat. Brno: Mendel Univ Brno, Fac Agronomy.

Rao, N. K. S., Laxman, R. H. and Mamatha, H. (2015). Effect of elevated CO2 on growth and yield of French bean (Phaseolus vulgaris L.) genotypes. Legume Research 38, 72-76.

Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R.,Hareau, G., Wolf, J. (2018). Climate change impact on global potato production. European Journal of Agronomy, 100, 87-98.

Roy, K. S., Bhattacharyya, P., Neogi, S., Rao, K. S. and Adhya, T. K. (2012). Combined effect of elevated CO2 and temperature on dry matter production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice (Oryza sativa L.). Field Crops Research 139, 71-79.

Santos, R. M., Voltolini, T. V., Angelotti, F., Aidar, S. D. and Chaves, A. R. D. (2014). Productive and morphogenetic responses of buffel grass at different air temperatures and CO2 concentrations. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science* 43, 404-409.

Sanz-Saez, A., Erice, G., Aguirreolea, J., Irigoyen, J. J. and Sanchez-Diaz, M. (2012). Alfalfa yield under elevated CO2 and temperature depends on the Sinorhizobium strain and growth season. *Environmental and Experimental Botany* 77, 267-273.

Saugier, B. (1983). Aspects écologiques de la photosynthèse. Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 130(1), 113-128.

Schmid, I., Franzaring, J., Muller, M., Brohon, N., Calvo, O. C., Hogy, P. and Fangmeier, A. (2016). Effects of CO2 Enrichment and Drought on Photosynthesis, Growth and Yield of an Old and a Modern Barley Cultivar. Journal of Agronomy and Crop Science 202, 81-95.

Shimono, H. and Okada, M. (2013). Plasticity of rice tiller production is related to genotypic variation in the biomass response to elevated atmospheric CO2 concentration and low temperatures during vegetative growth. *Environmental and* Experimental Botany 87, 227-234.

Shimono, H., Okada, M., Yamakawa, Y., Nakamura, H., Kobayashi, K. and Hasegawa, T. (2008). Genotypic variation in rice yield enhancement by elevated CO2 relates to growth before heading, and not to maturity group. Journal of Experimental Botany 60, 523-532.

Thilakarathne, C. L., Tausz-Posch, S., Cane, K., Norton, R. M., Tausz, M. and Seneweera, S. (2013). Intraspecific variation in growth and yield response to elevated CO2 in wheat depends on the differences of leaf mass per unit area. *Functional Plant Biology* 40, 185-194.

Thivierge, M. N., Jego, G., Belanger, G., Bertrand, A., Tremblay, G. F., Rotz, C. A. and Qian, B. D. (2016). Predicted Yield and Nutritive Value of an Alfalfa-Timothy Mixture under Climate Change and Elevated Atmospheric Carbon Dioxide. *Agronomy Journal* 108, 585-603.

Tubiello, F. N., Amthor, J. S., Boote, K. J., Donatelli, M., Easterling, W., Fischer, G., ... & Rosenzweig, C. (2007). Crop response to elevated CO2 and world food supply (A comment on Food for Thought…. Science 312: 1918-1921, 2006).

Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Karlsson, P. E., Sellden, G. and Pleijel, H. (2008). Source-sink balance of wheat determines responsiveness of grain production to increased CO2 and water supply. *Agriculture Ecosystems & Environment* 127, 215-222.

Vanaja, M., Reddy, P. R., Lakshmi, N. J., Maheswari, M., Vagheera, P., Ratnakumar, P., Jyothi, M., Yadav, S. K. and Venkateswarlu, B. (2007). Effect of elevated atmospheric CO2 concentrations on growth and yield of blackgram (Vigna mungo L. Hepper) - a rainfed pulse crop. *Plant Soil and Environment* 53, 81-88.

Vanaja, M., Reddy, P. R. R., Lakshmi, N. J., Yadav, S. K., Reddy, A. N., Maheswari, M. and Venkateswarlu, B. (2011). Yield and harvest index of short and long duration grain legume crops under twice the ambient CO2 levels. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 81, 666-668.

Vanuytrecht E, Thorburn PJ (2017) Responses to atmospheric CO_2 concentrations in crop simulation models: a review of current simple and semicomplex representations and options for model development. Global Change Biology 23:1806-1820.

Wang, L., Feng, Z. Z. and Schjoerring, J. K. (2013). Effects of elevated atmospheric CO2 on physiology and yield of wheat (Triticum aestivum L.): A meta-analytic test of current hypotheses. *Agriculture Ecosystems & Environment* 178, 57-63.

Wang, B., Li Liu, D., Asseng, S., Macadam, I., & Yu, Q. (2015). Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia. Agricultural and Forest Meteorology, 209, 11-21.

Weigel, H. J., & Manderscheid, R. (2012). Crop growth responses to free air CO2 enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. European Journal of Agronomy, 43, 97-107.

Wolf J, Van Oijen M (2003) Model simulation of effects of changes in climate and atmospheric CO2 and O3 on tuber yield potential of potato (cv. Bintje) in the European Union. Agriculture, Ecosystems and Environment 94:141-157.

Xu, G. L., Singh, S. K., Reddy, V. R., Barnaby, J. Y., Sicher, R. C. and Li, T. (2016). Soybean grown under elevated CO2 benefits more under low temperature than high temperature stress: Varying response of photosynthetic limitations, leaf metabolites, growth, and seed yield. Journal of Plant Physiology 205, 20-32.

Yin, X. Y. (2013). Improving ecophysiological simulation models to predict the impact of elevated atmospheric CO2 concentration on crop productivity. Annals of Botany 112, 465-475.

Yoshida, H., Horie, T., Nakazono, K., Ohno, H. and Nakagawa, H. (2011). Simulation of the effects of genotype and N availability on rice growth and yield response to an elevated atmospheric CO2 concentration. *Field Crops Research* 124, 433-440.

Zhang, G. Y., Sakai, H., Usui, Y., Tokida, T., Nakamura, H., Zhu, C. W., Fukuoka, M., Kobayashi, K. and Hasegawa, T. (2015). Grain growth of different rice cultivars under elevated CO2 concentrations affects yield and quality. *Field Crops Researc*

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., ... & Cao, C. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, *6*(8), 791-795.

Chapitre 4. Évolutions techniques

Agneta Forslund, Hervé Guyomard, Bertrand Schmitt, Anaïs Tibi

Les évolutions des volumes d'une production végétale donnée dans une région donnée résultent de la combinaison des évolutions de trois composantes, soit (i) la surface cultivée consacrée à la production, (ii) le rendement défini comme le rapport de la production sur la surface récoltée et (iii) l'intensité culturale définie comme le rapport de la surface récoltée à la surface cultivée. Sur les dernières décennies, l'essentiel des croissances des volumes offerts s'explique par l'augmentation des rendements (voir, par exemple, FAO, 2018[16]). Ces derniers vont évoluer à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique et de ses paramètres clef que sont la température (T), les précipitations (P) et la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone ($[CO_2]$) (*cf.* chapitres précédents du présent rapport). Ils vont également évoluer à ce même horizon 2050 sous **l'influence des évolutions techniques**.

Ce chapitre propose une présentation graphique de la notion d'évolutions techniques, de ses déterminants pour *in fine* expliquer les deux hypothèses d'évolutions techniques « modérées » et d'évolutions techniques « soutenues » retenues dans les projections des rendements des différentes cultures dans les différentes régions du monde à l'horizon 2050 utilisées en entrée du modèle GlobAgri-AE2050 (*cf.* Chapitre 5 du rapport technique de l'étude). Dans un souci didactique, la présentation est réalisée selon une démarche progressive en commençant par décrire la situation initiale et en montrant ensuite pas-à-pas comment, partant de cette situation initiale, les rendements sont projetés à l'horizon 2050. Sans perte de généralité, on considère ci-après le cas d'une culture *i* dans une région *j* en omettant les deux indices relatifs à la culture et à la région.

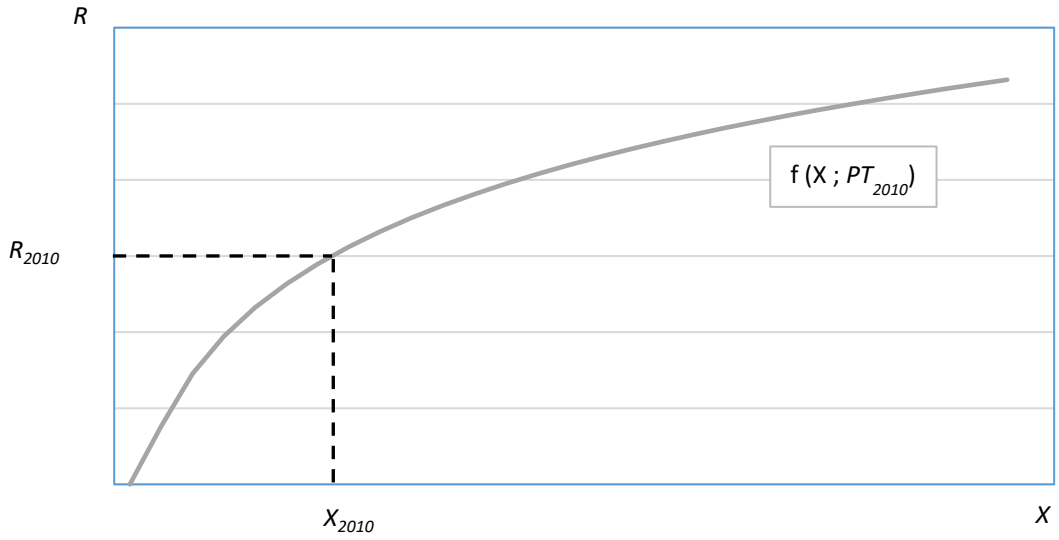
4.1. Les rendements dans la situation initiale « 2010 »

La situation initiale « 2010 » (moyenne des années 2009, 2010 et 2011) considérée dans le modèle GlobAgri-AE2050 est décrite sur la Figure 4-1. Le rendement de l'année « 2010 » est égal à R_{2010} : il est obtenu en utilisant une quantité d'intrants X_{2010} dont l'application permet de générer ce rendement R_{2010} sur la base de la fonction de production (plus spécifiquement la fonction de rendement) $R = f(X ; PT_{2010})$ où PT_{2010} représente le progrès technique au sens large en « 2010 » (*cf. infra* pour l'explicitation du progrès technique). Dans un souci de simplicité, l'ensemble des intrants qui recouvrent les facteurs primaires terre[17], eau, travail et capital (matériels et bâtiments) et les consommations intermédiaires (semences, engrais, produits de traitement des cultures, etc.) est représenté sous la forme d'un agrégat unique X égal à X_{2010} dans l'année de base. Quant au progrès technique PT, son niveau en « 2010 » (PT_{2010}) traduit l'efficience d'utilisation des intrants permettant de générer le niveau de rendement R_{2010}. On a donc $R_{2010} = f(X_{2010} ; PT_{2010})$. La fonction de rendement $f(.)$ est concave en X : une augmentation de la quantité d'intrants à un effet positif mais moins que proportionnel sur le rendement.

[16] FAO (2018). The Future of Food and Agriculture. Alternative Pathways to 2050. FAO: Rome, 224 p.

[17] La prise en compte du facteur terre dans la fonction de rendement ne mesure pas l'effet des évolutions des surfaces consacrées à la culture considérée sur la production de cette culture (effet dit de marge extensive). Il traduit le fait que dans une région donnée, la variation de la surface consacrée à cette culture peut avoir un effet sur son rendement moyen, par exemple par mise en culture de terres de moins bonne qualité en cas d'expansion des terres cultivées.

Figure 4-1. Fonction de rendement et niveau de rendement dans la situation initiale « 2010 »



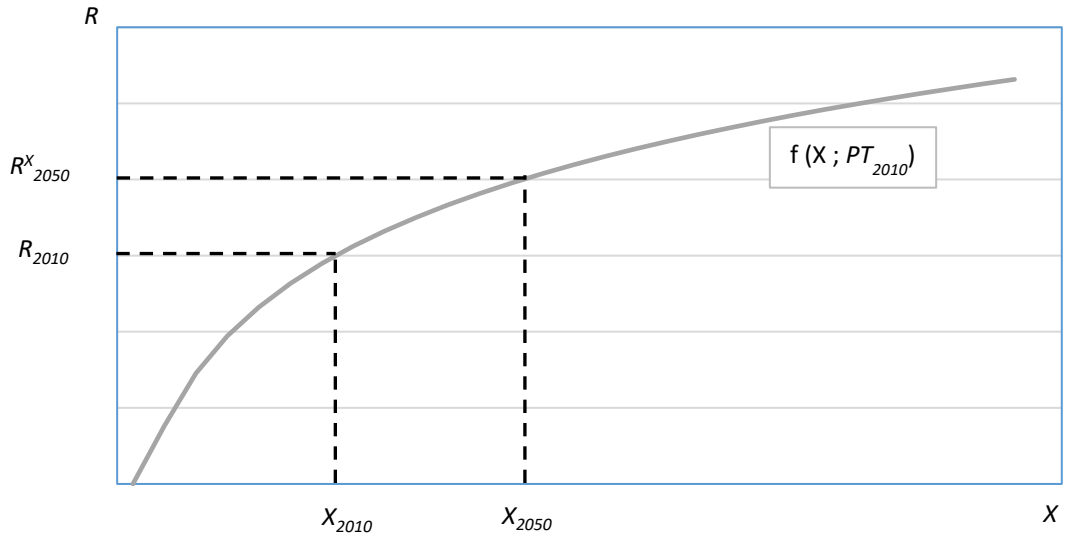
Voyons alors comment peut évoluer le rendement à l'horizon 2050 sous l'influence des évolutions techniques.

4.2. Evolutions des rendements à l'horizon 2050 sous l'influence des évolutions techniques

Le rendement à l'horizon 2050 peut évoluer sous l'influence de **trois déterminants qui définissent les évolutions techniques.**

Le rendement peut évoluer sous le jeu d'une évolution (à la hausse ou à la baisse) des volumes d'intrants utilisés, toutes choses égales par ailleurs**.** Ainsi, sur la Figure 4-2a, l'augmentation des volumes d'intrants utilisés de X_{2010} à X_{2050} entraine une augmentation des rendements de R_{2010} à R^{X}_{2050}. Il peut s'agir, par exemple, d'une augmentation du facteur eau (par recours accru à l'irrigation), des engrais ou encore des produits de traitement des cultures.

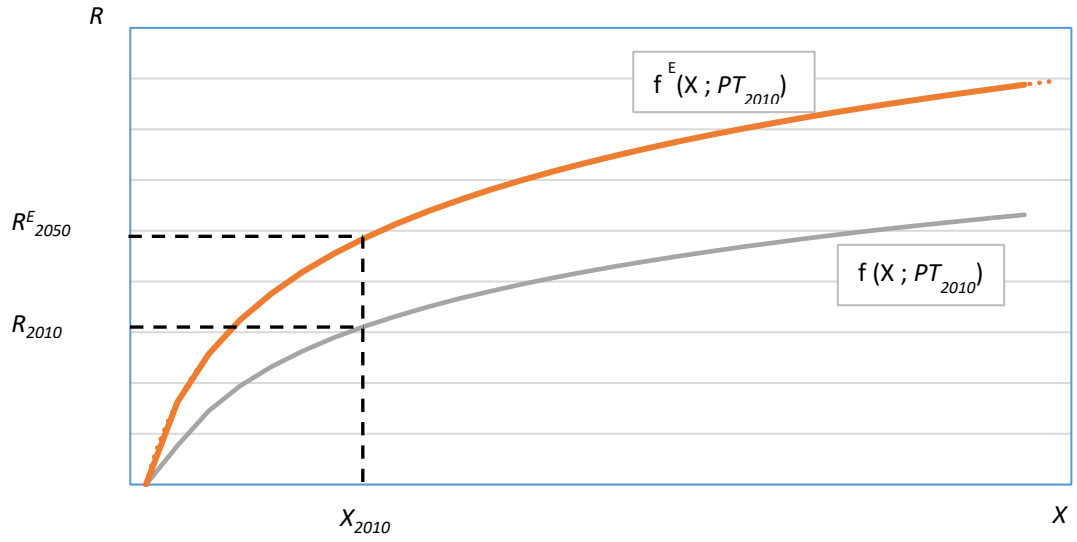
Figure 4-2a. Impact d'une augmentation des usages d'intrants sur les rendements



Le rendement peut également évoluer sous le jeu d'une évolution du progrès technique au sens large qui peut lui-même être décomposé en deux sous-effets :

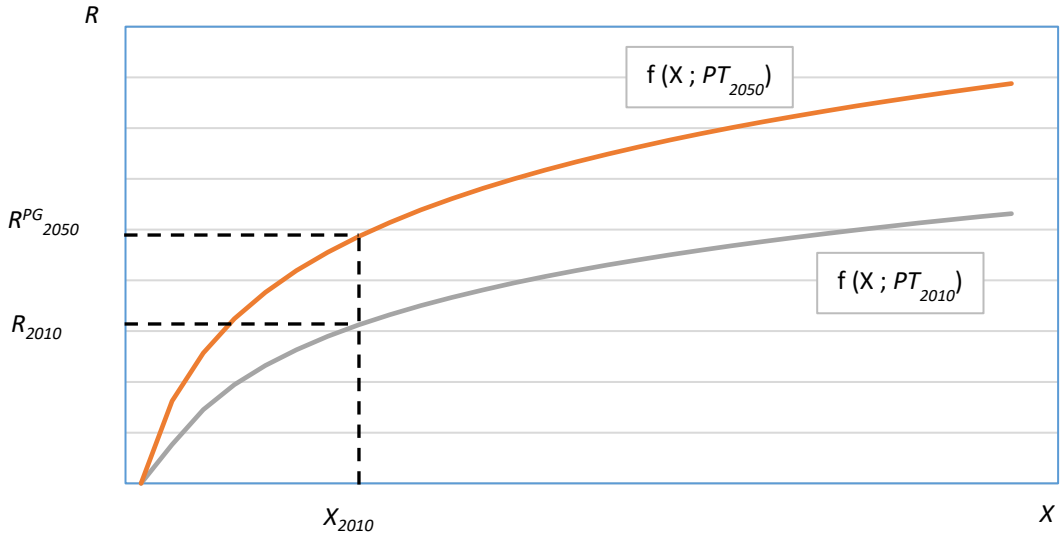
- **Le progrès technique peut traduire une plus grande efficience d'utilisation des intrants par l'agriculteur** pour un volume d'intrants inchangés. Cette réduction des inefficiences peut, par exemple, résulter d'un apprentissage *via* la formation (*learning by teaching*) ou simplement l'expérience (*learning by using* et *learning doing*) qui permettent tous deux d'accroître l'efficacité du travail de l'agriculteur, toutes choses égales par ailleurs. Sur la Figure 4-2b, ce premier sous-effet du progrès technique dit de **réduction des inefficiences** se traduit par un déplacement vers le haut de la fonction de rendement, de $f(X ; PT_{2010})$ à $f^E(X ; PT_{2010})$, qui permet une augmentation des rendements de R_{2010} à R^E_{2050}.

Figure 4-2b. Impact d'une réduction des inefficiences techniques sur les rendements



- **Le progrès technique peut également est le fruit d'une plus grande efficacité des intrants en eux-mêmes** sous la forme, par exemple, d'un progrès génétique (variétal) permettant un gain de rendement, toutes choses égales par ailleurs. Comme dans le cas précédent, sur la Figure 4-2c, ce deuxième sous-effet du progrès technique se traduit également par un déplacement vers le haut de la fonction de rendement, de $f(X ; PT_{2010})$ à $f(X ; PT_{2050})$, qui permet une augmentation des rendements de R_{2010} à R^{PG}_{2050}. Par souci de simplicité, ce deuxième sous-effet du progrès technique sera qualifié d'effet du **progrès génétique** même si ce dernier, qui en est une composante majeure, ne couvre pas toutes les dimensions ; ce deuxième sous-effet peut en effet aussi passer, par exemple, par une plus grande efficience des pratiques de fertilisation ou de protection des cultures.

Figure 4-2c. Impact d'une amélioration des efficiences des intrants sur les rendements

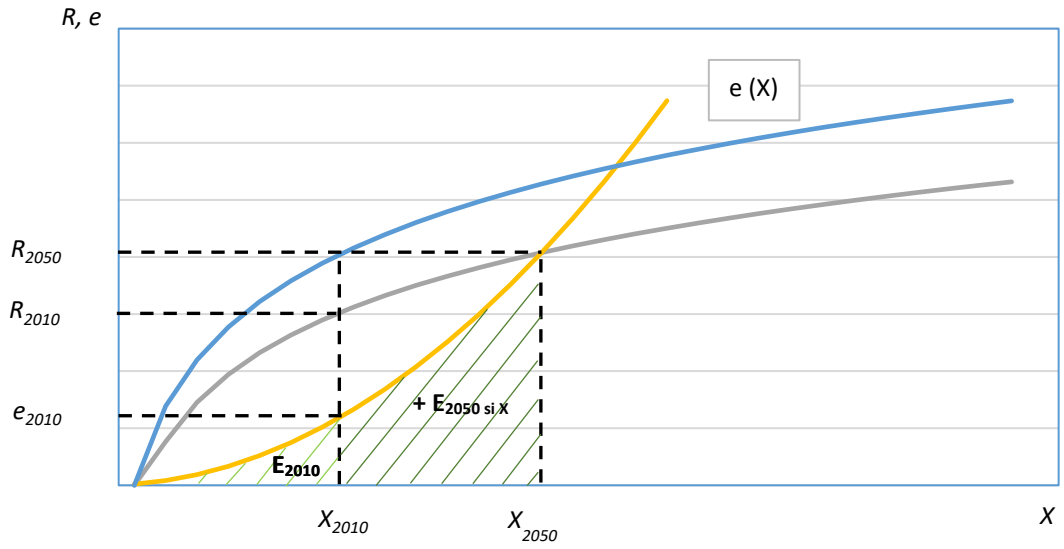


A ce stade de l'analyse, trois points méritent d'être soulignés.

Point 1. En pratique, une augmentation des quantités d'intrants (par exemple des volumes d'engrais) pourra s'accompagner d'une réduction des inefficiences et d'un progrès génétique (au sens défini ci-dessus dans les cas), *i.e.*, d'un progrès technique, ce qui aura pour conséquence d'induire à la fois un mouvement vers la droite sur la fonction initiale de rendement, et un déplacement vers le haut de la fonction de rendement. En outre, il est possible (probable) que les effets ne soient pas simplement additifs, i.e., par exemple, que la réduction des inefficiences ait un effet d'autant plus grand sur les rendements que le progrès génétique est élevé.

Point 2. La décomposition ci-dessus est particulièrement importante dès lors qu'il s'agit d'apprécier les impacts environnementaux associés aux niveaux de rendements tels que projetés à l'horizon 2050. Ceci peut être illustré en considérant, de façon simplifiée et hypothétique, que les rendements n'évoluent à l'horizon 2050 que sous les deux jeux des évolutions (i) des usages d'intrants (qui ici sont supposés croître) ou (ii) et d'une réduction des inefficacités, comme illustré sur la Figure 4-3. Dans la situation initiale de l'année « 2010 », les dommages à l'environnement sont représentés par la surface hachurée E_{2010} sous l'hypothèse (réaliste) d'une fonction de dommage marginal à l'environnement *e (X)* croissante avec les usages des intrants *X* (plus les utilisations augmentent, plus les dommages marginaux et totaux à l'environnement augmentent) et convexe par rapport à ces usages (augmentation plus que proportionnelle du dommage marginal environnemental avec les utilisations des intrants). Si les augmentations des rendements en 2050 résultent du seul fruit d'un accroissement des usages des intrants, elles s'accompagneront d'un accroissement simultané des dommages marginaux et totaux, ces derniers étant alors égaux à l'aire initiale E_{2010} augmentée de l'aire $+E_{2050\ si\ X}$ (c'est ici une illustration des impacts environnementaux de l'intensification des pratiques agricoles). Par contraste, si les augmentations des rendements en 2050 ne résultent que d'une réduction des inefficacités techniques, alors les dommages marginaux et totaux à l'environnement en 2050 sont inchangés, égaux à ceux de « 2010 ». Il pourrait en être de même si la comparaison portait sur des projections des rendements à l'horizon 2050 sous le jeu d'une croissance des usages d'intrants *versus* du progrès génétique (mais celui-ci peut être contesté, y compris sur le plan environnemental, selon ses modalités d'obtention, notamment s'il résulte de certaines techniques conduisant à des plantes génétiquement modifiées)[18].

Figure 4-3. Impacts environnementaux (E) à la marge intensive d'une augmentation des usages des intrants *versus* d'une réduction des inefficacités techniques



Ce deuxième point illustre la difficulté d'études telle que la présente étude, plus généralement de toutes les études visant à analyser la sécurité alimentaire mondiale à tel ou tel horizon, à caractériser son impact environnemental à l'offre (plus spécifiquement, l'impact environnemental des surfaces cultivées ou impact à la marge intensive) si les sources des évolutions techniques ne sont pas explicites. Ainsi, pour ne prendre qu'un exemple, pour évaluer les impacts à la marge intensive de scénarios de sécurité alimentaire à l'horizon 2050 sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou la biodiversité, il convient

[18] Il serait possible de compléter la courbe de dommage environnemental en y ajoutant les dommages en matière de santé, notamment sous l'effet du recours à des intrants chimiques.

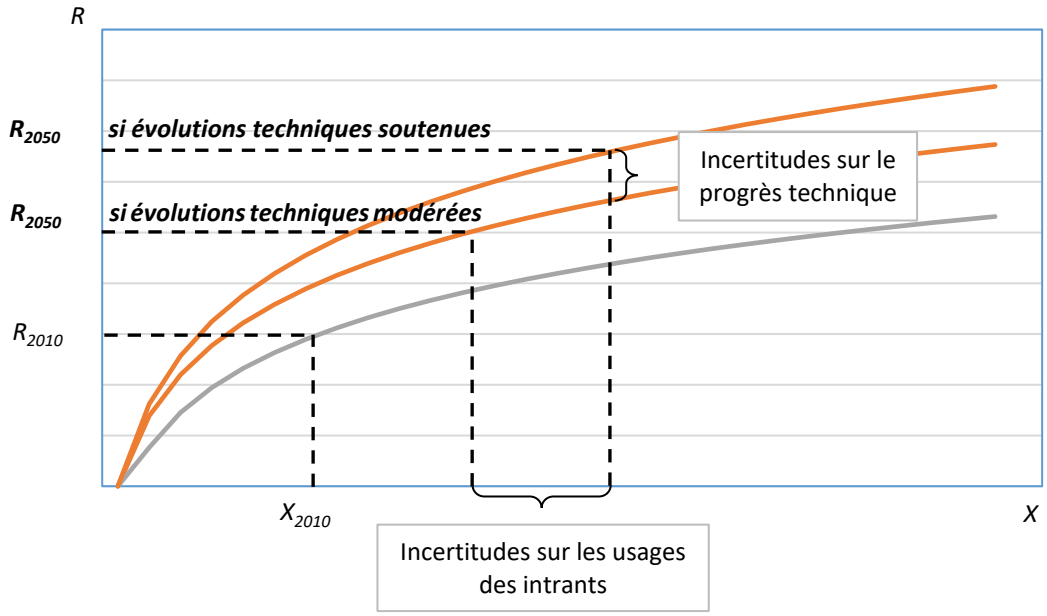
de préciser les sources du progrès technique (les importances relatives des différentes sources du progrès technique), ce qui est très rarement le cas ou ne l'est que de façon implicite.

Point 3. En lien direct avec le point précédent, l'analyse graphique ici proposée est naturellement simplifiée dans la mesure où elle considère les différents facteurs de production sous la forme d'un seul agrégat X, sans possibilité donc d'analyser les conséquences de substitutions entre les divers composants de cet agrégat, par exemple dans le cadre d'une évolution des systèmes vers des systèmes plus agro-écologiques correspondant à un moindre usage d'intrants chimiques au profit d'un recours augmenté à des processus naturels de régulation mais aussi, possiblement, de capital (par exemple, pour le désherbage mécanique) et de travail (à la fois en terme quantitatifs et qualificatifs : connaissances et compétences). Cette évolution se traduit graphiquement par un déplacement vers le bas de la courbe de dommage marginal à l'environnement, ainsi que, très vraisemblablement, de la fonction de rendement (du moins relativement à la fonction de rendement dite « conventionnelle »), qu'il est malheureusement très difficile à apprécier (quantifier) sur la base des connaissances scientifiques actuelles, ceci d'autant plus que ceci doit être fait pour toutes les cultures dans toutes les régions du monde.

4.3. Les rendements dans la situation finale 2050

Les nombreuses incertitudes portant sur les évolutions techniques à l'horizon 2050, plus spécifiquement des trois sources des évolutions techniques, nous conduisent à retenir deux hypothèses qui définiront deux hypothèses de projections des rendements à cette horizon, soit (i) **une hypothèse inférieure d'évolutions techniques modérées** correspondant sur la Figure 4-4a ci-dessous à un accroissement modéré des facteurs de production, à une réduction modérée des inefficacités techniques et un progrès génétique modéré et (ii) **une hypothèse supérieure d'évolutions techniques soutenues** correspondant sur la Figure 4-4a à un accroissement plus soutenu des facteurs de production, à une réduction plus soutenue des inefficacités techniques et un progrès génétique plus soutenu.

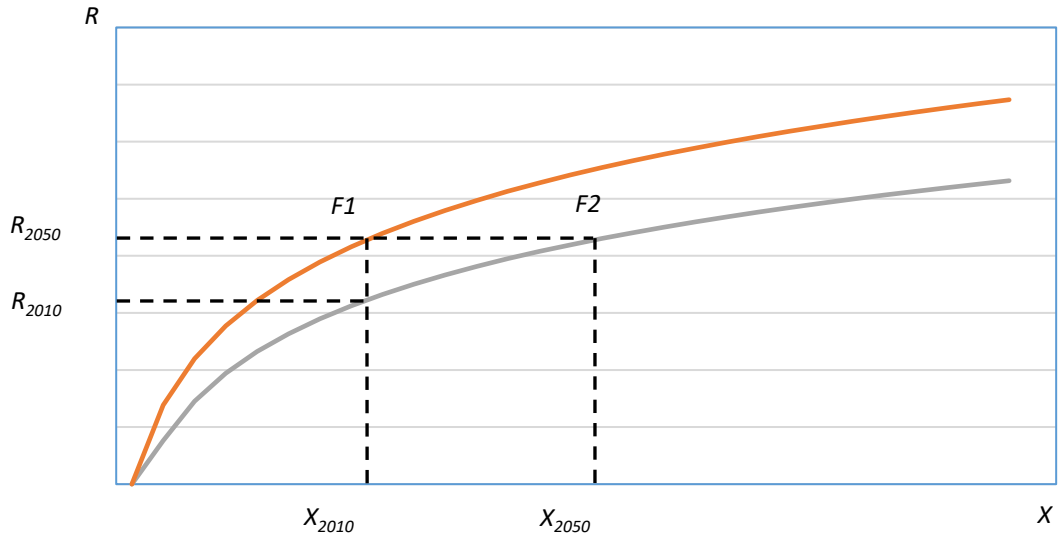
Figure 4-4a. Rendement en 2050 sous le jeu d'évolutions techniques « modérées » *versus* « soutenues »



Les simulations, dans le cas (1) des évolutions modérées des techniques comme dans le cas (2) des évolutions techniques soutenues, ne permettent pas, sans hypothèses additionnelles, de distinguer les responsabilités respectives au sein du changement technique ce qui est dû à une évolution des intrants *versus* au progrès technique. Dit autrement et par exemple, sur la Figure 4-4b, il n'est pas possible de dire si la situation simulée dans le cas (1) d'évolutions techniques modérées correspond au point F1 (uniquement le jeu du progrès technique), au point F2 (uniquement une augmentation des facteurs de production), plus généralement à tout point sur le segment [F1-F2] où chaque point correspond à des hypothèses différentes en matière de répartition du changement technique entre effet du progrès technique et effet des évolutions des usages des facteurs de production. Sans ses précisions, il n'est pas possible d'analyser les impacts à la marge intensive sur

l'environnement (et la santé) des évolutions des rendements. D'où la légitimité de se focaliser, dans la présente étude, sur la question environnementale *via* les usages des terres et les changements d'usage des terres.

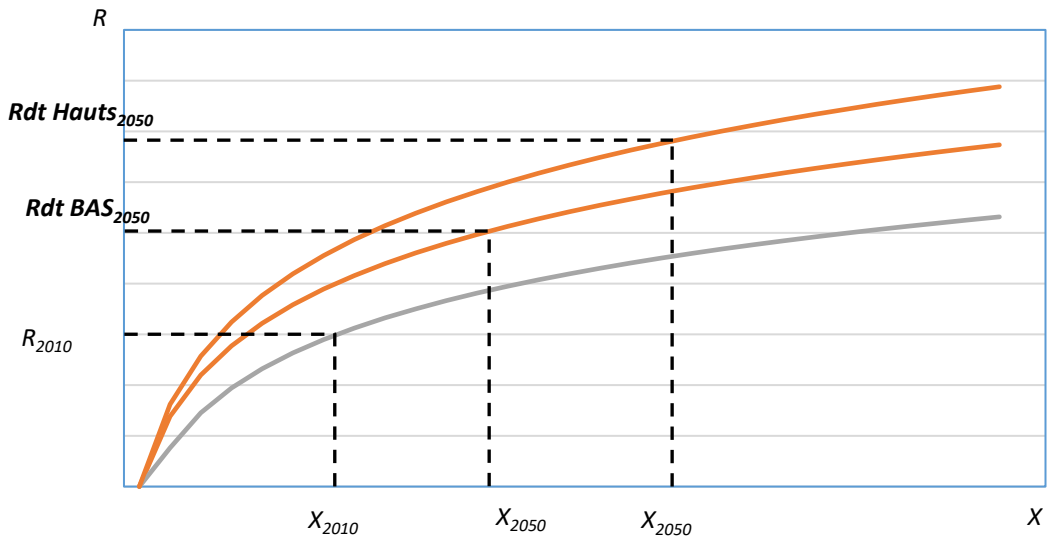
Figure 4-4b. Les rendements en 2050 si évolutions techniques modérées



In fine, **les deux projections en 2050 des rendements** utilisées dans le modèle GlobAgri-AE2050 seront établies en considérant les deux situations illustrées sur la Figure 4-4c :

- **Pour l'hypothèse des rendements bas**, des évolutions techniques modérées auxquelles nous appliquons les effets des changements de températures et de précipitations à cet horizon mais sans prendre en compte une valorisation de l'effet de fertilisation du CO_2. Cette non prise en compte correspond à l'hypothèse selon laquelle les conditions de culture, notamment nutritives et hydriques, ne permettent pas aux plantes de valoriser l'effet positif d'une hausse de la concentration en CO_2 de l'atmosphère sur le rendement ;
- **Pour l'hypothèse des rendements hauts**, des évolutions techniques soutenues auxquelles nous appliquons les effets des changements de températures et de précipitions à cet horizon avec cette fois pleine expression au champ de l'effet de fertilisation du CO_2.

Figure 4-4c. Les deux projections de rendements « bas » et « hauts » en 2050



Chapitre 5. Adaptation des systèmes agricoles au changement climatique

Hélène Marrou

5.1. Introduction : définition et classification des adaptations au changement climatique en agriculture

Alors que les effets du changement climatique sont largement reconnus, modifier les systèmes agricoles actuels pour conserver leur niveau de productivité face au changement climatique devient une nécessité de plus en plus prégnante. L'annonce d'un besoin d'adaptation est un élément conclusif récurant des études et articles sur les changements climatiques. Plus rares sont ceux qui s'attachent directement à identifier et évaluer l'efficacité de possibles adaptations.

Le processus d'adaptation est défini selon (Luo et al., 2017) comme « un ajustement au climat actuel et attendu et à ses effets ». C'est en fait un processus dynamique, résultant de la décision d'un ou plusieurs agriculteurs de changer leur façon d'agir après avoir fait le constat d'un changement climatique. Cette réponse peut être quasi immédiate ou nécessiter une phase de transition selon l'ampleur du changement et les besoins de financement pour la mettre en place. Par exemple, changer de variété nécessitera uniquement d'attendre le cycle de culture suivant (voire deux cycles de culture, si une multiplication de semences est nécessaire). En revanche, mettre en place des rotations plus longues et diversifiées ou se convertir à l'agroforesterie nécessitera une phase de transition de 5 à 15 ans. Délimiter le processus d'adaptation dans le temps peut être complexe : si l'adaptation est très rapide, l'effet de l'adaptation peut être confondu avec l'effet strict du changement climatique ; si l'adaptation est longue, son efficacité peut être sous-évaluée en considérant seulement un système de culture intermédiaire.

Le processus d'adaptation peut en outre être observé à différentes échelles (Iglesias and Garrote, 2015), aux niveaux de la plante, de la parcelle, de l'exploitation jusqu'au paysage, la région et *in fine* la planète toute entière. Ces modifications des systèmes agricoles à diverses échelles sont imbriquées les unes dans les autres, mais résultent toutes de décisions prises par un ou plusieurs agriculteurs. Ainsi les adaptations de zones de production de certaines espèces à l'échelle de la région de production résultent d'un changement des assolements et des rotations adoptées à l'échelle de l'exploitation par les agriculteurs de cette même région. De même les changements de rotation à l'échelle de l'exploitation s'accompagnent de modifications d'itinéraires techniques à l'échelle de la parcelle (date de semis, choix des variétés, etc.).

Pour tenir compte de cette diversité d'échelles spatio-temporelles, le GIEC propose dans son rapport de 2014 (Porter et al., 2014), la classification des adaptations sur ce critère, en distinguant :

1) Les adaptations incrémentales (modifications isolées de pratiques agricoles). Ce sont principalement des adaptations de l'itinéraire cultural. Les adaptations les plus fréquemment évaluées dans la littérature sont : les changements de dates de semis, les changements de variétés, les changements de régimes de fertilisation ou d'irrigation (irrigation disponible ou déjà pratiquée dans la situation de départ, avant adaptation). Il s'agit donc d'adaptations tactiques, que l'agriculteur peut rapidement mettre en œuvre après le constat du changement climatique. C'est le type d'adaptation le plus couvert par la littérature. Ces adaptations sont traitées dans le chapitre 2 de ce rapport.
2) Les adaptations systémiques. Ces adaptations sont mises en œuvre à l'échelle de la parcelle sur une durée de plusieurs cycles de culture, ou plus couramment à l'échelle de l'exploitation. Elles nécessitent une révision complète du système de production (de culture ou d'exploitation) et une réflexion stratégique.
3) Les adaptations transformationnelles. Le GIEC utilise le terme « transformationnel » pour désigner des adaptations qui s'expriment à l'échelle régionale par le changement de zones de production des cultures. Ces adaptations sont le résultat, agrégé à l'échelle de la région des adaptations systémiques à plus petite échelle. Dans la littérature, ces adaptations sont cependant souvent représentées et évaluées, de façon plus théorique, comme de simples substitutions d'une culture par une autre dans le système de culture sans révision des pratiques.

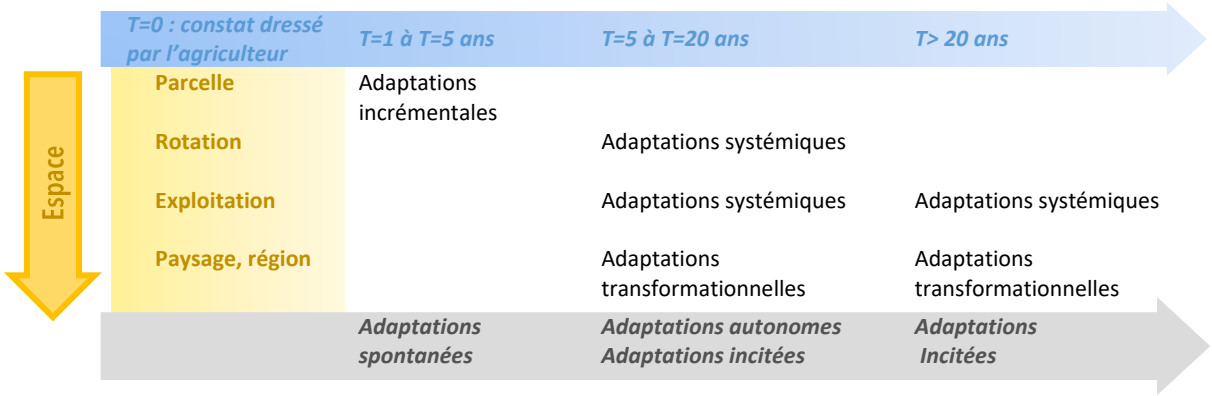
L'évaluation des adaptations de l'agriculture au changement climatique peut être conduite en visant deux objectifs distincts. Une première optique consiste à évaluer les adaptations que les agriculteurs conduiront d'eux même sans autre incitation que le constat individuel de l'effet du changement climatique sur leur productivité et leur résultat économique. Il s'agit alors d'évaluer l'effet du changement climatique au sens large (effet direct sur les productions animale et végétale, et effets indirects par réaction des agriculteurs à ce changement). Une deuxième approche, plus largement répandue dans la littérature consiste à prédire quelles adaptations mises en place par les agriculteurs seraient les plus efficaces pour contrer les effets du changement climatique sur les niveaux de productivité et de quelle manière inciter la mise en œuvre de ces adaptations par les agriculteurs. Il s'agit alors d'évaluer, dans un premier temps, comment des changements de politique publique ou de marché impacteront les systèmes agricoles choisis par les agriculteurs. Dans une seconde étape, l'effet de ces adaptations induites sur les niveaux de productivité est également évalué.

Pour prendre en compte le rôle incitatif des politiques et des marchés sur les adaptations au changement climatique, Schönhart et al. (2014) distinguent les trois catégories d'adaptations suivantes :

1) Les adaptations spontanées qui se limitent à des ajustements simples ne nécessitant pas d'investissements. Elles sont mises en place rapidement par les agriculteurs et ne nécessitent pas d'incitations politico-économiques - il s'agit essentiellement d'adaptations incrémentales telles que la modification des dates de semis ou de récolte en réponse directe au raccourcissement des cycles de culture sous l'effet de la hausse des températures moyennes.
2) Les adaptations autonomes qui correspondent à des changements de pratiques et de systèmes de production que l'agriculteur ne peut mettre en œuvre que moyennant un certain investissement. Ces adaptations doivent avoir un effet bénéfique sur le plan économique pour l'agriculteur, suffisamment facile à percevoir pour qu'il les mette en œuvre sans autre incitation que le constat d'une nécessaire adaptation au changement de climat. Ces adaptations regroupent les changements d'espèces ou de génotypes se traduisant par des modifications des rotations, l'adaptation des techniques d'entretien du sol, les changements d'orientation des exploitations. Il s'agit donc essentiellement d'adaptations systémiques selon la nomenclature du GIEC.
3) Les adaptations incitées par des politiques publiques. Ce sont des adaptations encouragées par les pouvoirs publics pour favoriser le développement d'un usage durable du territoire en contexte de changement climatique. Ces adaptations supposent l'existence ou la mise en place d'infrastructures techniques et socio-économiques locales (mise en place de filières, infrastructures de transport, développement de marchés) (Bindi and Olesen, 2011). Elles sont généralement mises en œuvre à plus larges échelles. Schönhart et al. (2014) y classent les modifications de stratégies d'irrigation (création de ressource, équipement, infrastructure), considérant que le déploiement d'un réseau d'irrigation ne peut se faire sans une volonté politique nationale.

Les deux classifications sur la base de l'échelle de mise en œuvre de l'adaptation ou des incitations responsables de l'adaptation sont donc largement interconnectées (Figure 5-1).

Figure 5-1. Synthèse des types d'adaptations et de leur dimensions spatiales, temporelles, incitatives



Dans ce chapitre, on expose :

- La méthode de sélection de la littérature explorée, et d'extraction des données contenues dans ces articles.
- Une synthèse de la représentation des différents types d'adaptations (en se focalisant sur les adaptations sytémiques et transformationnelles), en Europe et dans le Monde, dans la littérature traitant du changement climatique.
- Une synthèse quantifiée des adaptations systémiques et transformationnelles les plus souvent envisagées et évaluées dans la littérature

5.2. Constitution du corpus bibliographique

La requête utilisée pour interroger le Web of Science (en juin 2018) sur la thématique des adaptations de l'agriculture au changement climatique est la suivante :

TITLE : (Climat and (change* or event* or variability or condition* or factor* or regime* or impact* or effect* or future or trend* or projecti*) or "warming" or forecast* or 2030 or 2040 or 2050 or 2100)*
AND TITLE : ((crop or cereal or maize or corn or wheat or rice or barley or sorghum or oat or oats or rye or triticale or "sugar plant*" or sugarbeet or "sugar beet" or beet* or sugarcane or "sugar cane" or oilcrop* or oleaginous or proteaginous or "oilseed crop*" or rape* or soya* or soybean* or sunflower or "protein crop*" or pulse* or pea* or "faba bean*" or lupin* or alfalfa or forage* or grass or fodder or pasture* or canola or bean or grass* or "grain legume*") AND (yield or product*)) or agricult* or "farming" or "breeding"*
AND TOPIC : ((adapt or adjust* or change* or replace* or diversif*) and ("double crop*" or "triple crop*" or "relay crop*" or intens* or rotat*))*

Nous nous sommes limités aux publications des dix dernières années (de 2007 à 2018). Cette requête a permis de collecter 353 références. Ce corpus a ensuite été filtré en deux étapes successives : un tri sur les titres des articles (réduction à 109 publications), puis sur les résumés (réduction à 64 articles). Les principaux motifs de retrait d'un article de la liste initiale, étaient :

- articles sur l'effet du changement climatique n'incluant pas d'analyse du processus d'adaptation (autrement qu'à travers des recommandations d'adaptation dans la conclusion),
- articles traitant exclusivement d'adaptations incrémentales. Les articles combinant adaptations incrémentales et systémiques ont été conservés.

Pour les 64 références qui ont été finalement retenues, les données suivantes on été extraites et rassemblées dans une base de données :

- zone géographique de l'étude,
- espèces végétales concernées,
- type d'adaptation (transformationnelle vs systémique, autonomes vs incitées)
- adaptations prises en compte,
- quantification de l'effet des adaptations (oui/non),

5.3. Analyses des scénarios d'adaptation rapportés dans la littérature

5.3.1. Zones géographiques et espèces couvertes

11 articles rapportent des études conduites à l'échelle mondiale (Figure 5-2). La majorité des articles présentent des études concernant un ou plusieurs pays d'Europe (15). Parmi ces quinze articles, 4 concernent l'Europe en général, 8 rapportent des études réalisées sur un pays d'Europe de l'Ouest ou du centre, et 3 articles concernent un pays d'Europe du Nord (Scandinavie). Après l'Europe, les régions les mieux représentées sont le Pacifique (10 articles, dont 8 études conduites en Australie), la Chine (7) et l'Afrique Sub-Saharienne (7).

25 articles sur 64 ne mentionnent pas explicitement la liste des espèces prises en compte ou considèrent une liste extensive de plus de 20 espèces (Figure 5-3). L'espèce la plus étudiée est le blé, considéré en tant que tel (14 articles) ou au sein d'un ensemble de cultures dénommées « céréales » (14 articles). Une large part de la littérature est également dédiée aux productions fourragères ou aux prairies (18 articles). Les autres céréales (maïs/sorgho/mil, riz) complètent la liste des espèces les plus étudiées.

Figure 5-2. Répartition des références entre régions géographiques.

EU : Europe, NE : Europe du Nord, WCE : Europe de l'Ouest et Centrale, Global : Monde, China : Chine, SSA : Afrique Sub Saharienne, SA : Asie du Sud, NA&Med : Afrique du Nord et pays de la Méditerranée, US&C : Amérique du Nord, LA : Amérique latine, Russia : Russie

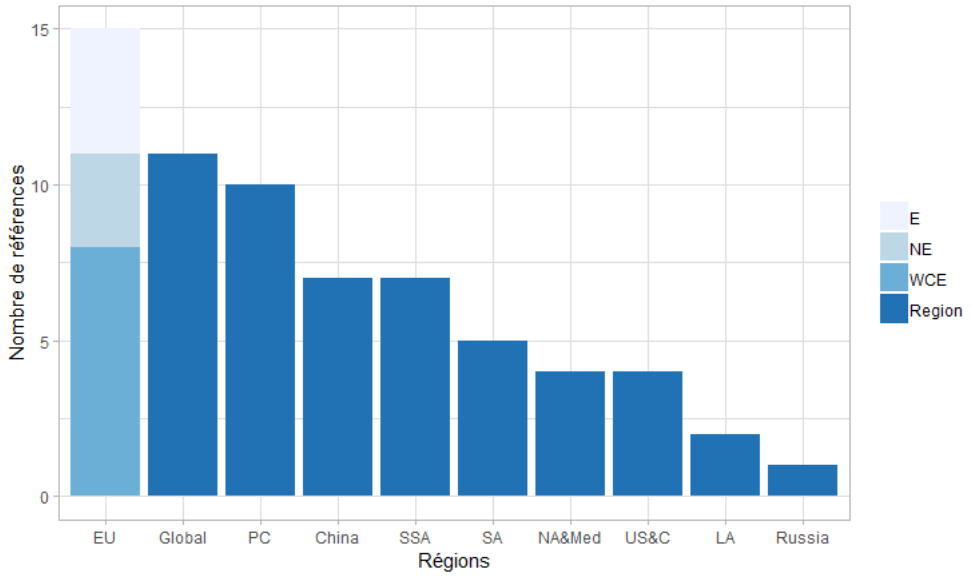
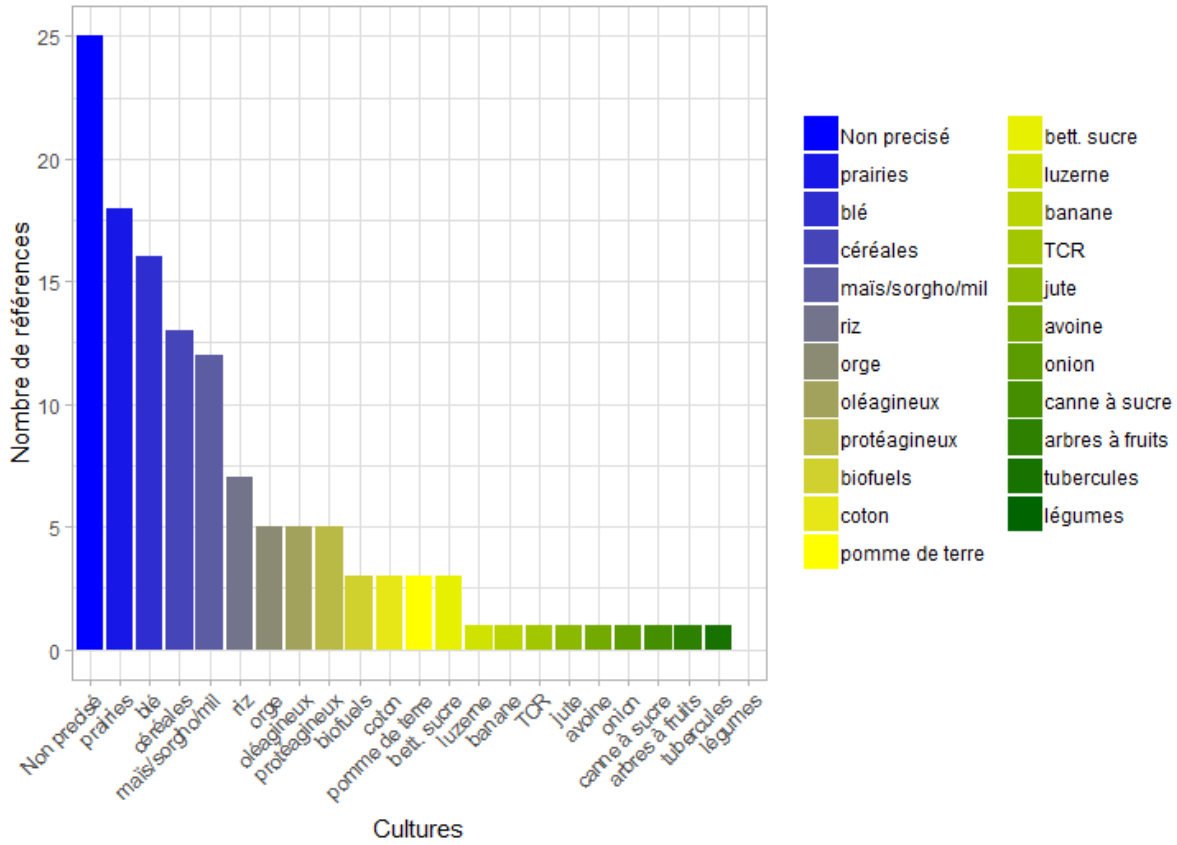


Figure 5-3. Répartition des références par espèce

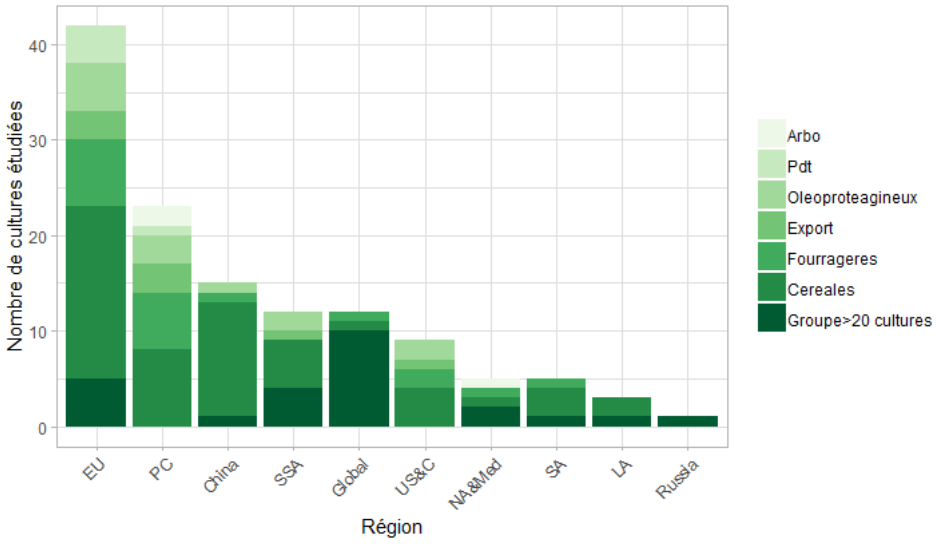


TCR : Taillis courte rotation (foresterie)

En terme de répartition géographique, les études mondiales se veulent le plus souvent exhaustives et concernent un ensemble de plus de 20 espèces (10 cas sur 12) (Figure 5-4). Les études européennes considèrent en général plusieurs espèces (en moyenne 42/15 =2.8 espèces par article), le plus souvent des céréales (18 cas sur 42) ou des plantes fourragères. Les céréales font aussi l'objet de la majorité des études en Chine (12 cas sur 15), en Afrique Sub-Saharienne (3 cas sur 5), dans le Pacifique (8 cas sur 23), en Amérique du Nord (4 cas sur 7) et du Sud (2 cas sur 3), et en Russie (1 cas sur 1).

Figure 5-4. Nombre de cultures étudiées par zone géographique.

Les cultures ont été regroupées par type. Arbo : arboriculture tempérée, banane, foresterie à courte rotation, Pdt : pommes de terre, tubercules, potagères, oignon, Export : coton, betterave à sucre, canne à sucre, jute, Fourragère : prairies, luzerne, Céréales : céréales (indéterminé), blé, orge, avoine, riz, maïs/sorgho/mil, Oléoprotéagineux : légumineuses, colza, tournesol, lin. Une étude peut concerner plusieurs espèces. Pour les études considérant une liste d'espèces de plus de vingt espèces ou non citées nominativement, on considère une espèce « Groupe > 20 espèces



5.3.2. Méthodes mises en œuvre et types de messages

En dehors de deux articles expérimentaux, les études traitant d'adaptation peuvent être scindés en trois grands groupes en terme de méthodes d'analyse (Figure 5-5a).

Premièrement, près de la moitié des articles (31) ont un objectif de prédiction de l'effet d'adaptations sur la productivité agricole de la région ou des externalités environnementales, et utilisent des modèles numériques pour réaliser ces prédictions. Des modèles de climat, éventuellement combinés à des générateurs de données climatiques sont couplés à des modèles bioéconomiques (19 articles) ou simplement des modèles de culture (12 articles). Dans la premier cas, l'objectif est de prédire quelles adaptations (à l'échelle de la parcelle ou de la ferme) seront déclenchées dans divers scenarii de changement des politiques publiques, et quelles seront les conséquences de ces adaptations sur la production locale ou régionale. La conclusion de ces articles peut être l'identification de mesures politiques efficaces pour réduire l'impact du changement climatique ou contrecarrer des évolutions autonomes non désirables car ayant un impact environnemental contraire (pollution de l'eau notamment). Dans certains cas, les études vont jusqu'à effectuer des calculs d'optimisation pour trouver les montants de subvention ou les évolutions de prix qui seraient nécessaires pour faire évoluer les systèmes de production dans le sens souhaité. Dans le deuxième cas, le contexte politico-économique n'est pas pris en compte. Les adaptations possibles sont listées a priori en entrée du modèle et leur efficacité à réduire l'effet du changement climatique sur les rendements et moins souvent les flux d'azote dans le sol est testée par modélisation.

Deuxièmement, 16 articles utilisent des approches plus narratives et listent ou évaluent de façon qualitative des adaptations. Ce sont soit des articles de position, ou des études basées sur des enquêtes auprès d'agriculteurs, ou des études rétrospectives de l'histoire agraire de la région.

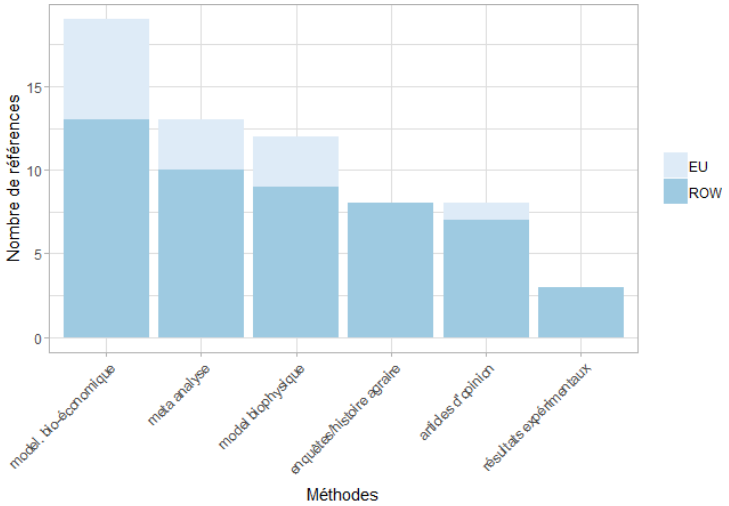
Enfin une troisième catégorie d'articles propose des méthodes semi quantitatives et se basent sur une revue de la littérature pour évaluer et classer les adaptations en utilisant des indicateurs qualitatifs.

Les objectifs et messages délivrés par ces études varient en lien avec les méthodes mises en œuvre (Figure 5-5b) :

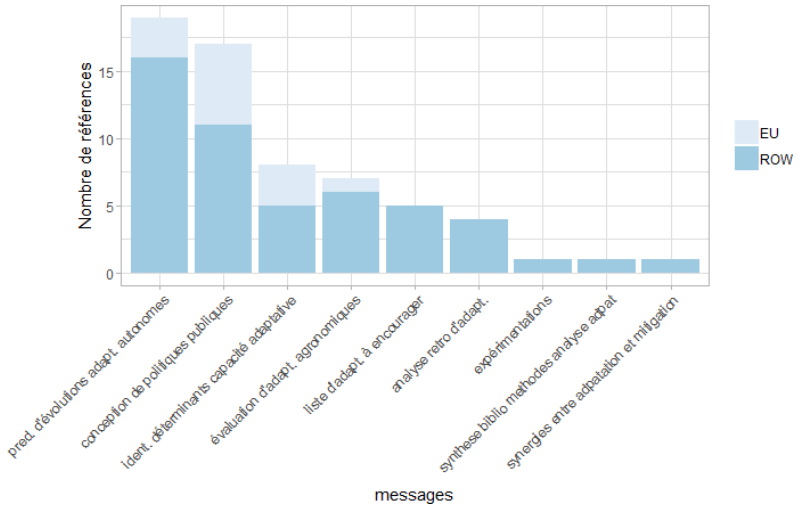
- 19 articles prédisent quelles sont les adaptations spontanées ou autonomes qui seront probablement mises en place par les agriculteurs sous l'effet direct du changement climatique et ses conséquences économiques pour les exploitations. Ces articles étudient l'impact de ces adaptations sur l'évolution de la productivité et les externalités environnementales.
- 17 articles évaluent l'effet de plusieurs mesures publiques pour identifier les politiques qu'il faudrait mettre en œuvre pour encourager l'adaptation dans le sens souhaité, et la minimisation de l'impact du changement climatique (sur la productivité alimentaire, l'état économique des exploitations, ou les externalités environnementales)
- 7 articles, évaluent l'effet d'adaptations agronomiques scénarisées sur le rendement et sur l'environnement. Dans ces articles, la probabilité que ces adaptations soient mises en place et de quelle manière n'est pas prise en compte.
- 8 articles, basées sur des enquêtes, discutent des conditions nécessaires pour une bonne capacité d'adaptation des exploitations (voir ci-dessous)
- 5 articles (revue ou opinion), synthétisent la littérature en une liste d'adaptations classifiées à encourager
- 4 articles retracent l'histoire agraire d'une région pour comprendre comment les systèmes de cultures ont été adaptés au changement climatique dans le passé dans cette zone.
- Les 3 derniers articles sont singuliers : une étude expérimentale sur l'adaptation des itinéraires techniques, une méta-analyse sur les méthodes de modélisation utilisées pour étudier l'adaptation au changement climatique, un article de revue sur les synergies entre mitigation et adaptation.

Figure 5-5. Nombre de publications classées par méthode mise en œuvre (a) ou par type de message délivré (b) et par zone géographique d'application (ROW : reste du monde, EU : Europe).

(a)



(b)



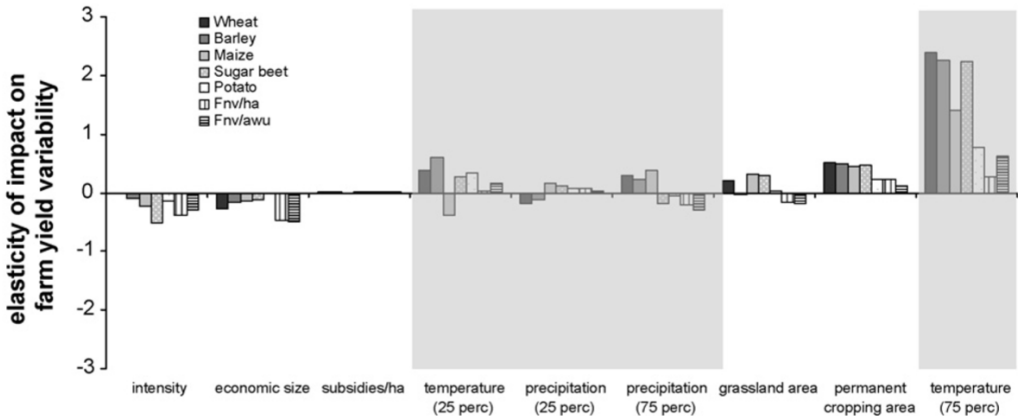
5.3.3. Capacité adaptative des exploitations agricoles

Tanaka et al., (2015) soulignent que les adaptations à large échelle (systémiques ou transformationnelles), non seulement nécessitent souvent une incitation politique forte, mais aussi une capacité des agriculteurs à anticiper les effets du changement climatique, et à investir pour développer les adaptations nécessaires. Bindi et Olesen (2011) décrivent la capacité adaptative des exploitations agricoles comme « la capacité d'un système à s'ajuster au changement climatique (comprenant à la fois la variabilité et les extrêmes climatiques) pour réduire les dégâts, profiter des opportunités, ou supporter les conséquences ». Ce concept est repris par de nombreux auteurs (Enete et al., 2012; Iglesias et al., 2012; Iglesias and Garrote, 2015; Jiri et al., 2017; Reidsma et al., 2010; Souissi et al., 2017; Tanaka et al., 2015) pour identifier les caractéristiques favorisant la capacité à s'adapter des exploitations agricoles. En Méditerranée, Iglesias et al (2010) calculent un index de capacité adpatative à l'échelle du pays, basé sur 4 grands types de variables : la capacité naturelle (ressources en eau de pluie, besoin en eau total et en eau agricole, pourcentage de surface salinisée par l'irrigation, densité de population), la capacité économique (PIB, PIB/habitant, valeur ajoutée agricole, besoin en énergie, pourcentage de la population en dessous du seuil de pauvreté), les ressources humaines (emploi agricole, taux d'alphabétisation, espérance de vie, pourcentage de la population sans accès à l'eau courante), et l'innovation agricole (pourcentage de la surface agricole irriguée, pourcentage de dispositifs « goutte à goutte », efficience d'irrigation, consommation de fertilisants, niveau de mécanisation).

Dans une étude européenne, Reidsma et al (2010) identifient des déterminants à la fois climatiques et structurels favorisant la capacité d'adaptation à l'échelle des exploitations (Figure 5-6). L'instabilité des exploitations (ici évaluée à travers l'élasticité des rendements des principales cultures par ex. blé, maïs, orge, betterave à sucre et pomme de terre) répond fortement aux valeurs des hautes températures, et dans une moindre mesure à l'intensité des pratiques de fertilisation et à la surface en culture permanente. Les exploitations situées dans des régions qui ne subissent pas des températures extrêmes hautes, qui ont une faible surface en cultures permanentes et des pratiques de fertilisation intensive tendent aussi à avoir de meilleurs rendements.

Figure 5-6. Influence des caractéristiques des fermes et des conditions climatiques sur la variabilité du rendement agricole de 1990 à 2003 (c.-à-d. la variabilité temporelle, au niveau de la ferme), mesurée par le rendement du blé tendre, du maïs grain, de l'orge, de la pomme de terre et de la betterave à sucre, et de la valeur nette par hectare (fnv/ha) et de la valeur nette par unité de travail humain (fnv/awu)

Pour la variable continue subventions/ha, l'impact est basé sur l'élasticité à la moyenne ; comme les conditions climatiques ont des termes quadratiques, les élasticités sont mesurées au 25e et au 75e percentile. L'intensité, la taille économique, la culture permanente et la superficie des prairies font référence aux dimensions du type d'exploitation agricole, et les effets fixes font référence aux changements entre les dimensions du type d'exploitation. A des fins de comparaison, les élasticités ont été calculées à l'aide de valeurs liées aux dimensions du type d'exploitation agricole. De gauche à droite, les variables sont classées selon leur variabilité spatiale.Les blocs gris indiquent les variables mesurées à l'échelle régionale. Les autres sont mesurées à l'échelle de l'exploitation (source : Reidsma et al., 2010).



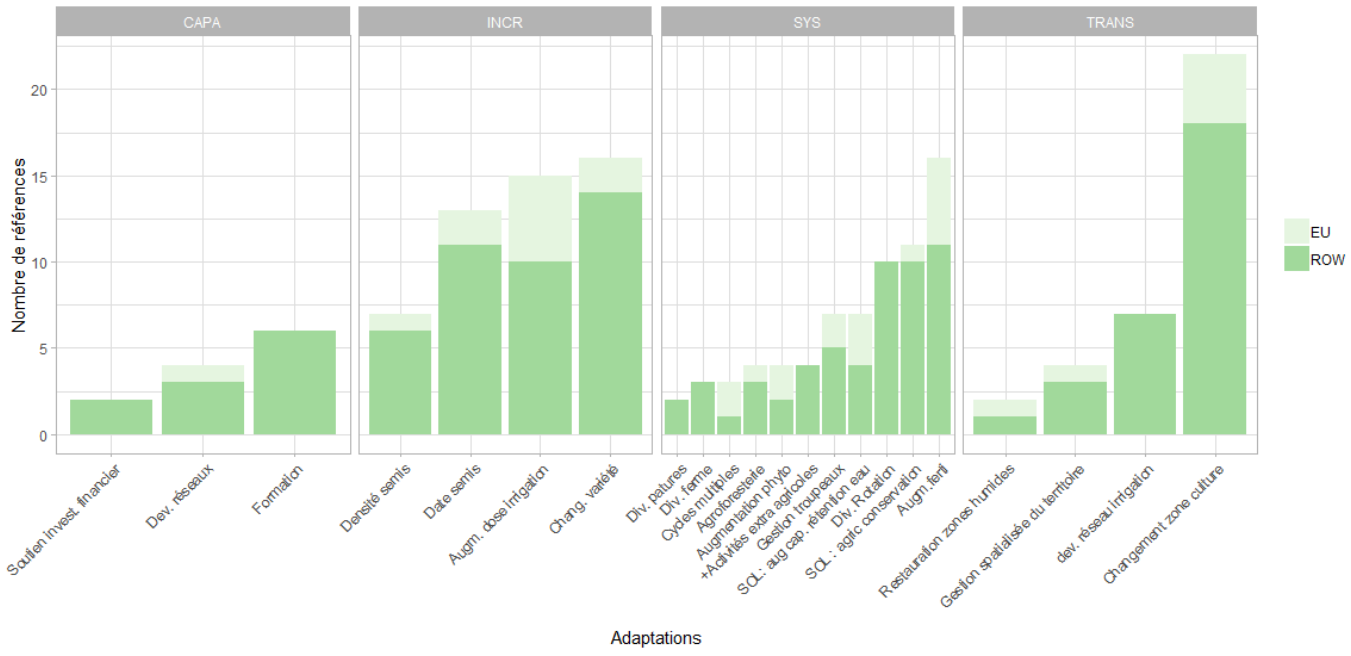
Au Sud de la Méditerranée, Souissi et al. (2018) ont montré que les fermes diversifiées mais spécialisées dans les cultures annuelles (irriguées ou partiellement irriguées), avec moins de 25% de surface en arboriculture étaient plus aptes à s'adapter au chagement climatique pour maintenir leur marge brute, en ajustant la nature et la surface des cultures mais sans être obligées d'augmenter leur surface ou de modifier leur main d'œuvre. A l'inverse les fermes spécialisées en arboriculture étaient les moins capables de s'adapter.

5.3.4. Recensement et classification des adaptations proposées

Au total, nous avons recensé 23 types d'adaptations regroupées en 4 catégories (Figure 5-7). Aux trois catégories définies dont parle le GIEC (adaptations incrémentales, systémiques, et transformationnelles), nous avons ajouté une catégorie « renforcement de capacité » qui regroupe des adaptations non techniques, mais qui visent à favoriser la capacité d'innovation des agriculteurs ou à démarrer de nouvelles productions à l'échelle de la région (formation, création de réseaux, soutien de filières, etc…). Les adaptations incrémentales listées ici sont celles trouvées dans des articles qui ne traitent pas exclusivement de ces degrés d'adaptation (lesquels ont été exclus de la revue de la littérature, cf chap.2). Nous avons classé dans les adaptations systémiques, les changements d'itinéraires techniques visant à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol (augmentation de la capacité de rétention, augmentation de la quantité de matière organique), en considérant que de tels effets sur le sol nécessitent la révision complète du système de culture, par exemple, un passage à l'agriculture de conservation souvent mentionnée comme un moyen d'adaptation au changement climatique.

Figure 5-7. Liste des adaptations recencées dans la littérature classées par type et par région du monde

CAPA : Renforcement de capacité, INCR : Incrémentales, SYST : Systémiques, TRANS : Transformationnelles
EU : Europe, ROW : Reste du monde



Les adaptations le plus souvent mentionnées et étudiées, en excluant les adaptations incrémentales, sont (Figure 5-7) :

- Le déplacement des zones de production (adaptation transformationnelle) ;
- L'intensification des systèmes de culture par le recours accru aux fertilisants ou aux pesticides (adaptation systémique) ;
- La gestion améliorée des cultures fourragères et des modes de paturage (adaptation systémique) ;
- La diversification des rotations et des systèmes d'exploitation (adaptation systémique, non décrite en Europe) ;
- La pratique de l'agriculture de conservation ou d'un travail du sol optimisé pour augmenter la capacité de stockage en eau du sol (adaptation systémique).

5.4. Synthèse des effets des principales adaptations identifiées

5.4.1. Déplacement des zones de production

Les déplacements de zones de production des cultures sont majoritairement étudiés en Chine et en Europe du Nord (pays scandinaves).

En Chine, une extension de la zone de production du riz vers le Nord du pays est prévue par plusieurs études (Ju et al., 2013, Ye et al., 2014, Huang et al., 2018). Cette extension vers le Nord s'accompagnerait d'une transition vers des systèmes rizicoles à cycles multiples, du fait du raccourcissement des cycles de culture sous l'effet de l'augmentation de la température moyenne. Ye et al. (2014) et Ju et al. (2013) basent ces prédictions sur l'évolution spatiale des systèmes de culture à base de riz au cours des dernières décennies (de 1950 à 2010). Au cours de cette période, la zone de culture du riz à un seul cycle a peu évolué ou régressé vers le Sud. Les rendements de riz de ce système de production ont également évolué à la baisse (Figure 5-8). En revanche, les systèmes à deux ou trois cycles de riz par an (riz-riz ou riz-lentille-riz ou engrais vert-riz-riz) ont gagné jusqu'à 240 km vers le Nord dans certaines zones de Chine (Ye et al., 2014). Ces systèmes à plus fort rendement de riz par hectare et par an ont au contraire vu leur rendement potentiel augmenter en retardant la date de repiquage du riz (« Medium » et « Late » planting, Ye et al., 2014). D'après Ju et al. (2017), ce déplacement des zones de production du riz, et l'extension de systèmes de culture à plusieurs cycles de riz résulterait en une augmentation des rendements par hectare de 54 à 106 % (remplacement des systèmes à un seul cycle de riz par les systèmes à double cycles de culture), et une augmentation supplémentaire de 27 à 58% des rendements si les systèmes de culture à deux cycles étaient remplacés par des systèmes de culture à 3 cycles (2 cycles de riz), sous climat actuel.
D'après Yang et al (2011), la limite de production du blé d'hiver (produit dans des systèmes blé d'hiver – maïs d'été) se serait déplacée également d'en moyenne 200 km vers le Nord pendant la même période (2050-2007)

Figure 5-8. Évolution des surfaces et rendements de riz dans les différents systèmes de culture en Chine entre les périodes 1951-1980 et 1981-2010

SRCS : système à un seul cycle de riz, ETCRS : système à triple cycle, plantation précoce, MTCRS : système à triple cycle, plantation intermédiaire, LTCRS : système à triple cycle, plantation tardive). Source : Ye et al., 2014

Table 2 Changes in suitable planting area, paddy land area, and potential yield from 1951-1980 to 1981-2010 for different rice cropping systems[1)]

Rice cropping system	Acreage of suitable planting area ($\times 10^4$ km^2)	Acreage of paddy area ($\times 10^4$ km^2)	yield potential of rice (%)
SRCS	-6.2 (6.4)	-1.92 (11.4)	-18.9
ETCRS	+0.7 (14.8)	+0.17 (2.6)	-0.1
MTCRS	+2.3 (21.2)	+0.76 (8.0)	+8.5
LTCRS	+3.2 (23.4)	+1.08 (19.6)	+12.8

[1)] Data in the parentheses are changes in percentage.

En Europe du Nord, une augmentation des rendements céréaliers est attendue du fait du réchauffement des températures. Ces résultats sont rapportés dans plusieurs études en Finlande (Purola et al. 2018, Peltonen-Sainio et al., 2018, Rankinen et al. 2013). Un accroissement de l'ordre de 11 à 27% des rendements de blé est prédit entre la période actuelle et l'horizon 2042–2070, selon les scénarios climatiques (RCP4.5 ou RCP 8.5) et les types de blé. En conséquence, on s'attend à ce que ces cultures deviennent plus attractives pour les agriculteurs de la région et que les surfaces emblavées représentent entre 120 et 176% des surfaces actuelles (Purola et al., 2018). En l'absence de mesures politiques ou de changement économique régional, on s'attend à ce que les agriculteurs favorisent la monoculture de céréales, majoritairement, et gardent seulement une petite part de leur assolement pour les oléagineux de printemps (colza). A l'horizon 2015, les céréales d'hiver (blé d'hiver, seigle et triticale) devraient augmenter de 50% dans les assolements aux dépens des céréales de printemps du fait de leur plus fort potentiel de rendement (Rankinen et al., 2013). Les surfaces en jachère ou celles destinées aux mesures agro-environnementales (verdissement) seront au contraire réduites (Purola et al., 2018).

En revanche, autour du bassin Méditerranéen, où les conditions sont déjà limitantes en eau, aucune augmentation de rendement n'est attendue d'ici l'horizon 2020-2030. Pourtant, une augmentation des surfaces en blé est prédite par Dono et al. (2016) en Sardaigne, notamment en zone non irriguée (+86%). En l'absence d'irrigation, les cultures fourragères de printemps s'avèreront peu rentables et seront supplantées par les céréales. Lorsque l'irrigation est possible en revanche, du ray grass italien pourra être cultivé en remplacement dans les exploitations laitières. On s'attend à une extension du maïs

ensilage dans les zones irriguées du fait de la disponibilité d'hybrides à cycle courts, mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques (Figure 5-9).

Figure 5-9. Évolution des surfaces cultivées en Sardaigne entre aujourd'hui et la période 2020-2030 période.

Source: Dono et al.
Total : surface totale, WUA : surface irriguée, rainfed : surface irriguée

	Present climate (Ha)			Future climate (%Δ)		
	Total	*WUA*	*Rainfed*	*Total*	*WUA*	*Rainfed*
Grain cereals	13,533	10,440	3093	20.8	1.5	86.0
Durum wheat	*8335*	*6426*	*1909*	*2.2*	*1.0*	*6.2*
Rice	*2300*	*2300*	*0*	*1.6*	*1.6*	-
Barley	*1958*	*1160*	*798*	*−4.6*	*−5.3*	*−3.6*
Maize	*100*	*86*	*14*	*116*	*136*	*−6*
Forage crops	32,488	13,437	19,051	−7.3	2.0	−13.9
Grasslands	*11,394*	*0*	*11,394*	*−7.2*	-	*−7.2*
Hay crops	*9523*	*2408*	*7115*	*−18.3*	*3.9*	*−25.8*
Silage maize	*5711*	*5711*	*0*	*6.1*	*6.1*	-
Italian ryegrass	*3580*	*3555*	*25*	*12.4*	*11.9*	*89.6*
Alfalfa	*1990*	*1533*	*457*	*−29.9*	*−38.0*	*−2.8*
Triticale	*290*	*230*	*60*	*−3.2*	*−4.0*	*−0.2*
Field horticultural crops	6021	5703	318	0.1	0.1	−0.1
Processing tomato	*1935*	*1902*	*33*	*−0.3*	*−0.3*	*−0.2*
Melon and watermelon	*1485*	*1368*	*117*	*−0.6*	*−0.7*	*−0.02*
Potato	*516*	*509*	*7*	*2.7*	*2.8*	*−0.8*
Carrot	*256*	*256*	*0*	*6.2*	*6.2*	-
Early potato	*114*	*92*	*22*	*−8.2*	*−10.2*	*0*
Greenhouse crops	434	385	49	−1	−2	0
Tree crops	1702	1351	351	0	0	0

Turner et al. (2017) soulignent également aux Etats-Unis, la nécessité d'instaurer des politiques fortes en faveur des prairies pour contrebalancer la tendance à la réduction de ces surfaces au profit des céréales, du fait des adaptations autonomes au changement climatique.

Enfin, en Australie, le changement climatique pourrait donner plus de place dans les assolements à des cultures à valorisation non alimentaires comme les biocarburants, au dépend des cultures alimentaires (Battaglia et al., 2015).

5.4.2. Intensification des cultures par recours augmenté aux fertilisants et/ou aux pesticides

L'intensification des systèmes de culture en réponse au changement climatique est l'adaptation la plus largement documentée dans le corpus consulté. La grande majorité des études conduites en Europe (Méditerranéenne, centrale ou septentrionale) et en Australie rapporte une augmentation des surfaces de céréales, des rendements en céréales et des usages de fertilisants.

Les apports supplémentaires de fertilisants répondraient à la fois à une augmentation des potentiels (due à la réduction des effets du froid en zone septentrionale, ou de l'effet fertilisant du CO_2), et à la volonté d'optimiser la conduite des cultures pour se rapprocher des potentiels. Toutes les études soulignent les conséquences inquiétantes de ces évolutions sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la fabrication des engrais de synthèse, et la pollution des eaux par le nitrate (Dono et al., 2016; Kirchner et al., 2016; Purola et al., 2018; Rankinen et al., 2013). Les émissions de GES du fait de cette intensification augmenteraient de 10% au total entre aujourd'hui et l'horizon 2042-2070, mais baisseraient de 30% quand elles sont exprimées par kilogramme de biomasse produite, à des fins d'alimentation de l'Homme et du bétail (Purola et al., 2018).

L'étude spatialisée conduite par Kirchner et al. (2016) en Autriche met en évidence que les différences entre zones productives et peu productives augmenteraient : alors que dans les zones déjà conduites de manière intensive, on s'attend à des augmentations des utilisations de fertilisants (sur 20 à 25% de la surface agricole du pays) et du nombre de labours (sur 18 à 21% de la surface agricole), on observerait plutôt une réduction des apports de fertilisants sur les zones plus extensives (20 à 30% de la surface).

Certaines études bioéconomiques montrent que la Politique Agricole Commune (PAC) ne pourrait pas inverser cette tendance, que les DP (Paiements Directs) soient maintenus ou pas (Rankinen et al., 2013). En Autriche, seule une augmentation drastique des aides du Programme Agro environnemental Autrichien (ÖPUL), couplé à une suppression des DP de la PAC pourrait induire une réduction des apports de fertilisants (Mitter et al., 2015).

5.4.3. Diversification des rotations et des systèmes d'exploitation

La diversification des exploitations (plusieurs activités ou ateliers menés simultanément) est souvent présentée comme une réponse possible au changement climatique dans le cadre d'adaptations spontanées adoptées par les agriculteurs (Liu et al., 2018; Luo et al., 2016; Souissi et al., 2017). A l'échelle de l'exploitation, les mécanismes d'adaptation par la diversification reposent sur la combinaison de plusieurs sources de revenus non impactées avec la même intensité par un évènement climatique, et la capacité de réaliser des ajustements entre surfaces allouées à chaque production (Souissi et al, 2017). La capacité à se diversifier est elle-même contrainte par la disponibilité de certaines ressources : par exemple, les exploitations ayant accès à l'irrigation auraient plus de possibilités de diversification que les autres (Souissi et al, 2017).

A l'échelle infra-exploitation (parcelle ou groupe de parcelles), l'allongement des rotations, couplé à une diversification des assolements, constituent des adaptations au changement climatique fréquemment recommandées dans les études sur le changement climatique. Les systèmes de culture seraient en effet moins impactés par l'évolution climatique (Liu et al., 2018; Luo et al., 2016; Souissi et al., 2017). L'insertion de cultures intermédiaires piège à nitrates est aussi vue comme une adaptation à encourager pour diversifier les assolements et les rotations tout en réduisant les effets de l'intensification (Doltra et al., 2014). L'agroforesterie est également mentionnée, à 5 reprises, comme une adaptation que les agriculteurs adopteraient de façon autonome (donc, non influencée par les politiques) face au changement climatique (Enete et al., 2012; Mijatovic et al., 2012; Roco et al., 2017; Smith and Olesen, 2010; Wang et al., 2017). S'il semble y avoir un large consensus sur le rôle joué par la diversification des systèmes de culture et l'allongement des rotations dans l'adaptation au changement climatique, les processus sous-jacents (créant de la résilience et de la robustesse) ne sont pas encore complètement explicités, et les effets de cette diversification mal quantifiés. L'alternance (dans des rotations) ou la combinaison simultanée (dans des associations) d'espèces avec des capacités d'enracinement différentes ou des phénologies différentes (qui influencent la dynamique de besoin en ressources minérales) améliorerait l'utilisation des ressources hydriques et azotées dans les sols pauvres. On peut donc imaginer que des systèmes diversifiés seraient aussi plus résilients en contexte de changement climatique, lorsque les précipitations sont plus rares et plus irrégulières. Peu d'études sont néanmoins en mesure d'apporter une estimation quantifiée du bénéfice attendu en contexte de changement climatique, du fait de la difficulté à modéliser ces systèmes complexes.

Une des rares exceptions est l'article de Doltra et al. (2014) qui estiment l'effet du changement climatique et de l'allongement des rotations sur la productivité des cultures au Danemark. L'étude utilise deux modèles climatiques (les RCMs KNMI et METO) pour générer le climat futur à différents horizons (2020, 2040, 2060 et 2080) et le modèle de culture FASSET pour simuler la productivité de huit rotations céréalières (Figure 5-10) : trois rotations céréalières de base avec et sans ajouts de cultures pièges à nitrates avant les cultures de printemps et deux rotations (avec et sans CIPAN) dans lesquelles on a substitué deux cycles de céréales à paille par du maïs.

D'après Doltra et al. (2014), l'adaptation de la troisième rotation à un climat plus chaud grâce à l'introduction du maïs améliorerait la productivité des cultures dans cette rotation de 9 % en moyenne (Figure 5-10). L'effet des cultures pièges à nitrates (CIPAN) sur la productivité des cultures de la rotation varie selon le type de rotation. Dans le cas de la rotation 1, sur sols sablonneux irrigués, cet effet serait positif avec une augmentation moyenne de 8% de la productivité de la rotation, en moyenne sur tous les scénarios climatiques et toutes les échelles de temps. Pour la rotation 2, sur un limon sableux, l'introduction d'une culture dérobée conduirait à une légère (+3 %) augmentation de la productivité des cultures, tandis que celle-ci resterait pratiquement inchangée pour la rotation 3.

Figure 5-10. Rotations à l'étude et rendements simulés par les modèles climatiques KNMI et METO et le modèle FASSET. Adapté de Doltra et al., 2014

Rotations de base	Rotation 1	orge printemps		orge printemps		potato		blé hiver			
	Rotation 2	blé hiver		blé hiver		betterave sucre		orge printemps			
	Rotation 3	blé hiver		blé hiver		orge printemps		orge hiver		colza hiver	
Rotations avec piège à nitrates	Rotation 1+CIPAN	orge printemps	ryegrass	orge printemps	ryegrass	potato		blé hiver	radis four.		
	Rotation 2+CIPAN	blé hiver		blé hiver	radis four.	betterave sucre		orge printemps			
	Rotation 3+CIPAN	blé hiver		blé hiver	radis four.	orge printemps		orge hiver		colza hiver	
Rotation modifiée	Rotation 3+Maïs	blé hiver		maïs grain		maïs grain	v	orge printemps		colza hiver	
	Rotation 3+CIPAN+Maïs	blé hiver	radis four.	maïs grain	ryegrass	maïs grain	ryegrass	orge printemps		colza hiver	

			KNMI		METO	
Climat	CO2(ppm)	Rotation	+CIPAN	Sans CIPAN	+CIPAN	sans CIPAN
Baseline	350	Rotation 1 (sol sableux irrigué)	6.2	5.9	6.2	5.9
2020	418		6.5	6.1	6.4	6
2040	483		6.6	6.2	6.7	6.1
2060	563		6.6	6.1	6.8	6.3
2080	639		6.5	6	6.7	6
Baseline	350	Rotation 2 (sol limoneux)	6.8	7	6.8	7
2020	418		7.1	7.4	7.3	7.7
2040	483		7.5	7.9	7.5	8
2060	563		7.8	8.2	8	8.4
2080	639		8	8.2	8.4	8.6
Baseline	350	Rotation 3 (sol limoneux)	5.3	5.4	5.3	5.4
2020	418		5.4	5.5	5.4	5.5
2040	483		5.5	5.5	5.4	5.5
2060	563		5.6	5.6	5.5	5.6
2080	639		5.6	5.6	5.5	5.6
2040	483	Rotation 3 +Maïs	6.1	6	5.7	5.7
2060	563		6.1	6	5.8	5.8
2080	639		6	5.9	5.8	5.7
*irrigated rotation						

Dans leur étude menée sur la côte Est de l'Australie, Luo et al (2016) évaluent l'effet de la diversification de la monoculture de coton irrigué par l'insertion de cycles de blé d'hiver à l'horizon 2030. Deux alternatives à la monoculture sont considérées : une rotation où du blé est cultivé pendant l'interculture de deux cotons un an sur 3, et une rotation où le blé est cultivé dans l'interculture 2 ans sur 3. Les simulations, obtenues en combinant les sorties de 4 modèles climatiques et du modèle de culture APSIM, montrent que les rendements de coton et de blé baisseront dans tous les cas, bien que l'effet de l'augmentation atmosphérique du CO_2 soit prise en compte. Néanmoins, l'introduction du blé dans la monoculture de coton semble avoir un effet positif sur le rendement du coton dans 6 des 9 sites simulés, sous climat actuel. A l'horizon 2030, le changement climatique causerait des baisses de rendement de coton de 1 à 7.1% dans les rotations où le blé revient 1 an sur 3, et 1.3 à 7.6% quand le blé revient deux ans sur 3. Le rendement du coton en monoculture baisserait de 10% ; il semblerait donc que l'introduction du blé dans la rotation à la place de la jachère atténuerait l'effet du changement climatique, probablement grâce à une meilleure gestion de l'eau du sol. Le rendement du blé serait lui plus affecté par le changement climatique que celui du coton : il baisserait de 3 à 22% selon les sites dans les deux rotations contenant du blé entre aujourd'hui et 2030.

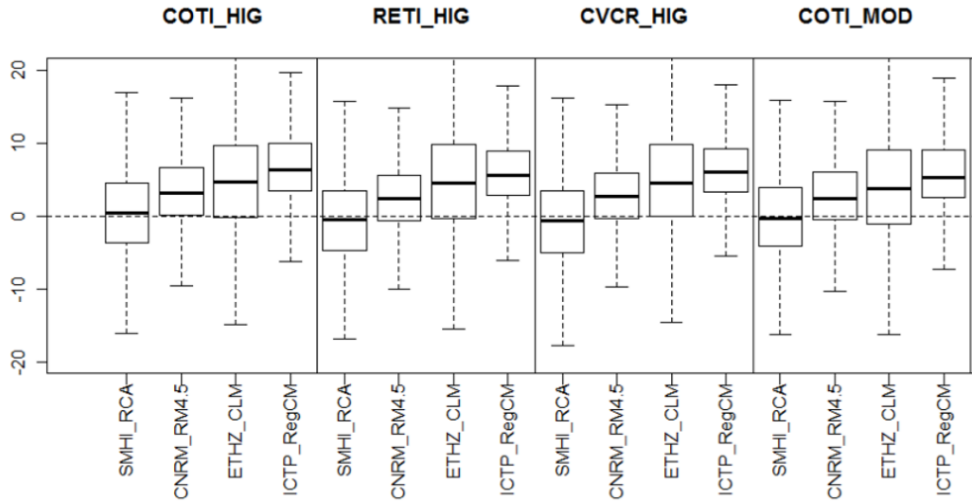
Enfin, à l'échelle infra parcellaire, Mijatovic et al., (2012) et Liu et al (2018) montrent également que les prairies temporaires ou permanentes résisteraient d'autant mieux au changement climatique que leur diversité floristique serait plus élevée.

5.4.4. Pratique de l'agriculture de conservation ou d'un travail du sol optimisé pour augmenter la capacité de stockage en eau du sol

Parmi les adaptations des systèmes de culture les plus citées dans la littérture, on retrouve celles qui visent à améliorer l'état physique, chimique et biologique du sol, de façon à mieux y stocker l'eau et les minéraux et les rendre disponibles pour les plantes. Bon nombre d'études restent évasives sur les moyens techniques à mettre en œuvre pour améliorer ces capacités du sol. Le reste des études prônent le plus souvent l'agriculture de conservation comme un mode de conduite des agrosystèmes favorisant la restauration d'un état physique, chimique et biologique du sol favorable. Peu d'études proposent une évaluation

quantifiée de l'effet de l'agriculture de conservation sur les rendements en contexte de changement climatique. Dans leur étude en Autriche, Schonart et al. (2014) suivent une approche de modélisation intégrée combinant 4 modèles climatiques régionaux, un modèle bioéconomique (PASMA), et un modèle de rotation (Rotat) pour évaluer des scénarios de changements climatiques aux horizons 2030 et 2050. Les scénarios d'adaptation simulés incluent la simplification du travail du sol, et l'utilisation de couverts végétaux (Figure 5-11). Tous les scénarios prévoient une augmentation des rendements. Avec le modèle climatique SMHI_RCA, il semblerait que cette augmentation soit en moyenne plus faible avec les mesures d'agriculture de conservation (-0.5% avec le travail du sol simplifié, -1% avec des couverts végétaux en hiver). Néanmoins, ces différences d'effets simulés sont inférieures à l'incertitude sur les rendements liées au choix du modèle de climat.

Figure 5-11. Variation (%) de rendement des cultures (en moyenne sur toutes les cultures), simulé pour 4 RCM (SMHI8RCA, CNRM_RM4.5, ETHZ_CLM, ICTP_RegCM), pour des systèmes avec labour classique (COTI) ou travail du sol simplifié (RETI), ou des couverts végétaux en hiver, avec une fertiisation élevée (HIG) ou modérée (MOD)



Source : Schonart et al. 2014

5.5. Conclusion

La nécessité d'adaptation des systèmes de culture et du fonctionnement des exploitations, au-delà du changement ponctuel de pratiques, est systématiquement invoqué en conclusion de toutes les études sur les effets du changement climatique. Cependant rares sont les études qui proposent une quantification des effets attendus de ces adaptations. On peut invoquer comme raison à cela la difficulté à élaborer des scénarios d'adaptation plausibles à des échelles allant de l'exploitation, à la région, et au monde entier. La limitation des outils de modélisation, souvent inefficaces pour prédire l'effet de pratiques agroécologiques comme l'agroforesterie, la diversification des assolements et des rotations ou l'introduction de couverts végétaux est une autre raison du faible niveau d'évaluation quantifié de l'effet des adaptations au changement climatique sur les rendements des cultures. On retient cependant, parmi les adaptations les plus prometteuses pour réduire l'effet du changement climatique, le changement de zone de culture de certaines espèces, avec par exemple, l'introduction de cultures tropicales (maïs) dans des assolements de céréales à paille en Europe du Nord. L'allongement des rotations, y compris en augmentant le nombre de cycles de culture par an du fait du raccourcissement de ceux-ci est une autre piste prometteuse. On peut cependant s'inquiéter de l'effet à moyen terme de ces pratiques intensives d'utilisation du sol sur le renouvellement des ressources naturelles (eau notamment), déjà raréfiées par le changement climatique. Enfin, bon nombre d'études soutiennent que le changement climatique incitera les agriculteurs à intensifier leur conduite de culture en Europe, avec un usage plus important de fertilisants et de pesticides qui pourraient avoir un impact environnemental aggravant (pollution des eaux, production de gaz à effet de serre). Seules des mesures politiques fortes pourront inciter la mise en place de pratiques plus agroécologiques qui pourraient par ailleurs avoir un effet positif sur les rendements de cultures et la mitigation du changement climatique.

Références citées dans le Chapitre 5

Ahmed, K.F., Wang, G., You, L., Yu, M., 2016. Potential impact of climate and socioeconomic changes on future agricultural land use in West Africa. Earth Syst. Dyn. 7, 151–165. https://doi.org/10.5194/esd-7-151-2016

Anderson, R.L., 2009. A Critical Factor for Sustainable Crop Production in a Semiarid Climate. Sustain. Agric. Rev. 1.

Andree, B.P.J., Koomen, E., Diogo, V., Reidsma, P., Schaap, B., 2017. Assessing local and regional economic impacts of climatic extremes and feasibility of adaptation measures in Dutch arable farming systems. Agric. Syst. 157, 216–229. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.013

Attaher, S.M., Medany, M.A., Abou-Hadid, A.F., 2010. Possible adaptation measures of agriculture sector in the Nile Delta to climate change impacts. Adv. Sci. Res. 3, 123–126. https://doi.org/10.5194/asr-3-123-2009

Audsley, E., Pearn, K.R., Harrison, P.A., Berry, P.M., 2008. The impact of future socio-economic and climate changes on agricultural land use and the wider environment in East Anglia and North West England using a metamodel system, Climatic Change. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9450-9

Azumah, S.B., Donkoh, S.A., Ansah, I.G.K., 2017. Contract farming and the adoption of climate change coping and adaptation strategies in the northern region of Ghana. Environ. Dev. Sustain. 19, 2275–2295. https://doi.org/10.1007/s10668-016-9854-z

Badmos, B.K., Villamor, G.B., Agodzo, S.K., Odai, S.N., Badmos, O.S., 2018. Local level impacts of climatic and non-climatic factors on agriculture and agricultural land-use dynamic in rural northern Ghana. Singap. J. Trop. Geogr. 39, 178–191. https://doi.org/10.1111/sjtg.12236

Battaglia, M., Connor, J.D., Nolan, M., Bryan, B.A., Grundy, M.J., Hatfield-Dodds, S., Keating, B.A., 2015. Scenarios for Australian agricultural production and land use to 2050. Agric. Syst. 142, 70–83. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.008

Bindi, M., Olesen, J.E., 2011. The responses of agriculture in Europe to climate change. Reg. Environ. Chang. 11, 151–158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

Challinor, A.J., Parkes, B., Ramirez-Villegas, J., 2015. Crop yield response to climate change varies with cropping intensity. Glob. Chang. Biol. 21, 1679–1688. https://doi.org/10.1111/gcb.12808

Doltra, J., LÆgdsmand, M., Olesen, J.E., 2014. Impacts of projected climate change on productivity and nitrogen leaching of crop rotations in arable and pig farming systems in Denmark. J. Agric. Sci. 152, 75–92. https://doi.org/10.1017/S0021859612000846

Dono, G., Lacetera, N., Quaresima, S., Doro, L., Dell'Unto, D., Pasqui, M., Deligios, P., Cortignani, R., Mula, L., Vitali, A., Roggero, P.P., 2016. Winners and losers from climate change in agriculture: Insights from a case study in the Mediterranean basin. Agric. Syst. 147, 65–75. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.013

Enete, A.A., Madu, I.A., Onwubuya, E.A., 2012. Climate change and the profitability of indigenous adaptation practices in smallholder agriculture in South East Nigeria. Outlook Agric. 41, 179–185. https://doi.org/10.5367/oa.2012.0092

Finger, R., Calanca, P., 2011. Risk management strategies to cope with climate change in grassland production: An illustrative case study for the Swiss plateau. Reg. Environ. Chang. 11, 935–949. https://doi.org/10.1007/s10113-011-0234-9

Ghahramani, A., Moore, A.D., 2015. Systemic adaptations to climate change in southern Australian grasslands and livestock: Production, profitability, methane emission and ecosystem function. Agric. Syst. 133, 158–166. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.11.003

Granlund, K., Peltonen-Sainio, P., Helenius, J., Rankinen, K., Forsius, M., Sippel, K., Hakala, K., Laapas, M., Ojanen, H., 2018. Climate change adaptation in arable land use, and impact on nitrogen load at catchment scale in northern agriculture. Agric. Food Sci. 22, 342–355. https://doi.org/10.23986/afsci.7500

Harrison, M.T., Cullen, B.R., Armstrong, D., 2017. Management options for dairy farms under climate change: Effects of intensification, adaptation and simplification on pastures, milk production and profitability. Agric. Syst. 155, 19–32. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.003

Hayat, T., Ahmad, B., Alsaedi, A., Feng, L., Chen, B., 2016. Dynamic forecasting of agricultural water footprint based on Markov Chain-a case study of the Heihe River Basin. Ecol. Modell. 353, 150–157. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.11.002

Huang, K., Wang, J., Huang, J., 2018. The potential benefits of agricultural adaptation to warming in China in the long run. Environ. Dev. Econ. 23, 139–160. https://doi.org/10.1017/S1355770X17000390

Hunter, M.C., Smith, R.G., Schipanski, M.E., Atwood, L.W., Mortensen, D.A., 2017. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. Bioscience 67, 386–391. https://doi.org/10.1093/biosci/bix010

Iese, V., Holland, E., Naidu, S., Wairiu, M., Maeke, J., 2016. Farming Adaptations to the Impacts of Climate Change and Extreme Events in Pacific Island Countries. Nat. Resour. Manag. 852–875. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0803-8.ch040

Iglesias, A., Garrote, L., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. Agric. Water Manag. 155, 113–124. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014

Iglesias, A., Mougou, R., Moneo, M., Quiroga, S., 2011. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. Reg. Environ. Chang. 11, 159–166. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0187-4

Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., Garrote, L., 2012. From climate change impacts to the development of adaptation strategies: Challenges for agriculture in Europe. Clim. Change 112, 143–168. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0344-x

Jiri, O., Mafongoya, P.L., Chivenge, P., 2017. Building climate change resilience through adaptation in smallholder farming systems in semi-arid Zimbabwe. Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag. 9, 151–165. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-07-2016-0092

Ju, H., van der Velde, M., Lin, E., Xiong, W., Li, Y., 2013. The impacts of climate change on agricultural production systems in China. Clim. Change 120, 313–324. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0803-7

Kaur, S., Kaur, H., 2019. Conflict, Climate Change and Food Security in South Asia. https://doi.org/10.1142/9789813239913_0004

Kirchner, M., Schönhart, M., Schmid, E., 2016. Spatial impacts of the CAP post-2013 and climate change scenarios on agricultural intensification and environment in Austria. Ecol. Econ. 123, 35–56. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.12.009

Lieffering, M., Newton, P.C.D., Vibart, R., Li, F.Y., 2016. Exploring climate change impacts and adaptations of extensive pastoral agriculture systems by combining biophysical simulation and farm system models. Agric. Syst. 144, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.01.005

Liu, D.L., Yang, B., Schwenke, G., Sun, L., Ma, Y., Wang, B., 2018. Modeling the impact of crop rotation with legume on nitrous oxide emissions from rain-fed agricultural systems in Australia under alternative future climate scenarios. Sci. Total Environ. 630, 1544–1552. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.322

Luo, Q., Bange, M., Devoil, P., 2016. Effects of a wheat rotation on cotton production in a changing climate: A simulation study. Clim. Res. 70, 29–38. https://doi.org/10.3354/cr01413

Luo, X.S., Muleta, D., Hu, Z., Tang, H., Zhao, Z., Shen, S., Lee, B.L., 2017. Inclusive development and agricultural adaptation to climate change. Curr. Opin. Environ. Sustain. 24, 78–83. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.02.004

Ma, X., Wu, S., Li, Y., Zhang, X., Gao, Q., Wu, Y., 2013. Rice re-cultivation in southern China: An option for enhanced climate change resilience in rice production. J. Geogr. Sci. 23, 67–84. https://doi.org/10.1007/s11442-013-0994-x

Mauser, W., Klepper, G., Zabel, F., Delzeit, R., Hank, T., Putzenlechner, B., Calzadilla, A., 2015. Global biomass production potentials exceed expected future demand without the need for cropland expansion. Nat. Commun. 6. https://doi.org/10.1038/ncomms9946

Meza, F.J., Silva, D., 2009. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. Clim. Change 94, 143–156. https://doi.org/10.1007/s10584-009-9544-z

Mijatović, D., Van Oudenhoven, F., Eyzaguirre, P., Hodgkin, T., 2013. The role of agricultural biodiversity in strengthening resilience to climate change: Towards an analytical framework. Int. J. Agric. Sustain. 11, 95–107. https://doi.org/10.1080/14735903.2012.691221

Mirschel, W., Wenkel, K.-O., Berg, M., Wieland, R., Nendel, C., Köstner, B., Topazh, A.G., Terleev, V. V., Badenko, V., 2016. A Spatial Model-Based Decision Support System for Evaluating Agricultural Landscapes Under the Aspect of Climate Change, in: Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia. pp. 519–540.

Mitter, H., Heumesser, C., Schmid, E., 2015. Spatial modeling of robust crop production portfolios to assess agricultural vulnerability and adaptation to climate change. Land use policy 46, 75–90. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.010

Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Guo, R., 2009. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. Agric. Ecosyst. Environ. 134, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.017

Murungweni, C., Van Wijk, M.T., Smaling, E.M.A., Giller, K.E., 2016. Climate-smart crop production in semi-arid areas through increased knowledge of varieties, environment and management factors. Nutr. Cycl. Agroecosystems 105, 183–197. https://doi.org/10.1007/s10705-015-9695-4

Mushtaq, S., White, N., Cockfield, G., Power, B., Jakeman, G., 2015. Reconfiguring agriculture through the relocation of production systems for water, environment and food security under climate change. J. Agric. Sci. 153, 779–797. https://doi.org/10.1017/S0021859614001117

Peltonen-Sainio, P., Palosuo, T., Ruosteenoja, K., Jauhiainen, L., Ojanen, H., 2018. Warming autumns at high latitudes of Europe: an opportunity to lose or gain in cereal production? Reg. Environ. Chang. 18, 1453–1465. https://doi.org/10.1007/s10113-017-1275-5

Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, S.M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B., Travasso, M.I., 2014. Food security and food production systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. The, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Cha.

Poulton, P.L., Dalgliesh, N.P., Vang, S., Roth, C.H., 2016. Resilience of Cambodian lowland rice farming systems to future climate uncertainty. F. Crop. Res. 198, 160–170. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.008

Pröbstl-Haider, U., Mostegl, N.M., Kelemen-Finan, J., Haider, W., Formayer, H., Kantelhardt, J., Moser, T., Kapfer, M., Trenholm, R., 2016. Farmers' Preferences for Future Agricultural Land Use Under the Consideration of Climate Change. Environ. Manage. 58, 446–464. https://doi.org/10.1007/s00267-016-0720-4

Purola, T., Lehtonen, H., Liu, X., Tao, F., Palosuo, T., 2018. Production of cereals in northern marginal areas: An integrated assessment of climate change impacts at the farm level. Agric. Syst. 162, 191–204. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.018

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R., 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. Eur. J. Agron. 32, 91–102. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.003

Roco, L., Bravo-Ureta, B., Engler, A., Jara-Rojas, R., 2017. The impact of climatic change adaptation on agricultural productivity in Central Chile: A stochastic production frontier approach. Sustain. 9. https://doi.org/10.3390/su9091648

Rojas-Downing, M.M., Herman, M.R., Harrigan, T., Nejadhashemi, A.P., Daneshvar, F., Zhang, Z., Abouali, M., Al Masraf, S.A.D., 2017. Pasture diversification to combat climate change impacts on grazing dairy production. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang. 23, 405–431. https://doi.org/10.1007/s11027-017-9740-5

Schönhart, M., Mitter, H., Schmid, E., Heinrich, G., Gobiet, A., 2014. Integrated Analysis of Climate Change Impacts and Adaptation Measures in Austrian Agriculture Integrierte Analyse von Klimawandelauswirkungen und. Ageconsearch.Umn.Edu 63, 156–176.

Smith, P., Olesen, J.E., 2010. Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. J. Agric. Sci. 148, 543–552. https://doi.org/10.1017/S0021859610000341

Souissi, I., Boisson, J.M., Mekki, I., Therond, O., Flichman, G., Wery, J., Belhouchette, H., 2017. Impact assessment of climate change on farming systems in the South Mediterranean area: a Tunisian case study. Reg. Environ. Chang. 18, 637–650. https://doi.org/10.1007/s10113-017-1130-8

Sugita, T., Okada, M., Nakashima, Y., Tian, T., Abe, I., 2018. A tryptophan prenyltransferase with broad substrate tolerance from bacillus subtilis subsp. Natto. ChemBioChem 19, 1396–1399. https://doi.org/10.1002/cbic.201800174

Tanaka, A., Takahashi, K., Masutomi, Y., Hanasaki, N., Hijioka, Y., Shiogama, H., Yamanaka, Y., 2015. Adaptation pathways of global wheat production: Importance of strategic adaptation to climate change. Sci. Rep. 5. https://doi.org/10.1038/srep14312

Thornton, P.K., Herrero, M., 2015. Adapting to climate change in the mixed crop and livestock farming systems in sub-Saharan Africa. Nat. Clim. Chang. 5, 830–836. https://doi.org/10.1038/nclimate2754

Tollefson, J., 2010. Intensive farming may ease climate change. Nature 465, 853–853. https://doi.org/10.1038/465853a

Trnka, M., Pearn, K., Maspons, J., Audsley, E., Sabaté, S., Sanchez, A., Balek, J., Sandars, D., 2014. Interactively modelling land profitability to estimate European agricultural and forest land use under future scenarios of climate, socio-economics and adaptation. Clim. Change 128, 215–227. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1164-6

Turner, B.L., Wuellner, M., Nichols, T., Gates, R., Tedeschi, L.O., Dunn, B.H., 2017. A systems approach to forecast agricultural land transformation and soil environmental risk from economic, policy, and cultural scenarios in the north central United States (2012–2062). Int. J. Agric. Sustain. 15, 102–123. https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1288029

Wang, S.W., Lee, W.K., Son, Y., 2017. An assessment of climate change impacts and adaptation in South Asian agriculture. Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag. 9, 517–534. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-05-2016-0069

Wassmann, R., Jagadish, S.V.K., Sumfleth, K., Pathak, H., Howell, G., Ismail, A., Serraj, R., Redona, E., Singh, R.K., Heuer, S., 2009. Chapter 3 Regional Vulnerability of Climate Change Impacts on Asian Rice Production and Scope for Adaptation, Advances in Agronomy. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)01003-7

White, J.W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A., Wall, G.W., 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. F. Crop. Res. 124, 357–368. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001

Yang, X. guang, Liu, Z. juan, Chen, F., 2011. The Possible Effect of Climate Warming on Northern Limits of Cropping System and Crop Yield in China. Agric. Sci. China 10, 585–594. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60040-0

Ye, Q., Yang, X.G., Liu, Z.J., Dai, S.W., Li, Y., Xie, W.J., Chen, F., 2014. The effects of climate change on the planting boundary and potential yield for different rice cropping systems in southern China. J. Integr. Agric. 13, 1546–1554. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60809-1

Zabel, F., Mauser, W., Hank, T., 2015. Impact of Climate Change on Global Agricultural Potentials. Procedia Environ. Sci. 29, 260–261. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.199

Zhu, B., Reich, P.B., Liu, L., Wang, Y., Classen, A.T., Zhang, F., Sanders, N.J., Wang, H., Mi, Z., Cao, G., Lin, L., Zhang, Z., He, J.-S., Zhao, X., Liu, H., 2018. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. Proc. Natl. Acad. Sci. 115, 4051–4056. https://doi.org/10.1073/pnas.1700299114

Chapitre 6. Évolution de la disponibilité en terres agricoles à l'horizon 2050

Auteurs : Annette Bérard, Antonio Bispo

6.1. Introduction – objectifs initiaux : quelle évolution des surfaces de terres agricoles disponibles et de leur qualité à l'horizon 2050 ?

Parmi les nombreux services écosystémiques fournis par les sols, l'un des plus importants pour la sécurité alimentaire à 2050 est de soutenir la production de biomasse agricole (MEA, 2005 ; Mc Bratney *et al.*, 2014 ; Bünemann *et al.*, 2018) par la mise à disposition de surfaces suffisantes possédant les qualités requises pour y développer l'agriculture, désignées dans ce chapitre comme « potentiellement cultivables ». Jusqu'à présent, peu d'études prospectives ont pris en compte l'évolution des quantités de surfaces agricoles (voire de leur qualité) en lien avec le changement climatique en 2050. Les impacts de ce changement étant différents selon les régions, il est pertinent d'appréhender ces évolutions de disponibilité des terres potentiellement cultivables à l'échelle régionale.

Ce chapitre a pour objectifs (1) de fournir une analyse critique des estimations existantes sur les effets du changement climatique sur la disponibilité en terres « potentiellement cultivables » et si possible sur la qualité des sols dans le Monde au niveau régional (régions continentales et Europe) et (2) de contribuer au volet de scénarisation et de modélisation de la présente étude, en apportant des éléments quantitatifs au modèle GlobAgri-AE2050 en ce qui concerne l'état actuel des surfaces potentiellement cultivables et leur évolution future à l'horizon 2050.

Après une description de la méthodologie de constitution du corpus bibliographique pour répondre à nos objectifs, ce chapitre présente l'état actuel des surfaces dédiées à l'agriculture. Puis, sur la base du travail bibliographique, nous y développons les hypothèses permettant d'estimer les surfaces actuelles de terres potentiellement cultivables et leur évolution à l'horizon 2050, afin de quantifier la contrainte de terres dans le modèle GlobAgri-AE2050. Compte tenu de la méthodologie disponible pour estimer ces surfaces, qui repose sur l'hypothèse selon laquelle seuls les effets directs des variables climatiques sur la croissance des plantes sont pris en compte, nous avons consacré une section particulière à la dégradation de la qualité des terres sous l'action du changement climatique, et à l'évolution des surfaces disponibles pour l'agriculture du fait des possibles changements futurs d'usages des terres en lien avec le changement climatique. Cette partie sur la dégradation des terres et les changements d'usages permettra de proposer des méthodologies pour prendre en compte des facteurs de variation supplémentaires dans l'estimation des surfaces maximales de terres potentiellement cultivables.

6.2. Constitution et analyse du corpus bibliographique

6.2.1. Requêtes initiales et tri

Différentes requêtes ont été réalisées en croisant des mots clés reliés au changement climatique (ex : climat*), à la dégradation des sols (ex : degrad*, damag*), aux surfaces et occupations agricoles (ex : area, cropland, grassland), et au sol (ex : soil*). La dernière requête (notée 3) est la plus large, et vise à collecter des références de type « revue de littérature », liées aux usages des sols, à l'échelle globale. Le détail des libellés ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 6-1).

Tableau 6-1. Détail des requêtes bibliographiques, nombre de références extraites et retenues (en rouge les éléments de la recherche qui diffèrent entre les requêtes)

Requête	Libellé des requêtes	# références collectées	# références retenues
Sol 1	TITLE: (climat* or "warming" or future or trend* or projecti* or forecast*) AND TITLE: ((("soil*" or "land*" or area*) AND (arable or cultivable or agricult*)) or ((pasture* or grassland* or cropland*) AND (soil* or area*))) AND TOPIC: (surface or availab* or expansion or resource* or scarcity or erosion or degrad* or deplet* or damag* or declin* or quality or fertility or threat or compaction or salinization or Sealing or sharing or "organic matter")	173	36 (10 communes avec 2)
Sol 2	TITLE: (climat* or "warming" or future or trend* or projecti* or forecast*) AND TITLE: (("soil*" or "land*" or area*) AND (arable or cultivable or agricult* or crop*)) or pasture* or grassland* or cropland* AND TITLE: ((surface or availab* or expansion or resource* or scarcity or erosion or degrad* or deplet* or damag* or declin* or quality or fertility or threat or compaction or salinization or Sealing or sharing or "organic matter"))	128	14 (10 communes avec 1)
Sol 3	TITLE: (world or global or review) AND TITLE: ("land use")	379	64
Total			**125**

Ces différentes références ont été triées manuellement sur la base des titres et des mots clés en recherchant des éléments sur : (i) le changement climatique, (ii) les surfaces pour l'agriculture et (iii) les effets du changement climatique sur les sols (ex : menaces /dégradation) et leurs usages. L'élimination de nombreuses références s'est faite sur les critères suivants :

- beaucoup concernaient davantage le domaine de l'« eau » que celui des « sols »,
- la plupart étaient géographiquement très ciblées (ex : sur un pays, une petite région) et concernaient des processus fins,
- certaines apportaient seulement des éléments sur le type d'agriculture ou les pratiques à mettre en place pour compenser les effets du changement climatique (pas de notion de surfaces).

Au final, très peu de références synthétiques portant sur des analyses à l'échelle mondiale ont été collectées par ces requêtes. **A l'issue de ces différents filtres, nous avons finalement retenu environ 125 références exploitables.**

6.2.2. Sélection des références et grille de lecture

Parmi ces 125 documents, poursuivant un objectif d'extraction des informations sur les surfaces agricoles potentielles à 2050, nous avons retenu 68 références pertinentes, sur la base des résumés, figures et tableaux[19]. Les informations suivantes ont retenu notre attention :

- données de surfaces agricoles actuelles
- données de surfaces agricoles impactées par les changements climatiques
- processus d'évolution de l'utilisation des terres face aux changements climatiques
- processus de dégradation des sols/pertes en Carbone
- processus de restauration des sols
- processus socio-économiques (urbanisation, autres usages des terres, régimes alimentaires) impactant les surfaces agricoles et leur évolution.

Nous avons alors élaboré une grille détaillée, donnant une vision globale et comparative de ces différents documents.

[19] Après lecture des résumés, figures et tableaux, nous avons approfondi notre sélection et avons éliminé les articles jugés non pertinents pour l'analyse, notamment des articles très méthodologiques sur les modèles d'utilisation des terres, des articles axés sur les échanges économiques, des articles axés sur un type de production/culture (exemple bioénergie) ou encore des articles ne couvrant qu'une région ou un pays particulier …

6.2.3. Premier diagnostic

Notre exploration bibliographique a abouti à une douzaine de références susceptibles d'instruire le volet quantitatif de l'expertise (données de surface). Elle nous a finalement permis d'extraire très peu de documents plus récents ou plus complets que ceux déjà largement utilisés dans les études précédentes. Les références retenues sont les suivantes : Balkovic *et al.*, 2018 ; Darwin *et al.*, 1995 ; Di Vittorio *et al.*, 2016 ; Fischer *et al.*, 2010 ; Juliá et Duchin, 2013 ; King *et al.*, 2018 ; Mori *et al.*, 2010 ; Ramankutty *et al.*, 2002 ; Schmitz *et al.*, 2014 ; Zabel *et al.*, 2014 ; Zhang et Cai, 2011. S'y ajoute le rapport de Roudart (2010) comparant les trois bases de données FAO, GAEZ et SAGE-GTAP.

De plus, sur les 68 références, nous n'avons pas repéré d'éléments quantitatifs (surfaces) abordant à l'échelle de notre expertise (Europe et Monde) les impacts directs des changements climatiques sur la qualité[20] des sols (dégradation). Cependant, un certain nombre des documents qui traitent de processus (Section 6.5) s'avèrent pertinents pour la suite de notre analyse sur la dégradation des sols ainsi que sur les changements d'usages des terres.

Suite à ce travail de requête, nous avons poursuivi une veille bibliographique, permettant de récupérer des publications très récentes (exemples : IPCC, 2019a ; FAO, 2018 ; IPBES, 2018 ; Oldfield *et al.*, 2019…) et/ou d'approfondir les processus de dégradation et de restauration des sols en lien avec les changements climatiques et les activités humaines.

6.3. État actuel des usages des terres, évolutions passées et potentialités

Avant de décrire l'état actuel ou potentiel de répartition des usages et des surfaces, il convient de proposer quelques définitions préliminaires.

6.3.1. Définitions

La FAO a proposé différentes définitions[21] pour les termes liés aux superficies et usages des terres qui sont reprises et/ou adaptées au contexte de nos travaux :

- Superficie des terres (émergées) : Superficie du pays à l'exclusion des eaux continentales, eaux côtières et eaux intérieures.

- Terres affectées aux **cultures permanentes :** Terres affectées à des cultures dites pérennes qui ne donnent pas lieu à replantation pendant plusieurs années (comme la vigne ou les arbres fruitiers) ; terres plantées d'arbres et d'arbustes produisant des fleurs (comme le rosier) ; et pépinières (à l'exception de celles où l'on cultive des plants d'arbres forestiers, qui doivent être classées sous « Terres forestières »).

- Terres en **prairies et pâturages temporaires** : Terres temporairement occupées par des cultures fourragères herbacées pour la fauche ou le pâturage. Une période d'assolement inférieure à cinq ans est utilisée pour différencier les prairies et pâturages temporaires *versus* permanents.

- Terres de **prairies et de pâturages permanents**[22] : Terres utilisées de façon permanente (cinq ans ou plus) pour les cultures fourragères herbacées, qu'il s'agisse d'herbages cultivées ou naturels (prairies ou pâturages à l'état sauvage). Les prairies et

[20] La qualité des sols est généralement définie par « la capacité d'un sol de fonctionner dans le cadre de son écosystème et dans les conditions de son usage, pour maintenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et promouvoir la santé des plantes et des animaux (dont les humains) » (Doran et Parkin, 1994). Cette définition rend compte de la complexité et de la multifonctionnalité des sols, ainsi que des nombreux liens entre les fonctions du sol et les services écosystémiques basés sur le sol (Büñemann *et al.*, 2018).

[21] http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/ess_test_folder/Definitions/Land_Use_Definitions_FAOSTAT_FR.xlsx
et http://www.fao.org/faostat/fr/#home

[22] Cette classe comprend :
- Le pacage dans les zones boisées (zones d'agroforesterie, par exemple);
- Le pacage dans les zones arbustives (lande, maquis, garrigue);
- Utilisation de la prairie des plaines ou zones montagneuses de faible altitude pour le pacage : terre traversée pendant la transhumance, au cours de laquelle les animaux passent une partie de l'année (une centaine de jours) sans rentrer le soir à la ferme : prairies de montagne et prairies subalpines et zones analogues ; et steppes et prairies sèches utilisées pour le pacage.

pâturages permanents où l'on fait pousser des arbres et des arbustes doivent être enregistrés sous cette rubrique uniquement si la culture des plantes fourragères est l'utilisation la plus importante des zones en question.

- Terres affectées aux **cultures temporaires** : Terres utilisées pour la culture de plantes dont le cycle de végétation est inférieur à un an et qui doivent être nouvellement semées ou plantées après la récolte (terres parfois cultivées plus d'une fois dans l'année).

- Terres en **jachère temporaire** : Terres qui ne sont pas ensemencées pendant une ou plusieurs saisons de croissance. La durée maximale de repos est généralement inférieure à cinq ans. Ces terres peuvent être ensemencées à seule fin de produire des engrais verts. Les terres laissées trop longtemps en jachère peuvent acquérir des caractéristiques justifiant leur reclassement, comme par exemple « Terres de prairies et de pâturages permanents » si elles servent pour la fauche ou le pâturage.

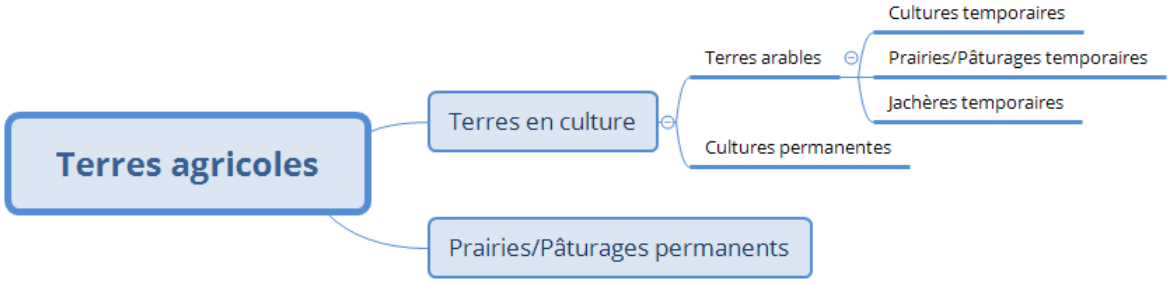
- Terres **arables** : regroupement des terres affectées aux cultures temporaires, aux prairies et pâturages temporaires, et aux jachères temporaires. Les terres arables ne comprennent pas les terres potentiellement cultivables mais qui ne sont normalement pas cultivées.

- Terres en **culture** : regroupement des terres arables et en cultures permanentes ; ceci correspondant à la dénomination **« surfaces cultivées »** utilisée dans GlobAgri-AE2050.

- Terres **agricoles** : Terres consacrées aux cultures et à l'élevage, intégrant l'ensemble des « terres en culture » et des « terres en prairies et pâturages permanents ».

Pour les terres agricoles, la Figure 6-1 présente les regroupements qui sont réalisés. Ainsi les terres agricoles supportent tous les usages relatifs à la production animale et végétale alors que les terres arables ne regroupent que les usages temporaires des terres (i.e. terres qui peuvent être labourées).

Figure 6-1. Regroupement des usages agricoles des terres



A ces définitions s'ajoutent les suivantes :

- **Sylviculture** : Terres utilisées à des fins de sylviculture, regroupant les terres forestières et les autres terres boisées.

- Terres **forestières**[23] : Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à cinq mètres et un couvert arboré de plus de 10 %, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*. Sont

[23] Notes explicatives sur les terres forestières :
- Les terres forestières sont déterminées à la fois par la présence d'arbres et par l'absence d'autres utilisations prédominantes des terres. Les arbres doivent être capables d'atteindre une hauteur minimale de cinq mètres in situ;
- Ces terres englobent les zones où poussent de jeunes arbres qui n'ont pas encore atteint mais devraient atteindre un couvert arboré de 10 % et une hauteur de cinq mètres. Elles englobent également les zones qui sont temporairement déboisées du fait de coupes rases effectuées dans le cadre de la gestion forestière ou résultant de catastrophes naturelles, et qui devraient se régénérer dans les cinq ans. La situation locale peut, dans des cas exceptionnels, justifier un plus long délai;
- Sont inclus les routes forestières, les coupe-feu et les autres petites clairières;
- Peuvent être incluses les terres forestières des parcs nationaux, des réserves naturelles et d'autres zones protégées, par exemple celles qui présentent un intérêt particulier sur les plans environnemental, scientifique, historique, culturel ou spirituel;
- Sont inclus les brise-vent, plantations-abris et corridors couvrant plus de 0,5 hectare et ayant une largeur supérieure à 20 mètres;
- Sont incluses les terres de culture itinérante abandonnées sur lesquelles se sont régénérés des arbres qui ont atteint ou devraient atteindre un couvert arboré de 10 % et une hauteur de cinq mètres;
- Sont incluses les zones de mangroves situées dans la zone intertidale, que ces zones soient classées comme zones de terres ou non;

exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante, et les terres qui sont principalement utilisées à des fins de maintien ou de restauration de leur fonction environnementale.

- **Autres terres boisées**[24] : Terres non classées comme terres forestières, occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à cinq mètres et un couvert arboré compris entre 5 et 10 %, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ* ; ou avec un couvert mixte d'arbustes, de buissons et d'arbres de plus de 10 %.

- **Autres terres**[25] : Toutes les autres terres non classées sous « Agriculture » et « Sylviculture ». Englobe par exemple les « Terres utilisées pour l'aquaculture », « Utilisation de zones bâties et connexes », « Terres utilisées pour la préservation et la restauration des fonctions environnementales », « Autres utilisations des terres non reprises ailleurs » et « Terres non utilisées ».

6.3.2. Quelles surfaces sont actuellement utilisées, pour quels usages et quelles sont les tendances d'évolution de ces surfaces ?

Il existe plusieurs bases de données sur les usages des terres à l'échelle mondiale. Elles reposent soit sur des informations statistiques (en général déclarées par les pays), soit sur l'analyse d'images satellitaires de la couverture ou de l'usage des terres, soit, de plus en plus, sur une combinaison des 2 approches. Ainsi, les études et bases de données régionales (comme Corine land cover[26] pour la France ou Eurostat (LUCAS)[27] pour l'Europe) s'intéressent à la couverture des terres (éléments biotiques ou abiotiques visibles, par exemple sur des images satellites tels que la végétation, les sols nus ou les infrastructures), d'autres aux usages qui sont faits des terres (c'est-à-dire aux activités réalisées sur ces terres par l'homme comme les pâtures, l'exploitation forestière). Si la couverture peut être observée par télédétection, l'usage nécessite des informations locales (Roudard, 2010). Cela peut avoir une importance lorsque qu'on cherche à comparer des résultats obtenus avec ces approches différentes.

Ainsi, parmi les bases les plus utilisées, les données statistiques de la FAO comme FAOSTAT[28] sont issues des déclarations des pays membres alors que les données de la plateforme Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) réalisée en collaboration avec la FAO combinent des déclarations et des images satellites (Roudard, 2010). D'autres bases de données existent comme celle proposée par Ramankutty *et al.* (2002), également largement utilisée, qui fournit la répartition spatiale terrestre des surfaces cultivées pour l'année 2000[29]. Ces données sont également issues de relevés statistiques nationaux et d'images satellites.

Les données FAOSTAT fournissent les superficies actuelles (jusqu'à l'année 2016 au moment de la réalisation de cette étude) et passées pour différents usages des terres (ex : terres agricoles, terres en cultures, terres arables). Ces données sont

---

- Sont incluses les zones de bambous et de palmiers s'il est satisfait aux critères d'utilisation des terres, de hauteur et de couvert arboré;
- Certains systèmes d'agroforesterie, tels que le système de taungya, qui consiste à intercaler des cultures uniquement pendant les premières années du repeuplement, doivent être classés comme forêt;
- Sont exclus les peuplements arborés dans les systèmes de production agricole, tels que les plantations d'arbres fruitier, les plantations de palmiers à huile, les hévéas et les arbres de Noël (Terres affectées aux cultures permanentes) et les systèmes d'agroforesterie dans lesquels les plantes sont cultivées sous couvert forestier (Terres de prairies et de pâturages permanents).

[24] Cette définition englobe deux options : (i) le couvert arboré est compris entre 5 et 10 %; et les arbres doivent avoir atteint une hauteur supérieure à cinq mètres ou être capables d'atteindre cinq mètres in situ; ou (ii) le couvert arboré est inférieur à 5 %, mais le couvert combiné des arbustes, buissons et arbres est supérieur à 10 %. Sont incluses les zones d'arbustes et de buissons dépourvues d'arbres.
Sont incluses :
- Les zones où les arbres n'atteindront pas une hauteur de cinq mètres in situ et où le couvert arboré est d'au moins 10 %, comme dans le cas de certains types d'arbres de l'étage alpin et des mangroves de zone aride;
- Les zones de bambous et de palmiers s'il est satisfait aux critères d'utilisation des terres, de hauteur et de couvert arboré.
Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante et les terres principalement utilisées aux fins de la réservation et de la restauration des fonctions environnementales.

[25] Cette catégorie englobe des terres de natures très diverses comme les surfaces urbanisées ou des zones protégées qui assurent à long terme la conservation de la nature ainsi que les services écosystémiques et les valeurs culturelles qui leur sont associés (Dudlet and Stolton, 2008)

[26] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/

[27] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/LUCAS_-_Land_use_and_land_cover_survey

[28] La base FAOSTAT comporte une rubrique de statistiques internationales sur les ressources en terres : http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL.

[29] http://www.earthstat.org/cropland-pasture-area-2000/

compilées et mises en cohérence par la FAO. Elles proviennent par exemple de sources statistiques nationales, internationales ou encore de réponses officielles à des questionnaires transmis à la FAO. La Figure 6-2 présente la progression des terres en culture dans le monde entre 1962 et 2016. Ces données montrent une progression constante de ces surfaces avec un gain d'environ 200 000 ha sur cette période. Récemment, la FAO a publié une analyse des différentes catégories de terres (Tableau 6-2).

Figure 6-2. Évolution des terres en culture dans le monde entre 1961 et 2016

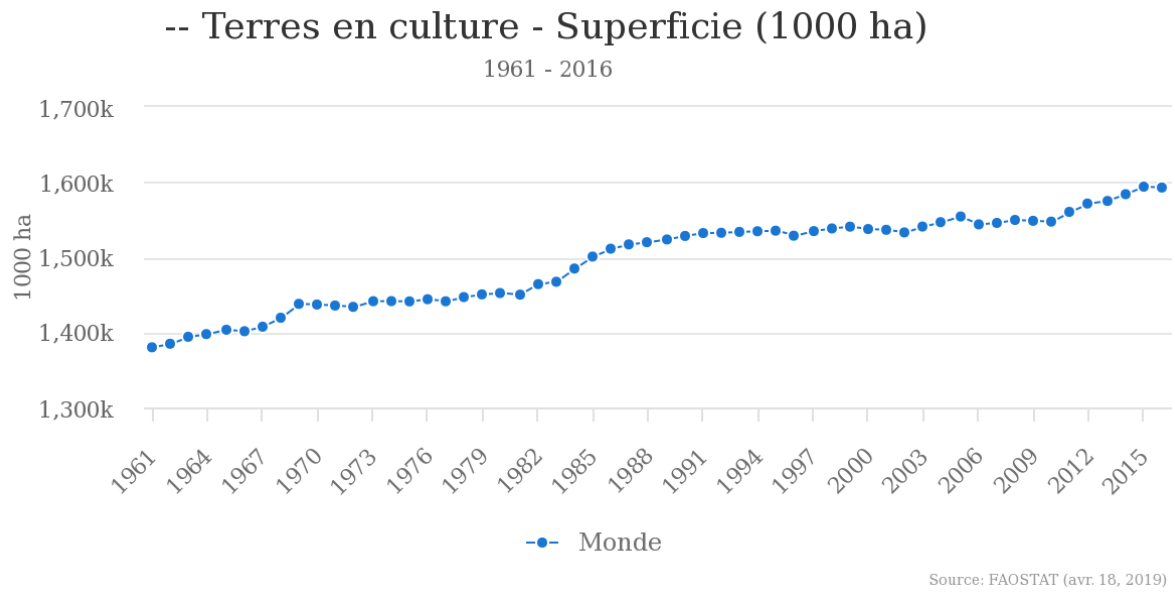


Tableau 6-2. Évolution entre 1901 et 2015 de la répartition des surfaces mondiales en fonction des usages

	1901	1961	2015	1901-1961	1962 - 2015
Usage des terres	Surfaces (en millions ha)			Variation de surfaces (en millions ha)	
Terres urbanisées	8	20	54	12	34
Terres forestières	4193	3878	3676	-315	-202
Terres agricoles	2475	4322	4808	1847	486
Dont terres en culture	829	1345	1557	516	212
Dont terres de prairies et pâturages permanents	1646	2977	3251	1331	274
Autres terres	6131	4587	4269	-1544	-323

Source : d'après FAO, 2018

A l'échelle mondiale, il apparait clairement que les surfaces dédiées aux terres agricoles (somme des surfaces en culture et des prairies/pâturages permanents) ont cru depuis plus de 100 ans (tout comme les surfaces urbaines). Ces accroissements se font au détriment des surfaces forestières et de la catégorie « autres terres » qui diminuent. Les surfaces urbaines sont les seules dont le rythme d'expansion s'accroit encore sur la seconde période considérée (34 millions d'ha de plus en 54 ans contre 12 millions sur la première période de 60 ans) : pour les terres agricoles, le rythme d'expansion est ralenti (486 millions d'ha de plus en 54 ans contre 1847 millions sur la première période de 60 ans).

D'un point de vue global, plus récemment il est estimé que les terres agricoles à l'échelle mondiale représentent de 40 % à plus de 60 % des terres immergées soit environ plus de 6400 millions d'ha. En fonction des études et des périmètres retenus (ex : intensité de pâturage), ces valeurs varient entre 4400 et plus de 8000 millions d'ha (dont 1500 à 2000 millions d'ha sont actuellement en culture) (IPCC, 2019a). Les surfaces forestières couvrent environ 30 % des terres émergées, valeur variable selon la définition donnée aux forêts, c'est-à-dire selon qu'on compte uniquement les forêts gérées/plantées ou bien si les forêts naturelles sont également intégrées. Pour beaucoup, les forêts non gérées sont intégrées dans la catégorie « autres terres » et comptées comme des zones protégées. Concernant les surfaces urbaines ou urbanisées selon la méthode,

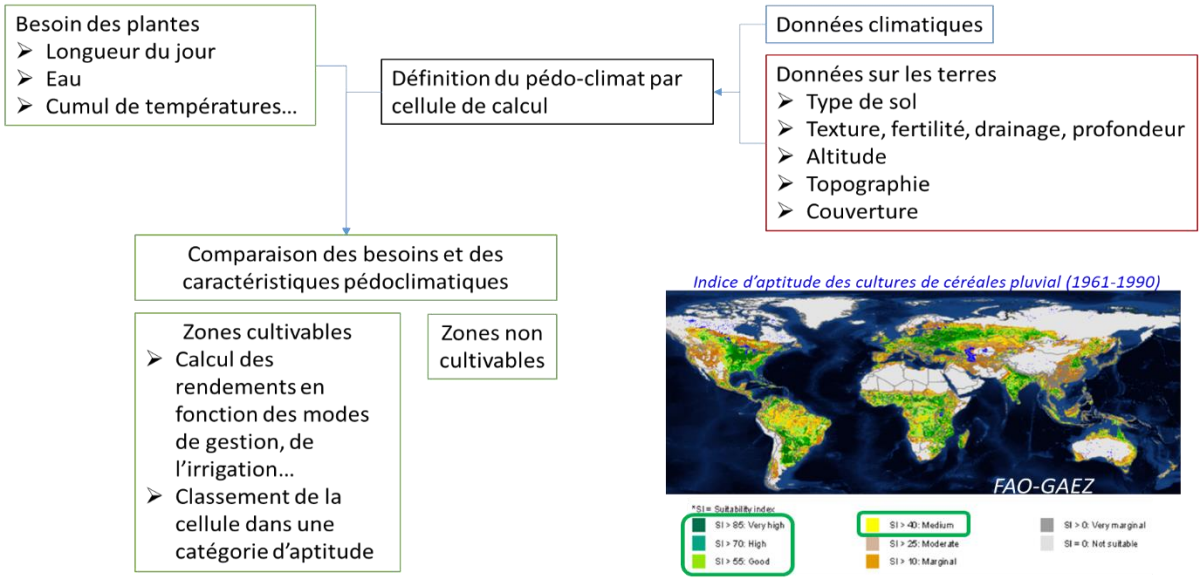
elles couvriraient actuellement autour de 1 % de la surface terrestre (hors eau et glace) représentant entre 50 à plus de 70 millions d'ha.

Parallèlement, les rapports récents de la FAO (2018) et de l'IPCC (2019a) soulignent qu'environ 20 à 30 % des surfaces des terres (soit environ 3500 millions d'ha) seraient soumises à des processus de dégradation, parmi lesquelles environ 500 millions d'ha de terres cultivées sont déjà modérément à fortement dégradées (voir Section 6.5).

6.3.3. Quelles surfaces sont potentiellement cultivables ?

Contrairement aux données FAOSTAT, le portail GAEZ ne fournit pas d'informations sur les usages agricoles actuels ou passés des terres mondiales, mais il renseigne sur leurs potentialités agricoles en fonction du climat (passé ou futur), de la qualité des terres et des besoins des cultures (Figure 6-3).

Figure 6-3. Principe d'estimation de l'évolution des zones cultivables dans le cadre de la plateforme GAEZ



Cette plateforme est le fruit d'une collaboration entre IIASA et la FAO, dans le cadre du projet Land Use Change[30] (Figure 6-4). Le potentiel agro-écologique des terres (aptitude à la culture) est évalué par le calcul d'un indice de « *Suitability* » (SI) qui correspond à un rendement agro-climatique potentiel obtenu par un modèle de culture contraint par des critères climatiques et des caractéristiques du sol (ex : pente, qualité du sol). Il est ainsi calculé pour 48 cultures différentes, 3 niveaux d'intrants et 4 modes d'alimentation en eau. Sont alors définies et spatialisées différentes classes d'aptitude des terres[31]. Ces terres sont dites « potentiellement cultivables » car l'évaluation ne tient pas compte de leur usage actuel (forêts, zones protégées, zones artificialisées, prairies permanentes) ni des coûts nécessaires pour les mettre en culture. Selon GAEZ, les surfaces « potentiellement cultivables » sont celles dont le SI est supérieur à 40, tandis que les surfaces dont le SI est inférieur à 40 sont qualifiées de terres marginales ou impropres à l'agriculture. Pour cette étude, nous avons donc retenu le critère GAEZ pour la définition des « terres cultivables ».

La Figure 6-4 compare les données FAO des terres agricoles cultivées en 2010 avec les estimations GAEZ des terres potentiellement cultivables (SI > 40) pour cette même année. Dans la majorité des cas, le potentiel de terres cultivables dépasse largement les surfaces cultivées en 2010. Selon les données GAEZ, 4,9 milliards d'hectares seraient classés comme potentiellement cultivables au niveau mondial. Comparées aux 1,54 milliards d'hectares de surfaces dites cultivées dans le

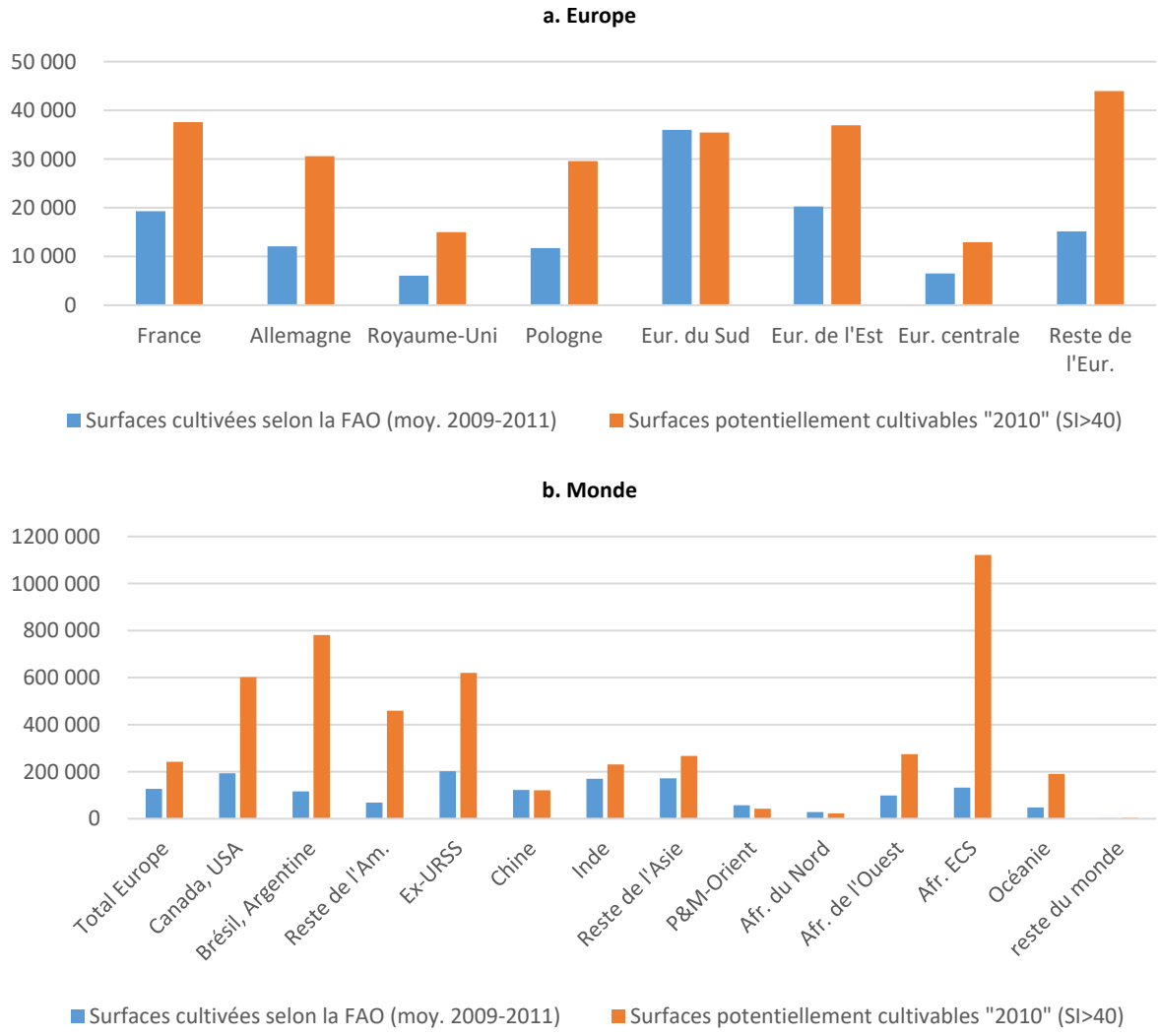
[30] http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/home.htm et http://gaez.fao.org/Main.html#

[31] Par la suite, les termes « terres/surfaces potentiellement cultivables » sont employés pour décrire ces surfaces dont l'indice SI est supérieur à 40.

monde en « 2010 », il y aurait donc une marge d'expansion d'environ 3,4 milliards d'hectares, répartis de manière hétérogène entre les différentes zones géographiques.

Les disponibilités en terres cultivables concernent au premier chef l'Afrique sub-saharienne (Afrique de l'Est, centrale et du Sud plus particulièrement), l'ensemble du continent américain et l'ex-URSS. L'Europe, le Reste de l'Asie et l'Inde disposent de moins de marge. La situation est différente selon la zone d'Europe concernée : la région « Reste de l'Europe » offre un potentiel de surfaces cultivables important tandis que l'Europe du Sud exploite actuellement davantage de terres que les seules terres à SI>40. Les surfaces actuellement cultivées dans les régions Afrique du Nord, Proche & Moyen-Orient et Chine sont également supérieures aux surfaces potentiellement cultivables selon GAEZ.

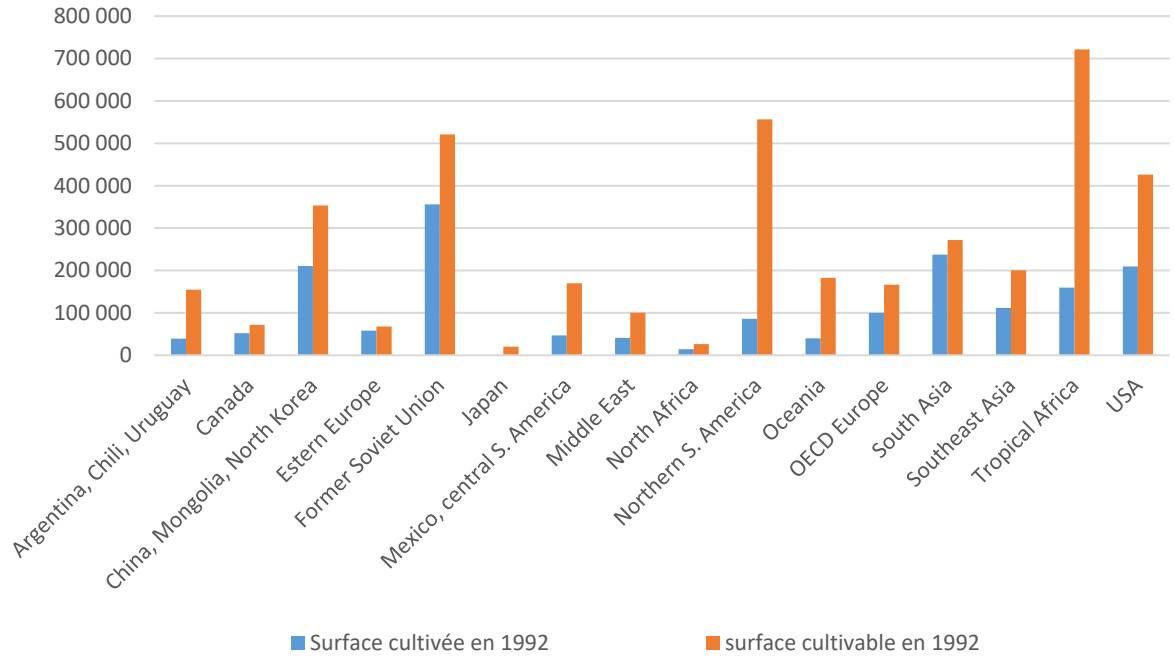
Figure 6-4. Comparaison des surfaces actuellement cultivées et potentiellement cultivables en « 2010 » (en 1000 ha) pour les 21 régions du mondes considérées dans l'étude AE2050 (a. Europe ; b. Monde)



Source : données FAO et GAEZ

La base de données développée par Ramankutty *et al.* (2002, 2008) est bâtie sur le même principe mais intègre des critères et des sources de données différentes. De la même manière, cette étude compare les surfaces cultivées et potentiellement cultivables en 1992 (Figure 6-5). La comparaison avec les estimations de GAEZ est difficile car ce ne sont pas les mêmes zones géographiques qui sont comparées. Néanmoins, les mêmes tendances que précédemment se dégagent : importante réserve de terres cultivables en Afrique, sur le continent américain, l'ex-URSS et faible potentiel de la Chine et du Moyen Orient. A noter cependant que ces auteurs estiment 1,7 milliard d'ha cultivés pour l'année 1992, contrairement aux 1,5 de fa FAO (en 2010), et que sous climat actuel, le potentiel est estimé à un peu plus de 4 milliard d'ha (4,9 selon GAEZ en 2010). En conséquence, la réserve de terre estimée par Ramankutty *et al.* (2002) est plus limitée soit 2,2 milliard d'ha.

Figure 6-5. Comparaison des surfaces de terres actuellement cultivées et potentiellement cultivables en « 1992 » (en 1000ha) dans différentes régions du monde



Source : Ramankutty *et al.* (2002)

Ces différentes bases, produites par des combinaisons de paramètres climatiques et pédologiques, en relation avec les besoins écologiques des cultures, permettent donc d'estimer un potentiel de surfaces cultivables, pour des horizons temporels et sous des hypothèses climatiques différents. Ce sont ces travaux que nous avons recherché et analysé : il s'agissait d'identifier, en fonction du changement climatique, les surfaces futures de terres potentiellement cultivables.

6.4. Évolution des terres potentiellement cultivables à l'horizon 2050

6.4.1. Comparaison des hypothèses retenues par les principales études dans la littérature

Les principaux travaux de la littérature comparant les évolutions de surfaces cultivables en lien avec les changements climatiques sont repris dans le Tableau 6-3 et comparés aux caractéristiques du portail GAEZ, afin d'en comparer les principales hypothèses de calcul. Il apparait clairement que les hypothèses sont assez différentes, notamment sur :

- L'aptitude des terres à la culture que certains expriment selon des catégories (ex : 7 catégories pour GAEZ) et d'autres par le calcul d'indices continus
- Les périodes de références : avant 1990 (depuis 1961), 1990 uniquement, des périodes plus récentes (jusqu'en 2010)
- Les horizons de référence (de 2020 à 2100 selon les travaux)
- Les scénarios climatiques qui en fonction des dates de publication sont plus ou moins anciens
- Le découpage géographique qui considère tous les pays du Monde ou bien les regroupe en quelques zones, plus ou moins étendues (de 6 grandes zones à 13 pour Zabel *et al.*, 2014)
- Le nombre de cultures considérées (jusqu'à 40 mais généralement beaucoup moins), leur régime hydrique (pluvial généralement) ou leur niveau de fertilisation (3 niveaux d'intrants minéraux)
- La prise en compte des forêts et/ou des espaces protégés (ce qui limite alors les surfaces disponibles)

Tableau 6-3. Caractéristiques du portail GAEZ et des études sur les évolutions des zones potentiellement cultivables en lien avec les changements climatiques

	Données du portail GAEZ (V3.0)	**Zabel *et al.*, 2014**	**Fischer *et al.*, 2010**	**Ramankutty *et al.*, 2002**	**Zhang et Cai, 2011**
Variable	Surfaces en Mkm² réparties en 7 catégories d'aptitude culturale	Surfaces en Mkm² réparties en 4 catégories de d'aptitude culturale	Surfaces en ha réparties en 4 catégories	Surfaces en Mkm² caractérisées par le calcul d'un « indice d'aptitude culturale » (indice continu entre 0-1, discrétisé en 10 classes)	Variations de surfaces cultivables en Km²
Caractérisation de l'aptitude des surfaces à l'agriculture	Détermination d'un indice d'aptitude par le croisement, pour chaque culture considérée, de son optimum de croissance avec les conditions climatiques (température, disponibilité en eau) et édaphiques (sol, pente…).	Modélisation en logique floue pour calculer l'aptitude de l'agriculture mondiale à cultiver les 16 principales cultures alimentaires et énergétiques en fonction des conditions climatiques, pédologiques et topographiques	Détermination d'un indice d'aptitude par le croisement, pour chaque culture considérée, de son optimum de croissance avec les conditions climatiques (température, disponibilité en eau) et édaphiques (sol, pente…).	Étude des relations existantes entre les terres cultivées, les indices climatiques et les indices des caractéristiques du sol (degré jour de croissance-5, rapport et P réelle/potentielle, Corg et pH du sol)	Modélisation en logique floue. L'aptitude à l'agriculture (Cai et al 2011) est caractérisée par 4 facteurs : propriétés du sol, pente du terrain, régime de température du sol et humidité. Les terres arables potentielles sont estimées comme étant la somme des terres convenables et des terres marginalement convenables.
Période de référence	1961-1990	1981-2010	1961-1990	1990	1961-1990
Horizon(s) considéré(s)	2020s, 2050s, 2080s	2071-2100	2050s	2100	2070-2099
Scénario(s) climatique(s) considéré(s)	SRES A1F1; A2; B1; B2	SRES A1B *	SRES A2	IS92a (scénario ancien du GIEC situé entre A2 et B2)	SRES A1B; B1 (avec un ensemble de modèles)
Découpage géographique	Pays	23	20	16	Africa – China – India – Europe - South America - U.S.A
Résolution	5 arc-minutes et 30 arc-seconds	30 arc-seconds	5 arc-minutes	30 arc-minutes	30 arc-secondes
Traitement des zones protégées	Incluses dans les surfaces et parfois soustraites	Incluses dans les surfaces	Soustraites des surfaces	Incluses dans les surfaces	Soustraites des surfaces arables
Propriétés du sol/CC	Inchangées	Inchangées	Inchangées	Inchangées	Inchangées
Effet CO_2	Avec ou sans	Sans	Sans	Avec	Sans
Cultures considérées	40	16	5 groupes de plantes considérés (céréales, racines et tubercules, légumineuses, sucrières et oléagineux)	Non précisé, tout type de plantes (fonction du climat et du sol)	Non précisé
Prise en compte de l'irrigation	Pluvial et Irrigué distincts	Surfaces irriguées constantes (données Aquastat FAO)	Pluvial uniquement	Pluvial uniquement	Pluvial uniquement
Niveau d'intrants de synthèse	High, mixed, low	Non précisé	Mixed and low	Non précisé	Non précisé
Stratégies d'adaptation de l'agriculture au CC	Non	Non	Non	Non	Non

Aucune étude ne considère l'effet du climat sur les sols. Ainsi, les paramètres du sol restent invariants, quel que soit le climat, alors même qu'il est connu que la hausse des températures ou bien la pluviométrie peuvent modifier la concentration en carbone ou bien la vitesse d'érosion des sols (voir Section 6.5. Dégradation et changement d'usage des sols).

Bien évidemment, toutes ces hypothèses jouent sur le calcul final des surfaces de terres potentiellement disponibles pour la culture : le climat local, la nature des sols, la possibilité d'irriguer, l'exclusion de zones protégées modifient considérablement les valeurs de ces surfaces. Cela rend très difficile la comparaison des surfaces entre les études ; aussi, il est plus pertinent de comparer les tendances d'évolution.

6.4.2. Évolution de la disponibilité des terres pour l'agriculture : éléments quantitatifs

La comparaison des travaux entre eux et avec les données GAEZ v3.0 est complexe d'une part par le fait que tous ne considèrent pas le même découpage géographique et d'autre part, ne se projettent pas sur le même horizon temporel (2050 pour GAEZ v3.0) contre 2070 à 2100 pour les autres. Néanmoins, le Tableau 6-4 récapitule et compare les tendances d'évolution (en %) des surfaces des terres potentiellement cultivables estimées selon les différents travaux cités précédemment[32], en comparaison avec l'année de référence, avec les données extraites du portail GAEZ (Global Agro-Ecological Zones)[33] pour cette étude.

Tableau 6-4. Évolution des surfaces : comparaison entre données extraites de GAEZ pour notre étude et autres travaux.

En vert tendances comparables, en rouge tendances inversées.

GAEZ v3.0		Zabel et al., 2014		Ramankutty *et al.*, 2002		Zhang et Cai, 2011*		
France	1%	France	0%					
Germany	0%	Germany	0%					
United Kingdom	1%	United Kingdom	1%					
South Europe	0%	Mediterranean	-11%					
Poland	0%	Rest of Europe	0%					
East Europe	0%							
Central Europe	11%							
Rest of Europe	36%	Benelux + Scandinavia	14%					
Total Europe	9%	**Total Europe**	-1%	**OECD Europe**	17%	**Europe**	-17%	-17%
Canada, USA	35%	Canada, USA	27%	Canada, USA	43%	USA	9%	4%
Brazil, Argentina	-9%	Latin America	0%	Mexico + North and South AM + Argentina	2%	South America	-21%	-9%
Rest of America	-5%							
Former Soviet Union	54%	Former Soviet Union	44%	Former Soviet Union	57%	Russia	52%	67%
China	14%	China	18%	Asia	13%	China	36%	25%
India	1%	India	0%			India	-4%	-3%
Rest of Asia	15%	Japan + South East Asia + Malaysia + Indonesia	0%					
Near and Middle East	-13%	Middle East	-20%	Middle East	2%			
North Africa	-51%	Africa	-1%	North Africa	-18%	Africa	-7%	-18%
West Africa	-4%			Tropical Africa	-2%			
ECS Africa	-3%							
Oceania	-13%	Australia + New Zealand	2%	Oceania	-7%			
GLOBAL	**11%**		**7%**		**17%**		**-1%**	**-2%**

* Dans cette étude, deux séries de simulations sont réalisées selon qu'on donne le même poids à tous les modèles climatiques utilisés (1ère colonne) ou bien qu'on distingue et pondère les modèles selon leurs performances (notamment à reproduire les évolutions passées) (2nde colonne)

[32] L'étude de Fisher *et al.* (2010) n'est pas reprise car elle se base sur les données GAEZ.

[33] Les surfaces de référence et projetées en 2050, sont extraites du portail GAEZ : ces surfaces potentiellement cultivables sont définies comme la totalité des surfaces auxquelles GAEZ (version 3.0) attribue un *Suitability Index* (SI) supérieur à 40. Le scénario climatique de référence retenu ici pour l'étude AE2050, est le RCP6.0. L'effet fertilisant du CO_2 est pris en compte. Ces surfaces projetées incluent des surfaces actuellement boisées. Ces surfaces sont présentées en fonction des zones géographiques du modèle GlobAgri-AE2050. Pour toutes les études, nous avons retenu ce que les auteurs considéraient comme surfaces les plus favorables à la culture.

Les études ci-dessus présentent des convergences concernant l'évolution des surfaces des terres potentiellement cultivables suite à l'augmentation des températures et à la modification des précipitations. Ainsi, les travaux convergent, en tendance au sujet d'une augmentation des surfaces de terres potentiellement cultivables dans les zones boréales (nord de l'Europe, ex-URSS, Amérique du Nord, Chine, reste de l'Asie) et au contraire d'une diminution dans plusieurs régions d'Afrique (Afrique du Sud, Afrique du Nord), d'Océanie (Australie et Nouvelle Zélande notamment), d'Amérique du Sud et d'Europe du Sud. Ces zones vont perdre des surfaces cultivables conséquentes, suite à l'augmentation des températures et surtout à la modification des précipitations.

Si les tendances peuvent être identiques (augmentation ou diminution), les amplitudes calculées peuvent diverger. Ainsi, par exemple pour l'Afrique du Nord, les pertes de terres potentiellement cultivables vont de -18 à -51 % selon les estimations. De même, les gains en surfaces pour la Chine varient de +14 % à +36 %.

Pour certaines zones et notamment l'Europe des variations importantes apparaissent en comparant les différentes études. Ainsi, les variations ne sont pas concordantes : le portail GAEZ prévoit une augmentation totale pour l'Europe de 9 %, Ramankutty *et al.* (2002) indiquent 17 %, et les autres études prévoient des évolutions négatives (jusque -17 %). Il est difficile d'expliquer ces différences car tous les travaux ne détaillent pas les pays européens, mais les différences semblent venir du bilan entre les surfaces gagnées sur les latitudes nord et celles perdues au sud de l'Europe. Les résultats de Zabel *et al.* (2014), détaillés par pays, convergent globalement avec l'extraction des données du portail GAEZ.

Concernant les gains de terres estimés pour les régions situées sur les latitudes Nord telles que « Canada, USA », « Chine » et « ex-Union Soviétique », on obtient jusqu'à plus de 630 millions d'ha selon l'extraction des données du portail GAEZ. Cette valeur est concordante avec Ramankutty *et al.* (2002) et Zabel *et al.* (2014) qui estiment une augmentation des surfaces entre 580 et 610 millions ha dans ces latitudes Nord. L'étude plus récente de King *et al.* (2018) axée uniquement sur les seules régions boréales (pas de comparaison mondiale), estime également un gain important, proche de 600 millions d'ha à horizon 2050 qui diminuerait avec une intensification du changement climatique (ex : sécheresses répétées et longues) à l'horizon 2100 vers 270 millions d'ha. Ainsi, ils suggèrent que ces valeurs estimées élevées de surfaces potentiellement cultivables doivent être tempérées par le fait que ces surfaces « gagnées » seront associées à de grandes variations intra annuelles des bilans hydriques (avec des sécheresses au printemps ou en été et des risques d'érosion hydrique l'hiver), que les cultures actuelles ne sont probablement pas adaptées aux profils de photopériode particuliers à ces régions, et enfin que les changements d'usage de ces sols risquent d'avoir des conséquences environnementales dont une dégradation de la qualité des sols pour l'agriculture (voir Encadré 6-1). Ces propos, concernant notamment les risques de sécheresse, sont confortés par d'autres analyses comme celle de Di Paola *et al.* (2018). Les rendements espérés sur ces nouvelles terres et leurs évolutions dans le temps doivent donc être modulés. Ainsi, ces surfaces devraient être considérées comme moins productives, contribuant donc de manière moins importante à la fourniture de produits agricoles.

Enfin, la dernière ligne du Tableau 6-4 montre l'évolution nette, à l'échelle mondiale, des surfaces totales « potentiellement cultivables ». Zabel *et al.* (2014), Fischer *et al.* (2010) et Ramankutty *et al.* (2002) estiment des valeurs positives (comprises entre 10 et 20 %), qui pourraient être dues au fait que dans leurs calculs les **forêts et zones protégées** ne sont pas exclues, alors que Zhang et Cai (2011) soustraient les surfaces protégées ainsi que les surfaces qui seront potentiellement urbanisées en 2070-2090. Cette dernière étude conclue alors à une faible diminution (1 à 2 % de moins) par rapport à la situation actuelle.

Par rapport aux jeux de données existants et identifiés, et compte tenu des objectifs poursuivis par cette étude, le portail GAEZ présente l'avantage de proposer des surfaces détaillées par pays et ce notamment pour l'Europe. Par ailleurs, ses estimations sont cohérentes avec celles proposées par d'autres auteurs.

Cependant, tous ces travaux qui ont anticipé quantitativement, aux échelles mondiale, régionale et nationale, les évolutions des surfaces potentiellement cultivables en lien avec le changement climatique (Zabel *et al.*, 2014 ; Fischer *et al.*, 2002 ; Ramankutty *et al.*, 2002 ; Fischer *et al.*, 2010 ; Mori *et al.*, 2010 ; Darwin *et al.*, 1995 ; Juliá et Duchin, 2013 ; portail GAEZ) reposent systématiquement sur l'hypothèse selon laquelle seules les variables dépendant directement du climat (température et humidité du sol) et agissant sur la croissance des plantes sont affectées par le changement climatique, et non pas les variables associées au sol. Ainsi, les caractéristiques actuelles des sols sont considérées invariables dans ces études, les sols ne sont pas considérés comme affectés par le climat. Par exemple, Ramankutty *et al.* (2002) citent explicitement ce point en suggérant que des améliorations (prenant en compte les effets du changement climatique sur les propriétés des

sols) seraient nécessaires[34]. Il manque donc dans les données extraites du portail GAEZ et dans celles des travaux publiés, des éléments quantitatifs sur les changements d'aptitudes des terres à la culture en lien avec (i) la dégradation de la qualité des sols (désertification, pertes de carbone, de biodiversité, salinisation, lessivage, pollutions …) (ii) l'amélioration de la qualité des sols (évolution des pratiques modifiant les propriétés biologiques et physico-chimiques des sols, permettant aux systèmes sol/plante de s'adapter au changement climatique), ainsi que (iii) sur les surfaces agricoles susceptibles d'être gagnées ou perdues selon l'évolution de la disponibilité en eau (de surface et/ou souterraine) pour l'irrigation.

Enfin, ces études n'informent pas non plus sur l'évolution des surfaces agricoles en lien avec (i) les pertes directes de surfaces de terre agricoles côtières submergées par l'élévation du niveau des mers, (ii) l'évolution des usages des terres (en particulier les infrastructures liées à l'urbanisation, la concurrence possible entre cultures et pâturages permanents pour les productions végétales et animales, l'utilisation des forêts et des zones protégées pour l'agriculture).

Afin d'analyser l'impact de ces manques sur les données collectées, une analyse plus qualitative de la littérature a été entreprise (voir Section 6.5.)

Encadré 6-1. Les changements d'usages des terres agricoles et des forêts : des impacts sur la qualité des sols, la biodiversité et le bilan carbone

De manière générale, la conversion des écosystèmes naturels (forêts mais aussi autres milieux naturels) en écosystèmes agricoles diminuerait le stock de carbone organique du sol de 30 % sur 50 ans à 50 % sur 100 ans dans les régions tempérées, et de 50 sur 20 ans à 75 % sur 50 ans sous les climats tropicaux (Lal, 2008). Selon les surfaces en 2050 projetées par GAEZ qui seraient susceptibles de changer de « suitability index », des changements d'usages des terres pourraient advenir, en particulier par déforestation et transformation de prairies permanentes en parcelles de cultures annuelles. Notons que l'étude d'Erb et al. (2016) sur la base d'analyses biophysiques, suggère qu'il serait possible de satisfaire l'approvisionnement alimentaire mondial en 2050 sans déforestation. Cependant les scénarios permettant d'éviter la déforestation sont basés sur des hypothèses fortes de changements des comportements alimentaires, de politiques agricoles, de recherche et innovations, etc. et les contraintes de pâturage limitent fortement le nombre de scénarios positifs.

La **déforestation** induit des dégradations importantes des sols, avec des pertes de diversité, et donc de fonctionnalité microbienne (Chaer *et al.,* 2009), des pertes de matières organiques (Ramankutty *et al.,* 2002), et des phénomènes d'érosion et de salinisation (par diminution de l'évapotranspiration, comme c'est actuellement le cas en Australie, suite aux incendies). Elle induit aussi des changements locaux de climat (sécheresses en zones tropicales), aggravant les tendances climatiques régionales (Falloon *et al.,* 2009). Ces phénomènes de dégradation sont variables selon les zones climatiques et pédoclimatiques mais existent aussi bien dans les **hautes latitudes** qu'en **zone tropicale où la déforestation est déjà très intense avec des dégâts écologiques, et des pertes de sol reconnus** (Chaer *et al.,* 2009 ; Kassa *et al.,* 2017). L'augmentation des surfaces potentiellement cultivables en zone boréale projetée à l'horizon 2050, s'accompagnerait aussi de campagnes de déforestation avec des risques de dégradation des sols et une diminution des services écosystémiques fournis par ces forêts (King *et al.,* 2018). Par ailleurs, ces **régions boréales ont un rôle important dans la séquestration du carbone** et leur déforestation pourrait alors remettre en question le bilan du carbone mondial.

De façon similaire, de nombreuses études indiquent que la **transformation des prairies permanentes en cultures annuelles** favorise la dégradation des sols et des terres. Par exemple, Hamidov *et al.* (2018) montrent, à partir d'une vingtaine d'études de cas européennes, que les options d'adaptation des pratiques agricoles aux changements futurs favorisant la conversion de prairies permanentes en prairies temporaires et/ou en cultures, induisaient systématiquement des pertes de matières organiques des sols. Par ailleurs, en **zone méditerranéenne** reconnue comme un « hotspot » de diversité au travers de ses systèmes extensifs agro-sylvio-pastoraux, la transformation de ces zones d'agriculture extensive en systèmes de monoculture intensive pourrait induire des pertes importantes de cette biodiversité souterraine et aérienne (Malek *et al.,* 2018). De plus, au-delà des effets directs sur la qualité des sols et des pertes de services écosystémiques, une transformation des prairies permanentes en cultures annuelles pourrait accroitre la concurrence possible avec la production animale : selon Fischer *et al.* (2010), en 2000, environ 55-60 % de la biomasse des pâturages permanents du monde servait de fourrage aux animaux.

[34] *"…the effects of climate change on soil properties need to be accounted for. We could incorporate additional soil properties such as soil nitrogen density and soil texture. The ratio of soil mineral content to soil organic matter could be used to evaluate the rate at which soil organic carbon might be oxidized upon being drained. A soil with a high percentage of clay mineral content will bind the organic matter to the mineral particles, lowering the oxidation rates."*

6.5. Autres facteurs réduisant les surfaces de terres disponibles pour l'agriculture

Comme exposé précédemment, plusieurs facteurs, ne sont pas pris en compte et conduisent très certainement à sur estimer les surfaces disponibles comme la dégradation des terres et des sols, la hausse du niveau des mers, l'urbanisation ou encore la progression des aires protégées.

6.5.1. La dégradation des terres

La dégradation des terres résulte d'un large éventail de processus et d'interactions physiques, chimiques, biologiques et humaines au travers de pressions exercées sur les différents composants (biotope, eau, sol) des écosystèmes qu'elles portent. Le rapport de IPCC (2019a) propose de définir la **dégradation des terres** comme une tendance négative de l'état des terres causée directement ou directement par l'homme, y compris le changement climatique qui s'exprime par la réduction à long terme ou la perte d'au moins une des composantes suivantes : productivité végétale, intégrité écologique ou valeur pour l'homme. La désertification est une forme particulière de dégradation des terres arides, semi-arides et sub-humides sèches dépendant de nombreux facteurs, dont les activités humaines et les variations climatiques (IPCC, 2019a).

Les causes de la dégradation des terres

L'IPCC (2019a) présente les principaux processus de dégradation des terres et leurs liens avec les changements climatiques (Tab. 6-5). Pour chaque processus, un "point focal" (sol, eau, biote) sur lequel la dégradation se produit en premier lieu est indiqué, en reconnaissant que la plupart des processus se propagent à d'autres composantes du sol et entrent en cascade ou interagissent avec certains des autres processus. L'impact du changement climatique sur chaque processus est catégorisé en fonction de la proximité (très directe = élevée, très indirecte = faible) et de la dominance (dominante = élevée, subordonnée aux autres pressions = faible) des effets. Les principaux effets du changement climatique sur chaque processus sont mis en évidence, ainsi que les pressions prédominantes exercées par d'autres facteurs. Les rétroactions des processus de dégradation des terres sur les changements climatiques sont classées en fonction de l'intensité (très intense = élevée, subtile = faible) des effets chimiques (émissions ou captage des gaz à effet de serre) ou physiques (échange d'énergie, émissions d'aérosols).

Tableau 6-5. Principaux processus de dégradation des terres et leurs liens avec les changements climatiques (IPCC, 2019a).

Processes	Focal point	Impacts of climate change				Feedbacks on climate change			
		Proximity	Dominance	Climate change pressures	Other pressures	Intensity of chemical effects	Intensity of physical effects	Global extent	Specific impacts
Wind erosion	Soil	high	medium	Altered wind/drought patterns (*high confidence* on effect, *medium-low confidence* on trend) (1). Indirect effect through vegetation type and biomass production shifts	Tillage, leaving low cover, overgrazing, deforestation/ vegetation clearing, large plot sizes, vegetation and fire regime shifts	low	medium	high	Radiative cooling by dust release (*medium confidence*). Ocean and land fertilisation and carbon burial (*medium confidence*). Albedo increase. Dust effect as condensation nuclei (19)
Water erosion	Soil	high	medium	Increasing rainfall intensity (*high confidence* on effect and trend) (2). Indirect effects on fire frequency/ intensity, permafrost thawing, biomass production	Tillage, cultivation leaving low cover, overgrazing, deforestation/ vegetation clearing, vegetation burning, poorly designed roads and paths	medium	medium	high	Net carbon release. Net release is probably less than site-specific loss due to deposition and burial (*high confidence*). Albedo increase (20)
Coastal erosion	Soil/water	high	high	Sea level rise, increasing intensity/ frequency of storm surges (*high confidence* on effects and trends) (3)	Retention of sediments by upstream dams, coastal aquiculture, elimination of mangrove forests, subsidence	high	low	low	Release of old buried carbon pools (*medium confidence*) (21)

Subsidence	Soil/water	low	low	Indirect through increasing drought leading to higher ground water use. Indirect through enhanced decomposition (e.g., through drainage) in organic soils	Groundwater depletion/ overpumping, peatland drainage	low/high	low	low	Unimportant in the case of groundwater depletion. Very high net carbon release in the case of drained peatlands
Compaction/ hardening	Soil	low	low	Indirect through reduced organic matter content	Land-use conversion, machinery overuse, intensive grazing, poor tillage/grazing management (e.g., under wet or waterlogged conditions)	low	low	medium	Contradictory effects of reduced aeration on N_2O emissions
Nutrient depletion	Soil	low	low	Indirect (e.g., shifts in cropland distribution, BECCS)	Insufficient replenishment of harvested nutrients	low	low	medium	Net carbon release due shrinking SOC pools. Larger reliance on soil liming with associated CO_2 releases
Acidification/ overfertilisa-tion	Soil	low	low	Indirect (e.g., shifts in cropland distribution, BECCS). Sulfidic wetland drying due to increased drought as special direct effect	High nitrogen fertilisation, high cation depletion, acid rain/deposition	medium	low	medium	N_2O release from overfertilised soils, increased by acidification. Inorganic carbon release from acidifying soils (*medium to high confidence*) (22)
Pollution	Soil/biota	low	low	Indirect (e.g., increased pest and weed incidence)	Intensifying chemical control of weed and pests	low	low	medium	Unknown, probably unimportant
Organic matter decline	Soil	high	medium	Warming accelerates soil respiration rates (*medium confidence* on effects and trends) (4). Indirect effects through changing quality of plant litter or fire/waterlogging regimes	Tillage. reduced plant input to soil. Drainage of waterlogged soils. Influenced by most of the other soil degradation processes.	high	low	high	Net carbon release (*high confidence*) (23)
Metal toxicity	Soil	low	low	Indirect	High cation depletion, fertilisation, mining activities	low	low	low	Unknown, probably unimportant
Salinisation	Soil / water	high	low	Sea level rise (*high confidence* on effects and trends) (5). Water balance shifts (*medium confidence* on effects and trends) (6). Indirect effects through irrigation expansion	Irrigation without good drainage infrastructure. Deforestation and water table-level rises under dryland agriculture	low	medium	medium	Reduced methane emissions with high sulfate load. Albedo increase
Sodification (increased sodium and associated physical degradation in soils)	Soil / water	high	low	Water balance shifts (*medium confidence* on effects and trends) (7). Indirect effects through irrigation expansion	Poor water management	low	medium	low	Net carbon release due to soil structure and organic matter dispersion. Albedo increase
Permafrost thawing	Soil / water	high	high	Warming (*very high confidence* on effects and trends) (8), seasonality shifts and accelerated snow melt leading to higher erosivity.		high	low	high	Net carbon release. CH_4 release (*high confidence*) (24)
Waterlogging of dry systems	Water	high	medium	Water balance shifts (*medium confidence* on effects and trends) (9). Indirect effects through vegetation shifts	Deforestation. Irrigation without good drainage infrastructure	medium	medium	low	CH_4 release. Albedo decrease
Drying of continental waters/ wetland/ lowlands	Water	high	medium	Increasing extent and duration of drought (*high confidence* on effects, *medium confidence* on trends) (10). Indirect effects through vegetation shifts	Upstream surface and groundwater consumption. Intentional drainage. Trampling/overgrazing	medium	medium	medium	Net carbon release. N_2O release. Albedo increase
Flooding	Water	high	medium	Sea level rise, increasing intensity/ frequency of storm surges, increasing rainfall intensity causing flash floods (*high confidence* on effects and trends) (11)	Land clearing. Increasing impervious surface. Transport infrastructure	medium	medium	low	CH_4 and N_2O release. Albedo decrease
Eutrophica-tion of continental waters	Water / biota	low	low	Indirect through warming effects on nitrogen losses from the land or climate change effects on erosion rates. Interactive effects of warming and nutrient loads on algal blooms	Excess fertilisation. Erosion. Poor management of livestock/ human sewage	medium	low	low	CH_4 and N_20 release

Woody encroachment	Biota	high	medium	Rainfall shifts (*medium confidence* on effects and trends), CO_2 rise (*medium confidence* on effects, *very high confidence* on trends) (12)	Overgrazing. Altered fire regimes, fire suppression. Invasive alien species	high	high	high	Net carbon storage. Albedo decrease
Species loss, compositional shifts	Biota	high	medium	Habitat loss as a result of climate shifts (*medium confidence* on effects and trends) (13)	Selective grazing and logging causing plant species loss, Pesticides causing soil microbial and soil faunal losses, large animal extinctions, interruption of disturbance regimes	low	low	medium	Unknown
Soil microbial and mesofaunal shifts	Biota	high	low	Habitat loss as a result of climate shifts (*medium confidence* on effects and trends) (14)	Altered fire regimes, nitrogen deposition, pesticide pollution, vegetation shifts, disturbance regime shifts	low	low	medium	Unknown
Biological soil crust destruction	Biota / soil	high	medium	Warming. Changing rainfall regimes. (*medium confidence* on effects, high confidence and trends). Indirect through fire regime shifts and/or invasions (15)	Overgrazing and trampling. Land-use conversion	low	high	high	Radiative cooling through albedo rise and dust release (*high confidence*) (25)
Invasions	Biota	high	medium	Habitat gain as a result of climate shifts (*medium confidence* on effects and trends) (16)	Intentional and unintentional species introductions	low	low	medium	Unknown
Pest outbreaks	Biota	high	medium	Habitat gain and accelerated reproduction as a result of climate shifts (*medium confidence* on effects and trends) (17)	Large-scale monocultures. Poor pest management practices	medium	low	medium	Net carbon release
Increased burning	Soil/biota	high	high	Warming, drought, shifting precipitation regimes, also wet spells rising fuel load (*high confidence* on effects and trends) (18)	Fire suppression policies increasing wildfire intensity. Increasing use of fire for rangeland management. Agriculture introducing fires in humid climates without previous fire history. Invasions	high	medium	medium	Net carbon release. CO, CH_4, N_2O release. Albedo increase (*high confidence*). Long-term decline of NPP in non-adapted ecosystems (26)

Estimation des surfaces de terres dégradées

Les approches visant à estimer la dégradation des terres sont variées (Tableau 6-6) et donnent des visions hétérogènes de l'état actuel de dégradation des terres (Gibbs et Salmon, 2015 ; Tableau 6-7). Parmi ces approches, les plus anciennes sont basées sur des opinions d'experts (exemple : Oldeman *et al.*, 1991, projet GLASOD[35]). Pour pallier les biais subjectifs de l'expertise à dires d'experts, les approches globales de la dégradation des terres sont réalisées à l'aide des outils de télédétection de la végétation. Elles permettent de disposer d'une couverture globale, de résolutions spatiales de quelques mètres et de mesures répétées pour suivre les évolutions temporelles.

Utilisant ces méthodes de télédétection[36], Bai *et al.* (2008) (projet LADA) proposent par pays les surfaces dégradées par l'anthropisation entre 1981 et 2003. D'après ces auteurs, **les régions actuellement les plus affectées par la dégradation anthropique des terres seraient l'Afrique au sud de l'équateur, l'Inde, la Birmanie, la Malaisie et l'Indonésie, le sud de la Chine, le centre Nord de l'Australie, la Pampa en Amérique Latine et les zones de la ceinture forestière de haute latitude en Amérique du Nord et en Sibérie.** Pour des exemples **en Europe,** entre 1981 et 2003, on peut citer la France, l'Allemagne, le Royaume Uni, l'Italie, le **Portugal et l'Espagne** qui auraient vu se dégrader de 8 à 13 % de leurs surfaces, tandis que **la Russie, la Suède et la Norvège auraient subi une dégradation de 16 à 18% de leurs surfaces.**

[35] Ces données sont disponibles au niveau régional et par pays sur le site FAO-stat : http://www.fao.org/faostat/fr/#data/ES

[36] Bai et al. (2008) estiment un indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en comparant la réflectance sur le rouge (R) et le proche infra-rouge (PIR) qui informe non seulement sur la quantité de la végétation mais aussi sur son état physiologique (NDVI=(PIR-R)/PIR+R)). Pour interpréter les tendances de NDVI en termes de dégradation ou d'amélioration anthropique des surfaces de couverts, les auteurs éliminent les changements de NDVI associés au changement d'affectation des sols et à la sécheresse. Ainsi, les zones urbaines et les zones où la corrélation entre le volume des précipitations et le NDVI est positive et où l'indice d'efficience de l'utilisation des pluies (RUE) est positif sont masquées de leur cartographie. Le *et al.* (2016) vont plus loin en tentant d'éliminer les biais dus à la fertilisation atmosphérique et anthropique, et donnent des informations cartographiques sur des points chauds de dégradation anthropique.

Tableau 6-6. Avantages et limites des principales approches utilisées pour cartographier et quantifier les terres dégradées

Approach	Benefits	Limitations
Expert opinion: Oldeman *et al.*, 1991 (GLASOD)* - Dregne et Chou, 1992 - Bot *et al.*, 2000 (FAO TerraSTAT)*	• Captures degradation in the past • Measures actual and potential degradation • Can consider both soil and vegetation degradation	• Not globally consistent • Subjective and qualitative • Actual and potential degradation sometimes combined • The state and process of degradation often combined
Satellite-derived net primary productivity: Bai *et al.*, 2008 (GLADA)*	• Globally consistent • Qualitative • Readily repeatable • Measures actual rather than • potential changes	• Neglects soil degradation • Only captures the process of degradation occuring following 1980, rather than complete status of land • Can be confounded by other biophysical conditions
Biophysical models: Cai *et al.*, 2011	• Globally consistent • Quantitative	• Limited to current croplands • Does not include vegetation degradation • Measures potential, rather than actual degradation
Abandoned cropland: Field *et al.*, 2008 - Campbell *et al.*, 2008	• Globally consistent • Quantitative • Captures changes 1700 onward • Measures actual rather than • potential changes	• Neglects land and soil degradation outside of abandonment • Includes lands not necessarily degraded

*Entre parenthèses : les projets associés

Source : Gibbs et Salmon, 2015

Tableau 6-7. Estimations de la dégradation actuelle des terres (millions d'hectares) selon différentes approches et études

Zone	Oldeman *et al.*, 1991 (GLASOD)[1]	Bai *et al.*, 2008 (GLADA)	Cai *et al.* (2011)	Campbell *et al.* (2008)
Afrique	321	660	132	69
Asie	453	912	490	118
Australie et Pacifique	6	236	13	74
Europe	158	65	104	60
Amérique du Nord et Centrale	140	469	96	79
Amérique du Sud	139	398	156	69
Monde (total)	1216	2740	991	470

Source : d'après Gibbs et Salmon, 2015

Cependant, ces approches de télédétection, basées sur les données satellitaires, ne sont disponibles que depuis les années 1980, et offrent peu de recul pour étudier l'évolution de la dégradation des terres, avec la question fondamentale qui est l'absence d'une référence non dégradée. Une autre limitation de ces approches est qu'elles ne prennent pas encore en compte les changements de végétation comme des pertes de diversité avérées (Winkler *et al.*, 2019[37]) malgré une augmentation de biomasse observée par satellite (exemple au Sénégal : Herrmann et Tappan, 2013). En effet, une augmentation globale de la biomasse peut être liée à une perte de diversité végétale, elle-même liée à une dégradation des terres.

De plus, ces approches présentent divers biais ou facteurs confondants liés à la technique (e.g. couverture nuageuse), aux objets mesurés (e.g. variations saisonnières de la phénologie) et aux effets externes sur la production (e.g. fertilisation atmosphérique, zones de cultures fertilisées intensivement) (Le *et al.*, 2016). Ainsi, elles ne rendent pas directement compte

[37] Winkler *et al.* (2019) ont montré expérimentalement dans le désert du plateau du Colorado qu'un stress hydrique (-réduction de 35% de précipitations annuelles) sur 8 années consécutives induisait un changement de communautés végétales : les espèces de graminées vivaces indigènes étaient remplacées par des arbustes et des annuelles envahissantes témoignant d'une dégradation des terres avec pourtant une accroissance de la biomasse.

de la dégradation des sols. Par exemple, les zones agricoles à forts intrants et ne présentant pas d'augmentation de productivité de la biomasse végétale, pourraient être considérées comme dégradées. D'après Le *et al.* (2016) ces zones représentent 7 millions de km², soit 4,8 % de la superficie totale des terres : ces points chauds de dégradation potentielle des terres en lien avec les apports d'engrais chimiques se situent en Asie, en Europe et dans certaines zones d'Amérique du Nord, Centrale et du Sud, dans les régions d'agriculture intensive[38]. La dégradation des terres est donc un problème majeur en zones cultivées, mais l'est aussi dans les zones utilisées par les communautés pastorales (pâturages, prairies, zones arbustives, zones à végétation clairsemée, etc). De ce point de vue, le tableau proposé par Le *et al.* (2016) a l'intérêt de présenter les pourcentages de terres dégradées selon les types d'agroécosystèmes (Tableau 6-8).

Tableau 6-8. Part des zones dégradées pour chaque type de couverture terrestre par régions continentales et dans le monde (unité : % de la superficie totale d'un type de couverture terrestre dans la région continentale)

Regions continentals	Crop land (%)	Mosaic vegetation -crop (%)	Forested land (%)	Mosaic forest-shrub/grass (%)	Shrub land (%)	Grass land (%)	Sparse vegetation (%)
Asia	30	31	30	36	33	24	43
Europe	19	21	21	20	6	17	17
North Africa and Near East	45	42	30	36	39	52	18
Sub-Saharan Africa	12	26	26	26	28	40	29
Latin America and Caribbean	25	16	10	29	29	24	34
North America and Australasia	17	16	32	36	27	40	22
World	25	25	23	29	25	33	23

D'après Le et al. (2016).

Concernant **la désertification,** forme particulière de dégradation, elle représenterait plus de 45 % de l'ensemble des surfaces mondiales (déserts compris, les terres semi-arides et sub-humides sèches en représentent près de 30 % ; IPCC, 2019a) et se situent principalement en Afrique et en Asie. **En Europe** ces terres couvrent 33,8 % des surfaces des pays du nord de la méditerranée (Zdruli et Lamaddalena, 2015). L'utilisation de ces terres est majoritairement dédiée aux prairies, puis aux forêts et aux cultures. Ces régions présentent des particularités en lien avec la dégradation des terres : le changement climatique va probablement exacerber la vulnérabilité de ces terres à la désertification au travers de l'augmentation de l'évaporation potentielle et de la sécheresse, induisant une baisse de l'indice d'aridité (donc une augmentation de l'aridité)[39] (Zhao et Dai, 2015), mais aussi au travers des événements extrêmes (sécheresse, canicule) qui vont augmenter à la fois en intensité, en fréquence et en durée (Reyer *et al.*, 2013) (« high confidence », IPCC, 2019a). Ces terres sont généralement fortement peuplées et les interactions entre facteurs humains et climatiques sont particulièrement impliquées dans les processus conduisant à la désertification (Serdeczny *et al.*, 2017 ; Zdruli et Lamaddalena, 2015). D'après Cherlet *et al.* (2018) (Atlas Mondial de la désertification), la comparaison des périodes 1951-1980 et 1981-2010, montre **un accroissement de l'aridité dans les régions des hautes latitudes de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord, de la Chine du Nord, de l'Afrique, de l'Australie de l'Est, de l'Inde et dans certaines régions d'Amérique du Sud et de l'Europe du Sud**. Ceci donne globalement une augmentation des zones arides mondiales (sous-types semi-arides principalement) de 0,35 %. Plus précisément en Europe, les zones les plus sensibles à la désertification se situent dans le **sud du Portugal, dans une grande partie de l'Espagne, en Sicile, dans le sud-est de la Grèce, à Chypre et dans les zones bordant la mer Noire en Bulgarie et en Roumanie** (European Court of Auditors, 2018).

[38] De manière générale : Le *et al.* (2016) ont signalé qu'environ 29% de la superficie terrestre mondiale contenait des points chauds de dégradation des terres

[39] L'indice d'aridité correspond au rapport entre la quantité de précipitations et l'évapotranspiration potentielle ; plus il est faible, plus la zone est considérée comme aride.

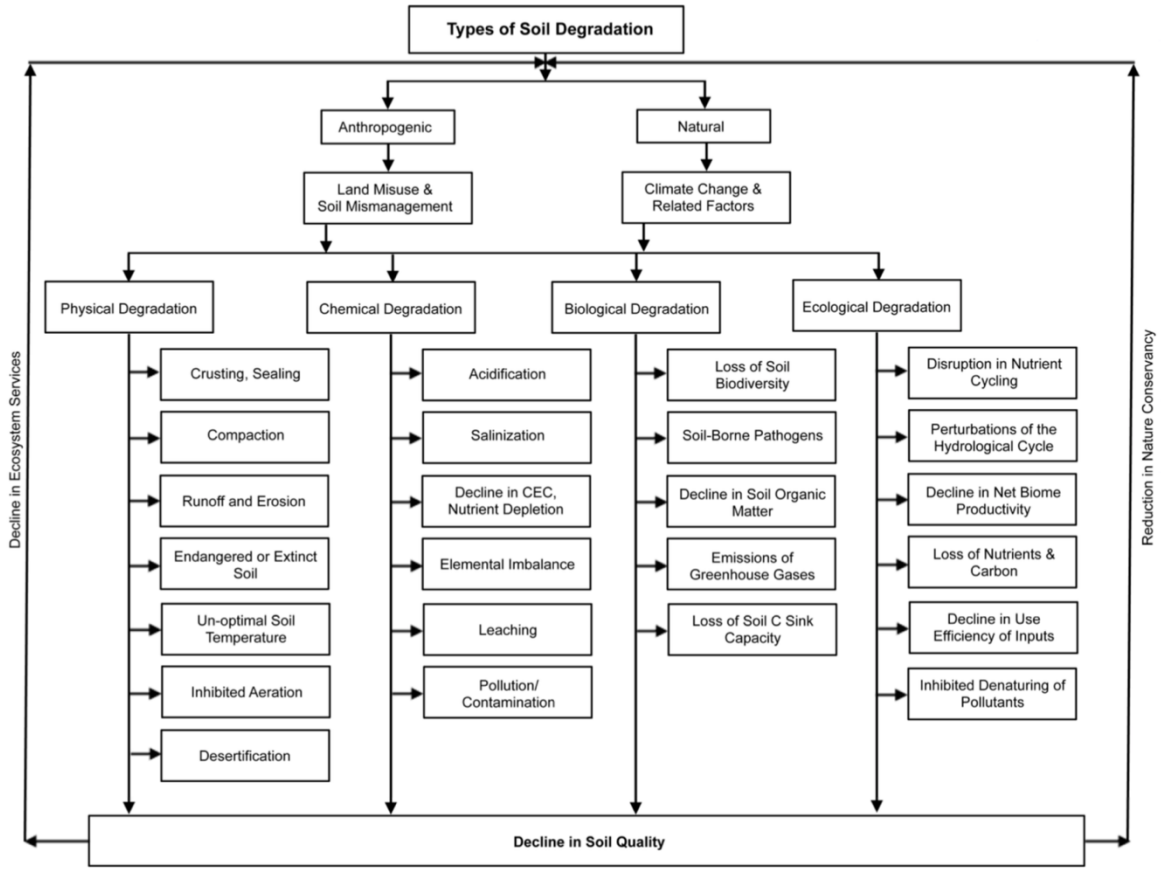
Quelles valeurs retenir ?

Il est difficile d'avoir des estimations détaillées des surfaces de terres dégradées, bien que cette question soit reconnue comme cruciale, notamment pour la sécurité alimentaire (IPCC, 2019a). A l'échelle mondiale, Lambin et Meyfroidt (2011) proposent une estimation de la perte des terres agricoles due à la dégradation qui serait de l'ordre de 1 à 2,9 Mha/an. Ces valeurs ont été sélectionnées de la littérature sur la base d'un jugement d'experts (à la fois sur des données de surfaces agricoles et de pertes de rendement dues aux dégradations des terres), et leur réalité a été vérifiée sur des observations de 2000-2010 ; elles sont actuellement reprises par la FAO (2018). Cependant, les auteurs précisent que ces données restent très incertaines.

6.5.2. La dégradation des sols : une étape de la dégradation des terres

Comme l'illustre le tableau 5, la **dégradation des sols**, reconnue comme une "pandémie mondiale" (Gomiero, 2016), contribue fortement à la dégradation des terres en influençant leur productivité. La FAO (2015) définit la dégradation des sols comme « la réduction ou l'élimination/la perte des fonctions des sols et de leur aptitude à soutenir des services écosystémiques qui sont essentiels au bien-être des populations ». C'est donc une grandeur difficile à cerner car d'une part elle peut se définir par rapport (i) à des besoins/bénéfices humains variés (services écosystémiques), (ii) au fonctionnement intrinsèque des écosystèmes, (iii) à des déterminants pédologiques (physiques, chimiques et biologiques, interagissant entre eux) ou encore (iv) à des processus multiples (naturels, anthropiques et climatiques) (Figure 6-6 d'après Lal, 2015).

Figure 6-6. Représentation des types et causes de dégradation des sols d'après Lal (2015)



Les causes de la dégradation des sols

Parmi les processus de dégradation des sols, ceux qui sont le plus directement influencés par les pressions du changement climatique sont l'érosion (éolienne et hydrique), mais aussi la salinisation, la sodification, l'engorgement des écosystèmes

secs, l'assèchement des sols humides, le dégel du pergélisol et les pertes de matière organique du sol (Schuur *et al.*, 2008 ; Lal, 2015 ; Rojas *et al.*, 2019 ; IPCC, 2019a). Notons que beaucoup de ces processus de dégradation sont fortement influencés et parfois aggravés par les pratiques agricoles inadéquates (exemples : érosion et travail du sol/couvert végétal ; perte de matière organique et travail du sol/réduction des intrants de résidus de culture/..) et que le changement climatique devient un facteur supplémentaire d'exacerbation de ces processus (exemple : en Égypte, près d'un million d'ha sont devenus salins suite à des pratiques d'irrigation inadaptées ; Zdruli et Lamaddalena, 2015). En plus des effets directs sur la production végétale, ces processus de dégradation peuvent avoir d'autres conséquences indirectes. Ainsi, par exemple au travers de la poussière déposée, l'érosion peut modifier l'albédo de la couverture neigeuse en montagne et, ainsi réduire les approvisionnements en eau (Duniway *et al.*, 2019).

La matière organique des sols, un indicateur de la qualité

La quantité et la composition en MO des sols ont un rôle fondamental sur la qualité des sols pour l'agriculture (Cong *et al.* 2014). Une récente méta-analyse de Oldfield *et al.* (2019) sur les cultures de blé et maïs montre par exemple des liens positifs entre les quantités de C organique dans les sols et les rendements en interaction avec la disponibilité des ressources azotées.

Ainsi, la **perte en matières organiques (MO)** (Carbone organique) des sols agricoles est vue comme un bon indicateur de leur dégradation (Gomiero, 2016), puisqu'elle influence et est influencée par de nombreux paramètres des sols, qu'ils soient physicochimiques (rétention en eau, structure et porosité du sol et stabilité des agrégats, cycles géochimiques, hydrologie…) ou biologiques (biomasses, diversités et activités biologiques, dont les microorganismes, Crouzet *et al.*, 2019), et par d'autres processus impliqués dans la dégradation des sols (érosions, compaction, contamination, perte de biodiversité…) (Cong *et al.*, 2014 ; Le Bissonnais, 1996). Le Tableau 6-9, adapté de Lorenz et Lal (2016), présente des éléments quantitatifs sur l'influence des pertes en MO sur des indicateurs de dégradation des sols (ainsi, par exemple, une baisse de 1 % de la matière organique entraine une baisse de ma stabilité des sols de 10 à 40 %).

Tableau 6-9. Effets d'une diminution de la teneur en matière organique (MO) du sol sur les indicateurs de dégradation.

Propriété du sol / dégradation	Influence de la baisse en MO	Changement de propriété/dégradation
Stabilité des agrégats	1%	Baisse de 10-40%
Perte de sol par érosion hydrique	De 4% à 2%	Augmentation de 50%
Perte de sol par érosion éolienne	De 5% à 1%	Augmentation de 55 à 65%
Indice de friabilité	1%	Perte de 0,3 unités
(Macro) porosité	1%	Baisse de 1 à 2%
Rétention d'eau	De 7% à 3%	Jusqu'à 10% de réduction
Biodiversité, fonctions biologiques du sol	Pas de connaissances	Pas de connaissances
Biomasse microbienne	De 5% à 2%	Baisse de 90%

Source : d'après Lorenz et Lal (2016)

Ces processus de dégradation par perte de la MO des sols sont directement et indirectement influencés par le climat et ses changements au travers du bilan hydrique et de la température du sol influençant sa rétention en eau, sa chimie, les biomasses et leurs diversités biologiques, et la minéralisation du carbone (Soco, 2009 ; Bérard *et al.*, 2015 ; Bradford *et al.*, 2016). Qui plus est, les quantités et qualités des matières organiques des sols, ainsi que leurs évolutions négatives ou positives, sont fortement influencées par les pratiques agricoles (Soco, 2009 ; Cong *et al.*, 2014), et les changements d'usage des terres (Seto *et al.*, 2012, Encadré 6-1).

Il est cependant difficile de quantifier à l'échelle globale ces pertes (ou gains) futurs de carbone en lien avec les changements climatiques, car les connaissances récentes sur le devenir du carbone (exemples : sur les interactions plantes/microorganismes/sols et leurs adaptations aux changements climatiques) sont encore insuffisamment intégrées dans les modèles (Bradford *et al.*, 2016). Par exemple, Todd-Brown *et al.* (2014) ont tenté de modéliser ces changements de carbone organique des sols en utilisant 11 modèles climatiques (ESM) selon le scénario RCP 8.5 (2090-2099 / 1997-2006). Leurs résultats varient entre des pertes de 72 Pg C à des gains de 253 Pg C au niveau global, ceci en lien avec les fortes incertitudes concernant la décomposition des matières organiques, la production primaire nette, et l'incorporation du carbone stable dans le sol, influencés par les changements de température, d'humidité et de CO_2 atmosphérique. Ils mettent en garde sur la mauvaise prise en compte de certains phénomènes dans ces modélisations, comme les changements d'usage des sols reconnus pour favoriser des pertes de carbone (Brovkin *et al.*, 2013, Encadré 6-1), des phénomènes de « priming effect » (apports de carbone labile par la production primaire fertilisée par le CO_2, induisant des minéralisations accrues de

carbone plus stable dans les sols, Fontaine *et al.,* 2004), susceptibles d'être exacerbés par les évènements extrêmes climatiques (Bérard *et al.,* 2011), et d'autres phénomènes induits directement par le changement climatique (IPCC, 2019a) que sont l'accroissement des incendies (Turetsky *et al.,* 2011) et la décongélation du permafrost (Schuur *et al.,* 2008). Ainsi, si certaines régions présentent originellement de grandes quantités de matières organiques dans leurs sols[40], elles peuvent aussi présenter des risques importants de pertes de ces matières organiques ; l'étude de Soco (2009) le montre pour l'**Europe du Nord**, mais c'est probablement le cas pour toutes les zones boréales[41]. Il est d'ailleurs à noter que dans l'étude de Todd-Brown *et al.* (2014), les modèles optimistes quant aux gains globaux de carbone dans les sols, sont ceux qui modélisent de forts gains de productivité végétale dans les zones du Nord.

Prendre en compte les changements possibles des taux de matières organiques des sols permet de prendre en compte la dégradation des sols et des terres, et ainsi d'identifier certaines zones critiques pouvant être influencées par le changement climatique et les pratiques agricoles. Inversement, en dehors du rôle des MO sur la qualité des sols pour l'agriculture, il est important de prendre en compte le rôle des sols sur le climat au travers de leurs capacités de stockage (mais aussi de libération, Liu *et al.,* 2018) du carbone ; à ce titre les usages des terres et les pratiques agricoles actuels et futurs présentent de véritables enjeux pour l'atténuation du changement climatique (Falloon *et al.,* 2009 ; Minasny *et al.,* 2017).

A notre connaissance, seule une étude européenne (Balkovic *et al.,* 2018) prend explicitement en compte la dégradation des sols impactée par le changement climatique (et en particulier au travers de la minéralisation des matières organiques). L'étude prospective de Balkovic *et al.* (2018) ne nous donne pas directement des valeurs de surfaces de terres impactées, car elle utilise une approche énergétique de la production agricole (pour 10 cultures majeures[42] sur 25 pays de l'Union Européenne, avec des pratiques agricoles conventionnelles). Leur démarche est basée sur une modélisation selon les travaux de Izaurralde *et al.* (2006) et Williams (1995) pour l'évolution de la matière organique et de l'érosion hydrique (modèle EPIC) dans le cadre d'un scénario +2°C (2100 / 1971-2000), ce qui correspond à RCP 4.5. Balkovic *et al.* (2018) comparent les résultats de changements en rendement calorique avec et sans prise en compte de l'évolution de la dégradation des sols sous le scénario climatique de +2°C appliqué. Ils en concluent que la dégradation des sols entraînerait une vulnérabilité calorique[43] allant de 3 à 52 Gcal ha-1 selon les pays européens (Tableau 6-10). Ces chutes de rendement calorique seraient principalement dues à une perte de fertilité des sols : la minéralisation accrue des matières organiques induite par le scénario climatique de +2°C provoquerait l'épuisement des éléments nutritifs dans les sols, qui ne serait pas suffisamment compensé par les pratiques agricoles conventionnelles. Exprimées en pourcentages, ces estimations montrent que la prise en compte de la dégradation des sols diminue les résultats de rendement calorique de 1 à 38% selon les pays. **Les régions les plus impactées seraient l'Europe du Nord-Est (pays baltes, Suède) et de l'Est (Slovaquie, Hongrie, Bulgarie)** (le tableau 10 donne les détails pour chacun des 25 européens pays étudiés).

Cette étude de Balkovic *et al.* (2018) suggère que la dégradation des sols impactée par les changements climatiques, rarement prise en compte dans les études prospectives (Webb *et al.,* 2017), pourrait compromettre les avantages climatiques (température et CO_2 accrus) pour l'agriculture dans certaines régions, si des mesures d'adaptation adéquates n'étaient pas appliquées (exemples : gestion durable de l'irrigation et de la fertilisation).

[40] Voir les données 2008 de FAO-stat : http://www.fao.org/faostat/fr/#data/ES

[41] Additionné à ce phénomène de perte de MO, ces régions sont susceptibles de connaitre des inondations avec le changement climatique (Rojas *et al.,* 2019), pouvant exacerber la dégradation des sols par érosion hydrique. Enfin, d'après l'étude de Liu *et al.* (2018) sur la réponse des respirations microbiennes à l'augmentation de température, les sols des régions de hautes latitudes pourraient avoir un fort potentiel de libération de CO_2 dans le cadre des scénarios de réchauffement planétaire.

[42] Le blé d'hiver, le seigle d'hiver, l'orge de printemps, le maïs-grain, le riz, le colza d'hiver, le soja, le tournesol, la betterave à sucre et la pomme de terre.

[43] Différence de rendement calorique selon que la dégradation des sols n'est pas prise en compte ou qu'elle l'est.

Tableau 6-10. Pertes de rendement calorique dues à la prise en compte de la dégradation des sols impactée par le changement climatique, selon l'étude de Balkovic et al. (2018). Scénario +2°C à 2100 (par rapport à la période 1971-2000). Pour 10 cultures majeures en Europe, avec pratiques agricoles actuelles.

	pays	impact sur rendement calorique (Gcal ha^{-1})	% de perte rendement calorique
	France	10	5
	Allemagne	14	7
	Royaume-Uni	13	6
	Pologne	26	14
Reste de l'Europe	Irlande	17	8
	Luxembourg	14	7
	Belgique	3	1
	Hollande	8	3
	Danemark	18	8
	Suède	33	22
	Finlande	12	9
	Norvège	ND	ND
	Estonie	51	38
	Lettonie	52	38
	Lituanie	43	31
Europe du Sud	Portugal	9	7
	Espagne	4	3
	Italie	11	6
	Slovénie	21	10
	Grèce	6	5
	Chypre	ND	ND
	Croatie	ND	ND
	Bosnie	ND	ND
	Monténégro	ND	ND
	Albanie	ND	ND
	Macédoine	ND	ND
Europe de l'Est	Hongrie	32	20
	Roumanie	21	15
	Bulgarie	27	20
	Serbie	ND	ND
Europe Centrale	Autriche	11	6
	République Tchèque	19	11
	Slovaquie	29	18
	Suisse	ND	ND

ND : données non fournies

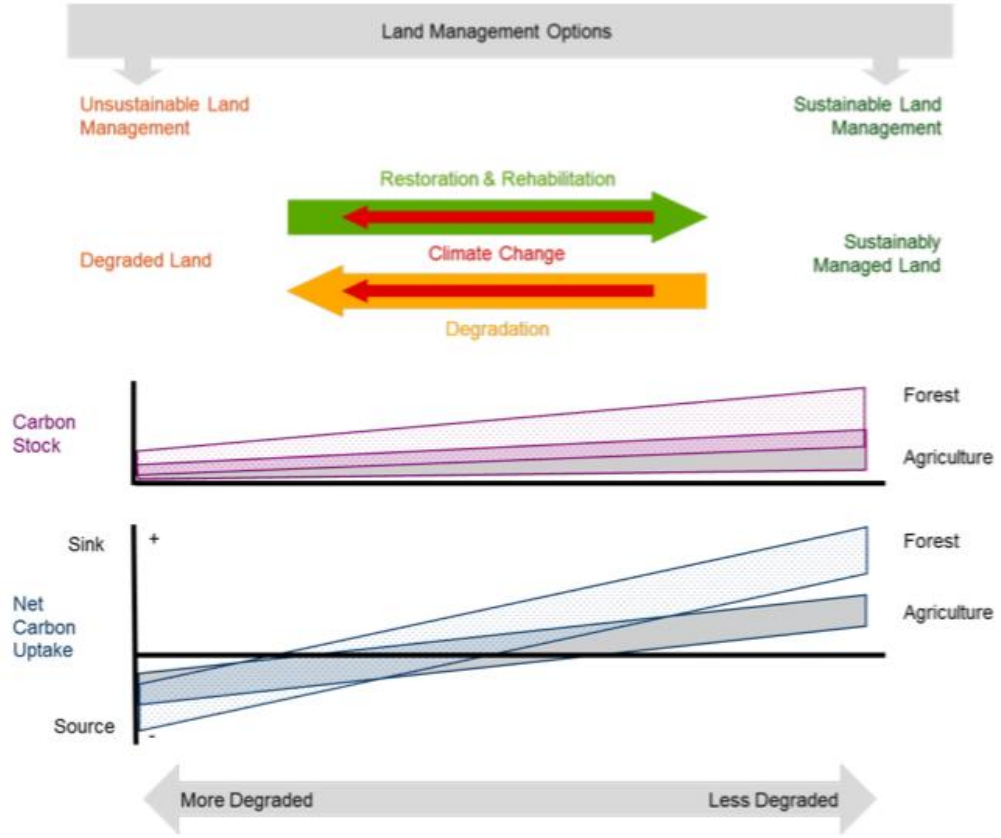
Remarque : les auteurs (Balkovic *et al.*, 2018) précisent que leur modélisation sous-estime les phénomènes de dégradation en lien avec la dynamique de l'eau. A ce propos, Zdruli et Lamaddalena (2015) citent l'Espagne comme un des pays méditerranéens les plus impactés par la salinisation des sols (3,4 M ha).

Améliorer la matière organique des sols pour lutter contre la dégradation des terres

Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2019a) sur la dégradation des terres insiste sur l'importance de poursuivre les études combinant scénarios de changements climatiques et modélisation de la dégradation des terres pour fournir des connaissances utiles sur les types de gestion des terres et l'étendue de leur application qui seront nécessaires si on veut éviter, réduire et inverser la dégradation des terres. Les innovations et les choix des pratiques agricoles sont un enjeu fondamental pour le devenir des sols sous l'action du changement climatique.

La Figure 6-7 reprise de l'IPPC (2019a) montre bien les enjeux des interactions entre gestion des terres (agricoles et forestières) et le changement climatique, sur la dégradation des terres au travers de la dynamique du carbone dans les sols (et donc de la matière organique).

Figure 6-7. Schéma conceptuel illustrant les impacts du changement climatique en interaction avec la gestion des terres, agissant sur la dégradation de celles-ci au travers de l'évolution des stocks de carbone



Source : IPCC, 2019a.

En réponse aux possibles phénomènes de dégradation des sols en lien avec le changement climatique, les études expérimentales et de modélisation ainsi que les expériences participatives se développent pour tester les effets de différentes options d'adaptation au changement climatique par le biais des pratiques agricoles, sur les rendements et les impacts environnementaux, en particulier dans les sols (Hamidov *et al.,* 2018 ; Nyawira *et al.,* 2016 ; Cong *et al.,* 2014). Ces modes de gestions relèvent de l'agroécologie : fertilisation organique, diversification des cultures et des rotations, introduction des prairies dans les rotations, agriculture de conservation, agroforesterie, etc.

La littérature ne permet pas encore de quantifier, à l'échelle mondiale, les effets futurs de ces choix d'adaptation des pratiques en termes de gains de surfaces de sols (Gomiero, 2016). On peut néanmoins retenir que ces stratégies d'adaptation au changement climatique par le biais des pratiques sont fortement influencées par les conditions agronomiques et pédoclimatiques locales et que leurs effets bénéfiques concernent principalement le taux de matière organique des sols (Oldfield *et al.,* 2019), la rétention en eau du sol et la limitation de l'érosion. Des résultats obtenus non seulement dans le cadre de travaux de recherche et de travaux réalisés par les instituts techniques, mais aussi directement par les agriculteurs (FAO et ITPS, 2015), suggèrent que ces changements de pratiques actuellement testés dans un objectif de conservation voire d'augmentation des rendements, pourraient anticiper et compenser certains effets directs négatifs du changement climatique sur la dégradation des sols. Ces démarches actuelles sont à développer dans les contextes physiques, agronomiques, climatiques et socio-économiques locaux (Gomiero, 2016).

6.5.3. La hausse du niveau des mers

La hausse du niveau des mers, principalement due à la dilatation thermique de l'océan qui se réchauffe, à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires et aux changements de cycles hydrologiques continentaux, a déjà induit depuis un siècle une hausse de près de 20 cm en moyenne sur l'ensemble des mers, et ce phénomène s'accélère (le niveau moyen mondial des mers en 2016 correspond à la moyenne annuelle la plus élevée (+ 20 cm) depuis le début des mesures à la fin du 19ème siècle), avec une projection d'augmentation moyenne mondiale de 43 à 84 cm (par rapport à 1986-2005) en 2100 avec respectivement les scénario RCP2.6 et 8.5 (IPCC, 2019b). Ces augmentations du niveau des mers induiront une augmentation de la fréquence des phénomènes de submersion, d'érosion et d'intrusion d'eau salée (en surface et dans les aquifères), affectant les activités agricoles notamment par le biais d'une dégradation possible des sols par salinisation (FAO et ITPS, 2015). Ces phénomènes sont des conséquences directes des changements climatiques (IPCC, 2019b).

La plupart des études identifiées considèrent les impacts de cette hausse du niveau des mers sur les populations et les coûts économiques liés. Nous n'avons pas trouvé d'études quantitatives, à l'échelle mondiale, qui traitent des pertes de surfaces agricoles induites par l'évolution du niveau des mers. Il est certain qu'il existe des disparités régionales d'augmentation du niveau de la mer : ainsi, les études suggèrent que l**es zones tropicales, le long de la côte Est asiatique et dans l'océan Indien**, pourraient être fortement impactées par ce phénomène (Perrette *et al.,* 2013). Certaines études estiment des pertes de surfaces pouvant dépasser 50 000 km² pour certains pays et scénarios climatiques testés (États-Unis, Canada, Chine) (Yokoki *et al.,* 2018). Ces surfaces restent faibles rapportées à l'échelle des pays, elles peuvent cependant être importantes pour de petits pays insulaires, ou certaines zones de deltas très agricoles. Ainsi, certaines régions deltaïques sont historiquement fortement peuplées et agricoles, ce qui a forcé et force l'utilisation croissante des eaux souterraines pour compléter les réserves en eau de surface réduites, entraînant alors un affaissement accéléré des sols. De ce fait, cela peut conduire localement à une élévation relative du niveau de la mer largement supérieure aux moyennes estimées au niveau mondial avec les projections climatiques (Hinkel *et al.,* 2014). C'est le cas des **deltas du sud de l'Asie (Chao Phraya, Bengale), du Yangtsé et du Nil**. D'autres deltas (Niger-Afrique, Magdalena-Colombie, Mahakam-Indonésie, MacKenzie-Canada et Mississippi-USA) connaissent des extractions d'hydrocarbures, provoquant aussi de manière anthropique des phénomènes d'affaissement accélérés. D'après l'étude d'Ericson *et al.* (2006) sur une quarantaine de deltas répartis dans le monde, ces zones deltaïques perdraient 4,9 % de leur surface totale d'ici 2050, suite aux inondations et aux phénomènes d'érosion.

De manière générale à l'échelle mondiale, les surfaces concernées par l'élévation du niveau des mers sont estimées entre 15 à plus de 40 millions d'ha en fonction des scénarios climatiques et de la prise en compte des marées les plus hautes à horizon 2100. Là encore, il est difficile d'estimer la part des terres agricoles impactées.

6.5.4. L'urbanisation

L'**urbanisation** est un facteur anthropique de perte de surfaces aptes à l'agriculture (ou potentiellement cultivables) et qui peut aller jusqu'à l'artificialisation complète des terres, sans retour possible. L'expansion des zones urbaines est influencée par de multiples facteurs liés aux contextes politiques et économiques d'utilisation des terres et des réseaux de transport, et bien-sûr à la croissance des populations (Seto *et al.,* 2011). Si les zones urbaines ne représentent selon les estimations, que de 1% à 3% de la superficie totale du globe (Prince *et al.,* 2018 ; FAO, 2018 ; IPCC, 2019a), plus de 60% des terres agricoles irriguées sont situées à proximité de zones urbaines (Thebo *et al.,* 2014). Et l'extension projetée des zones urbaines aura lieu sur certaines des terres cultivées les plus productives du monde, en particulier dans les **zones méga-urbaines d'Asie et d'Afrique** (Bren d'Amour *et al.,* 2017. La concurrence potentielle des terres entre les utilisations agricoles et urbaines a été mise en évidence sur plusieurs zones en Europe (**Hollande, ouest de l'Allemagne, Balkans occidentaux, nord de l'Italie, sud-est de la France, péninsule ibérique et Irlande** ; Aksoy *et al.,* 2017). En **région méditerranéenne**, les côtes sont particulièrement touchées par l'urbanisation ; d'après Zdruli et Lamaddalena (2015) 50% de ces zones devraient être imperméabilisés en 2050. Notons aussi que cette expansion des surfaces urbanisées modifie profondément les écosystèmes (Grimm *et al.,* 2008). Outre les effets directs sur la diversité végétale et les pertes de carbone organique (Seto *et al.,* 2012), les terres agricoles situées à proximité des grandes zones urbaines sont fragilisées directement (pertes directes de surfaces), mais aussi indirectement par la compétition pour l'eau, les changements dans la composition des espèces et la biodiversité et les risques climatiques exacerbés par l'urbanisation (e.g. crues induites par l'artificialisation des terres) (Prince *et al.,* 2018).

Inversement, les services écosystémiques rendus par ces écosystèmes agricoles perdus disparaissent tels que l'atténuation des crues, protégeant ces zones densément habitées (cas de la **région hyper urbaine du Nil**[44] en Égypte) (Bren d'Amour *et al.*, 2017).

Quantitativement, selon l'étude de Bren d'Amour et al. (2017) qui croise des projections d'urbanisation en 2030 (base de données de Seto *et al.*, 2011) avec des données sur les terres cultivées en 2000 (base SAGE de Ramankutty *et al.*, 2008), **l'expansion urbaine devrait entrainer une perte de 1,8 à 2,4% des terres cultivées dans le monde (27 à 35 Mha) d'ici 2030, en particulier en Asie et en Afrique. Concernant l'Europe**[45]**, celle-ci perdrait 2 à 3 M ha (soit 0,5 à 0,9% de ses terres cultivées)** (Tableau 6-11). Pour comparaison, Lambin et Meydfroidt (2011) donnent pour la même période des valeurs mondiales de pertes de surfaces agricoles induites par l'urbanisation plus importantes, de l'ordre de 48 à 100 Mha.

Tableau 6-11. Implications régionales et nationales de l'expansion de la zone urbaine sur les terres cultivées et la production végétale (d'après Bren d'Amour et al., 2017).

Region or country	Expected cropland loss, Mha	Relative cropland loss, % of cropland	Production loss, Pcal·y^{-1}	Production loss, % of total crop production	Productivity compared to domestic/regional average
World	30 (27–35)	2.0 (1.8–2.4)	333 (308–378)	3.7 (3.4–4.2)	1.77
Asia	18 (16–21)	3.2 (2.9–3.7)	231 (214–264)	5.6 (5.1–6.3)	1.59
Africa	6 (5–6)	2.6 (2.4–3)	49 (45–52)	8.9 (8.3–9.4)	3.32
Europe	2 (2–3)	0.5 (0.5–0.9)	17 (16–23)	1.2 (1.1–1.5)	2.18
Americas	5 (4–5)	1.2 (1.1–1.4)	35 (32–40)	1.3 (1.2–1.5)	1.09
Australasia	0.1 (0–0.1)	0.2 (0.1–0.3)	0.3 (0.1–0.3)	0.2 (0.1–0.3)	0.94
China	7.6 (7.1–8.6)	5.4 (5–6.1)	137 (128–153)	8.7 (8.2–9.8)	1.53
India	3.4 (3.3–3.7)	2.0 (1.9–2.2)	34 (32–38)	3.9 (3.7–4.3)	1.61
Nigeria	2.1 (1.8–2.5)	5.7 (5–6.9)	16 (15–17)	11.7 (10.7–12.6)	1.82
Pakistan	1.8 (1.7–2)	7.6 (7.2–8.6)	9 (9–10)	8.8 (8.4–9.9)	1.22
United States	1.5 (1.4–1.6)	0.8 (0.8–0.9)	11 (11–12)	0.7 (0.7–0.8)	0.90
Brazil	1.0 (0.9–1.2)	2.0 (1.7–2.4)	10 (9–12)	2.4 (2.1–2.8)	1.22
Egypt	0.8 (0.7–0.8)	34.1 (31.6–35.8)	25 (23–26)	36.5 (34–38)	1.07
Vietnam	0.8 (0.7–0.8)	10.3 (9.3–11.2)	15 (15–17)	15.9 (15.2–17.2)	1.41
Mexico	0.7 (0.6–0.8)	1.9 (1.7–2.3)	4 (4–5)	3.7 (3.2–4.4)	1.91
Indonesia	0.6 (0.5–0.7)	1.1 (0.9–1.3)	10 (8–11)	2.3 (2–2.7)	2.03

Cropland and production losses are generated using data from refs. 4, 15, and 17. We differentiate between different urbanization probability thresholds (50, 75, and 87.5%). Depending on the corresponding threshold, we define cropland loss scenarios as follows: low (>87.5%), medium (>75%), and high (>50%). Medium-scenario results are reported, and ranges indicate low- to high-scenario results. The 10 countries with the highest absolute crop production losses are presented in descending order.

6.5.5. La progression des aires protégées

Les aires protégées[46] représentent non seulement des sentinelles du changement climatique, mais offrent aussi des services dans l'atténuation (stockage du carbone) et dans l'adaptation au changement climatique (stockage de l'eau, zones tampon, limitation de l'érosion, etc.) (Dudley *et al.*, 2010). D'après Zabel *et al.* (2014), 57% des aires protégées mondiales pourraient être « potentiellement cultivables ». L'étude mondiale de Lambin et Meyfroidt (2011) prévoit une augmentation de 26 et 80 Mha en 2030 de ces surfaces protégées en compétition avec l'usage agricole de ces terres « potentiellement cultivables »

[44] Région par ailleurs soumise à l'élévation exacerbée du niveau de la mer (voir Section 6.5.3)

[45] Bren d'Amour *et al.* (2017), donnent des pertes de surfaces agricoles (Tab.1) dues à l'urbanisation pour 16 régions (l'Europe est regroupée en une seule région, mais il n'y a pas de détails sur la composition de ces régions). La Table S3 (sup material) du document donne des pertes de surfaces agricoles dues à l'urbanisation pour différents pays, dont quelques pays européens, mais les données ne sont pas exhaustives.

[46] Une aire protégée (AP) (*protected area*) est, selon la définition de l'UICN (https://www.iucn.org/fr/a-propos), « un espace géographique clairement défini, reconnu, dédié et géré, par des moyens légaux ou autres, afin de favoriser la conservation à long terme de la nature et des services écosystémiques et des valeurs culturelles qui y sont liés »

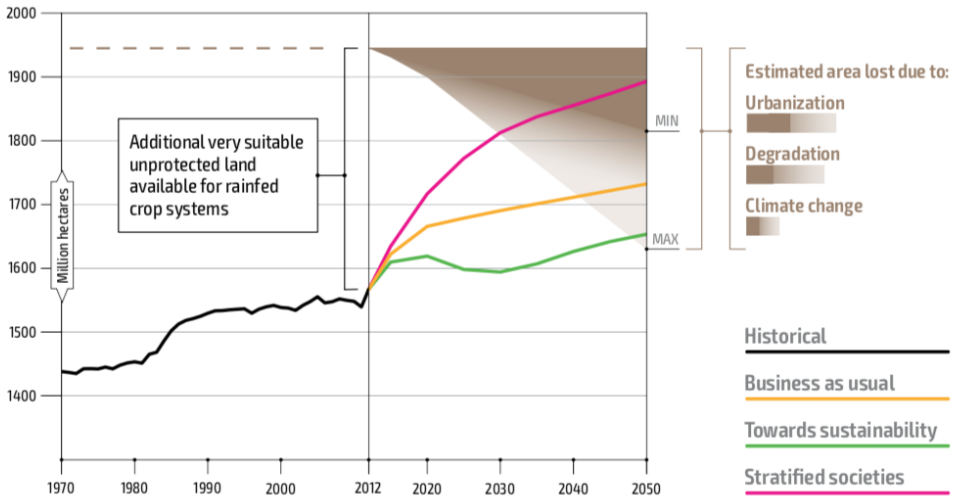
(comparativement à la période 2000)[47], ce qui correspondrait à 3-10% des surfaces actuelles protégées[48]. En corollaire, la protection de ces surfaces potentiellement cultivables limiterait l'extension des terres pour la production agricole mais parallèlement limiterait des phénomènes de dégradation des sols liés aux changement d'usage des terres (Encadré 6-1).

6.6. Tenter de prendre en compte la dégradation des terres agricoles pour l'estimation des surfaces futures ?

Cette question est potentiellement importante en fonction des scénarii futurs. Par exemple dans la Figure 6-8 (FAO, 2018, Fig. 4.13, p. 131), en fonction des scénarii de développement (traits de couleur) et des pertes des terres liées à différentes origines (zones en marron), il est possible de se retrouver dans des situations où les besoins dépassent de beaucoup les ressources en terres agricoles (si on considère les pertes). Attention cependant, pour cette figure, la FAO ne considère que les surfaces « *very suitable* » irriguées + non irriguées, non protégées, d'où des surfaces potentielles plus faibles que pour notre expertise AE2050.

La dégradation des terres est donc un phénomène qui devrait être considéré dans les études prospectives de disponibilité des terres puisque les rendements sur les terres dégradées seront plus faibless ou nécessiteront le recours à plus d'intrants.

Figure 6-8. Besoins en surfaces (M ha) de terres arables (« *very suitable* », SI>80) selon trois scénarios climatiques, et estimation des pertes de surfaces agricoles due à l'urbanisation, la dégradation de terres et le changement climatique



Note: "Additional very suitable and unprotected land" represents the base-year amount available and not currently in use in the highest suitability class for rainfed crops, as provided by FAO-IIASA GAEZ v4 (see Box 7 and Section 3.10). Adding this to arable land in use in 2012 (irrigated and rainfed) provides an estimate of the maximum potentially available very suitable unprotected agricultural land (dashed line), given 2012 irrigation conditions. Expanding cropland beyond that limit requires progressively increasing investments. The faded wedge indicates the range of potential land loss (minimum – dark brown, maximum – light brown). Loss due to urbanization (in the range of 1.6 million–3.3 million hectares per year) and degradation (in the range of 1.0 million–2.9 million hectares per year) are taken from Lambin and Meyfroidt (2011). Loss due to climate change (in the range of 0.5 million–1.4 million hectares per year) refer to the RCP scenarios – 4.5 (min) and 8.5 (max) – and are based on the FAO-IIASA GAEZ v4.

Sources: FAO Global Perspectives Studies, based on simulations with the FAO GAPS model and FAOSTAT (various years).

Source : d'après FAO, 2018.

[47] Cette estimation est basée 1-sur l'augmentation des aires protégées entre 2003 et 2009 (considérant que 50% de ces terres seraient en compétition avec l'usage agricole), 2-selon le scénario « Sustainability First » du projet GEO4 de l'UNEP, indiquant que 400 Mha seraient dédiés aux zones protégées entre 2009 et 2030 (considérant que 20% de ces terres seraient en compétition avec l'usage agricole).

[48] La surface totale des aires protégées est actuellement de 8,3 M km2 d'après l'UICN.

6.6.1. Difficultés à réaliser ces estimations de dégradation des terres au niveau régional

La prise en compte n'est cependant pas facile car :

- Comme nous l'avons vu, les estimations de la dégradation des terres sont très variables ;

- Les approches sur la dégradation des terres mélangent des expertises sur les surfaces dégradées et les rendements (obtenus par télédétection de la production végétale de manière générale ou à partir des rendements agricoles sur des cultures données) ;

- Il y a peu de données chiffrées et régionalisées (beaucoup d'estimations mondiales ou par grandes zones tels que des % de terres dégradées). La base FAOStat propose cependant des indicateurs de dégradation des sols[49] par pays basés sur l'étude assez ancienne GLASOD (Oldeman *et al.*, 1991) ;

- Il existe cependant quelques données sur la période passée-actuelle (mais très variables) qui pourraient cependant nous informer sur les régions sensibles à la dégradation des terres ;

- Il existe très peu de données sur les évolutions futures des surfaces dégradées sauf 2 études recensées : (i) Lambin et Meyfroidt (2011) donnent des **pertes mondiales de surfaces aptes à l'agriculture entre 2000 et 2030** (sur la base de Mha/an x 30 ans) ; (ii) Balkovic *et al.* (2018) donnent des % de pertes de rendement à **l'échelle européenne** (mais pas pour tous les pays) liées à la qualité des sols en prenant en compte le changement climatique **entre 2000 et 2100.**

6.6.2. Quelques pistes possibles de démarches à développer ?

Les pistes possibles pour tenir compte de la dégradation des sols agricoles sur l'estimation des surfaces potentiellement cultivables en 2050, consisteraient à contraindre les surfaces des nouvelles terres ou bien de réduire les rendements espérés. Ainsi, il serait par exemple possible de :

- Partir des données mondiales de pertes de Lambin et Meydfroidt (2011) puis de les répartir entre les régions AE2050 selon la surface agricole en intégrant un coefficient de sensibilité de chaque région que l'on proposerait selon la bibliographie donnant des estimations de zones dégradées par région et les pourcentages actuels de répartition des surfaces de terres arables (cropland) dégradées proposés par Le *et al.* (2016).

- Partir directement des surfaces estimées dans le rapport technique d'expertise pour 2020 et 2050 sur lesquelles nous appliquerions les % régionaux actuels de dégradation issus de Le *et al.* (2016) et les soustraire entre 2050 et 2020 pour obtenir des pertes de surfaces dégradées. Une vérification possible de nos calculs serait de les comparer au niveau mondial avec la valeur de perte mondiale de Lambin et Meydfroidt (2011).

- Pour détailler le niveau européen, nous pourrions prendre les % de pertes de rendements selon Balkovic *et al.* (2018) et les transformer en % de pertes de surfaces de terres mais ici nous mélangeons rendements avec surfaces (ce que font aussi Lambin et Meydfroidt (2011) dans leur approche d'expertise). Puis, pour le reste des régions mondiales, en fonction des informations qualitatives de la bibliographie nous pourrions tenter de qualifier **les régions susceptibles à la dégradation des sols : une démarche possible serait de générer un tableau** avec en colonnes la région, le type de dégradation, la période, la valeur de dégradation, la méthodologie d'estimation, la référence de la publication. Nous verrions ainsi se dessiner des régions qui montrent de manière récurrente une sensibilité à la dégradation et pour lesquelles nous pourrions appliquer une sorte de coefficient de dégradation **en comparaison avec le tableau de** Le *et al.* (2016).

En conclusion, les changements d'usage des terres (et certaines pratiques associées) comme la transformation de surfaces de zones protégées, de forêts et de prairies permanentes extensives en surfaces agricoles, la simplification et l'intensification des agrosystèmes et l'artificialisation des terres par transformation des surfaces agricoles en zones urbanisées, peuvent donc avoir des conséquences importantes en termes de dégradation des sols et de pertes de surfaces potentiellement cultivables (érosions, pertes de matière organique, baisse de biodiversité, artificialisation …), pouvant être exacerbées par les changements climatiques et en particulier les événements extrêmes (IPCC, 2019a ; FAO et ITPS, 2015) (voir Encadré 6-1).

[49] http://www.fao.org/faostat/fr/#data/ES

Il parait donc important de prendre en compte dans une première approche les forêts denses, les zones protégées[50] et les zones de sols agricoles artificialisées par l'urbanisation dans les calculs de surfaces potentiellement cultivables à l'horizon 2050.

La dégradation des terres agricoles est une réalité que nous avons tenté de décrire dans cette sixième partie. Cette dégradation constatée sur les années passées va très certainement se poursuivre dans l'avenir en lien étroit avec les activités humaines et en interaction avec le changement climatique. Nous suggérons de poursuivre et tester des pistes d'estimation des évolutions possibles de dégradation de ces terres et leurs conséquences sur les surfaces futures potentiellement cultivables pour compléter les expertises-prospectives sur l'agriculture dans l'avenir.

6.7. Conclusion

6.7.1. Analyse critique de la littérature

Peu d'études jusqu'à présent ont pris en compte l'évolution des quantités de surfaces agricoles (voire de leur qualité) en lien avec le changement climatique à l'horizon 2050, arguant que cette évolution serait faible à l'échelle mondiale, et irait globalement vers une augmentation des surfaces (par ex. Ibarrola Rivas et Nonhebel, 2016). Or, d'après notre travail bibliographique, il ressort que si dans certaines régions on peut s'attendre à de meilleures conditions climatiques telles que des températures plus favorables à la croissance des plantes (dans les zones septentrionales par exemple ; King *et al.*, 2018), permettant en théorie l'accès à de nouvelles terres pour l'agriculture, d'autres facteurs de croissance des plantes comme la disponibilité en eau ne seront pas toujours améliorés. Par ailleurs, l'évolution de la qualité des sols pour l'agriculture avec le changement climatique pourrait aller vers une dégradation, dont les impacts seront variables selon les usages des terres (IPCC, 2019a ; Balkovic *et al.*, 2018 ; Bren d'Amour *et al.*, 2017 ; Lambin et Meyfroidt, 2011). C'est ce que nous avons tenté de discuter dans ce chapitre d'expertise.

Notre travail de constitution du corpus bibliographique pour tenter de faire ressortir des estimations existantes sur les effets du changement climatique sur la disponibilité en terres « potentiellement cultivables» ainsi que sur la qualité des sols au niveau régional (régions continentales et Europe) et dans le Monde, ne nous a permis d'extraire qu'un petit nombre de documents plus récents ou plus complets que les documents déjà largement utilisés dans les études précédentes (ex : portail GAEZ, Zabel *et al.*, 2014 ou encore Ramankutty *et al.*, 2002).

Nous avons ainsi comparé des estimations de terres « potentiellement cultivables » actuelles et futures à partir des études synthétisées et des données extraites du portail GAEZ (Global Agro-Ecological Zones). La divergence entre données fournies par ces études est principalement liée aux différences d'hypothèses et de définitions de périmètres (exemples : scénarios climatiques, catégories de potentiel des terres à permettre la culture, types et nombre de cultures considérées, différences de délimitation des régions mondiales, prise en compte ou non des surfaces forestières, artificialisées et/ou protégées dans les calculs). Malgré ces divergences, nous avons pu comparer des tendances d'évolutions entre une période de référence et la période future prospectée : augmentations des surfaces potentiellement cultivables dans les zones septentrionales (principalement en lien avec l'augmentation de température) et diminutions de ces surfaces potentiellement cultivables dans certaines régions d'Afrique, d'Océanie, d'Amérique du Sud et d'Europe du Sud (principalement en lien avec les changements de régimes de précipitations).

Cependant, tous ces travaux reposent systématiquement sur l'hypothèse selon laquelle seules les variables dépendant directement du climat (température et humidité du sol) et agissant sur la croissance des plantes sont affectées par le changement climatique, et non pas les variables associées au sol (notamment la fertilité des sols). Il nous est donc apparu important de rechercher des éléments permettant de discuter de la dégradation possible des terres considérées potentiellement cultivables en lien avec les changements d'usage de sols, les pratiques agricoles et le changement climatique. Nous avons poursuivi une veille bibliographique, et nous avons ainsi complété ce corpus bibliographique, (exemples : FAO, 2018 ; IPBES, 2018 ; Cherlet *et al.* 2018 ; European Court of Auditors, 2018 ; Oldfield *et al.*, 2019 ; Rojas *et al.*, 2019 ; …) pour approfondir les questions de processus de dégradation et de restauration des sols en lien avec les

[50] Pour éventuellement soustraire des valeurs de surfaces potentiellement cultivables les surfaces protégées et leur augmentation, nous pourrions appliquer les pourcentages d'augmentation cités dans la section 6.5.5 (3-10% des surfaces totales actuelles protégées) aux valeurs des surfaces protégées actuelles données par région.

changements climatiques et les activités humaines. Très récemment, la synthèse du GIEC sur la dégradation des terres (IPCC, 2019a), nous a permis de compléter notre travail bibliographique sur les processus de dégradation des terres en lien direct et indirect avec le changement climatique. Ces derniers travaux venant d'ailleurs conforter les précédents. Concernant plus particulièrement la prise en compte de la dégradation des sols, une seule étude à notre connaissance, prend explicitement en compte cet aspect pour estimer les productions agricoles de pays européens (Balkovic *et al.,* 2018) et montre que la perte de fertilité liée à la minéralisation plus forte de la matière organique pourrait compromettre les avantages climatiques (température et CO_2 accrus) pour l'agriculture dans certaines régions.

Par ailleurs, i**l nous paraît important de prendre en compte dans une première approche des surfaces potentiellement cultivables à l'horizon 2050, les forêts denses, les prairies permanentes, les aires protégées et les zones de sols agricoles artificialisées par l'urbanisation**. La dégradation des terres agricoles déjà constatée va très certainement évoluer dans l'avenir en lien étroit avec les activités humaines et en interaction avec le changement climatique (IPCC, 2019a). Nous suggérons de poursuivre et tester des pistes d'estimation des évolutions possibles de dégradation de ces terres et leurs conséquences sur les surfaces futures potentiellement cultivables pour compléter les expertises-prospectives sur l'agriculture dans l'avenir.

De plus, **les changements d'usage des terres pour l'agriculture seront dans la réalité le résultat de contraintes et de compromis** entre les gains de production agricole et les pertes de services écosystémiques et sociaux. Ce qui suggère qu'il y aura beaucoup moins de terres cultivables potentielles supplémentaires qu'on ne le suppose généralement une fois pris en compte ces contraintes et compromis, et que la conversion des terres sera toujours associée à des coûts sociaux et écologiques (Lambin *et al.,* 2013).

6.7.2. Des données opérationnelles pour l'étude

Notre travail bibliographique a montré qu'il n'y avait que très peu d'études récentes présentant des données régionalisées et à l'échelle mondiale sur l'évolution des surfaces « potentiellement cultivables » avec le changement climatique et qu'elles n'apportaient pas d'informations quantitatives à ces échelles sur l'évolution possible de ces surfaces en fonction de la qualité des sols impactés par les changements climatique et d'usage des terres (section 6.5.). Ainsi, après comparaison des résultats des études retenues pour notre revue bibliographique et des données du portail GAEZ (section 6.4), et compte tenu de l'adaptabilité du portail GAEZ aux scénarios choisis pour cette étude, **les données du portail GAEZ** (version 3.0) ont finalement été retenues pour cette expertise en cohérence avec le modèle GlobAgri 2010, pour calculer les variations de surfaces potentiellement cultivables entre la période 2010 et celle de 2050 (avec le scénario de référence climatique SRES B2 qui correspond au scénario GIEC RCP6.0, un niveau d'intrants haut en système pluvial et la prise en compte implicite de l'effet fertilisant du CO_2).

Ces données suggèrent des pertes de surfaces en Amérique latine, Afrique (du Nord), Proche et Moyen Orient, Océanie et Europe du Sud et des gains importants de surfaces dans les zones boréales. L'Europe globalement présenterait des gains de surfaces, à l'exception des zones du Sud et de la France. Comme nous l'avons vu en section 6.5, il faut cependant être prudent quant à ces surfaces du Nord qui deviendraient favorables à l'agriculture compte tenu des élévations de température, car les sols de ces régions présentent des risques importants de dégradation induits par le changement climatique, en particulier si ces régions subissent des déforestations ou des intensifications agricoles. De même, elles pourraient également être soumises à des périodes de sécheresse altérant les rendements (*cf.* sécheresse 2018 affectant principalement le nord de l'Europe). Pour prendre en compte des pertes de surfaces possibles avec la dégradation des sols induite par le changement climatique en interaction avec les changements d'usage des terres, des analyses de sensibilité du modèle sont proposées consistant à re-simuler certains scénarios en restreignant les surfaces potentiellement cultivables selon (i) l'**exclusion des surfaces actuellement en forêts[51] du potentiel d'expansion des surfaces cultivables** (en utilisant les données de Fischer *et al.,* 2010 pour un calcul des surfaces actuelles de forêts potentiellement cultivables) (ii) l'**exclusion des surfaces artificialisées du potentiel d'expansion des surfaces cultivables** (en utilisant les données fournies par Bren d'Amour et al., 2017 et communication personnelle de données détaillées) (iii) la restriction **des surfaces potentiellement cultivables** à des surfaces de « bonne qualité » (suitability SI>80) uniquement (selon la FAO, 2018) ou la **conservation des surfaces de**

[51] Notons que nous n'avons pas les moyens de calculer la part des zones protégées dans les surfaces potentiellement cultivables, sachant que 57 % des aires protégées mondiales actuelles (8,3 M km^2 d'après l'UICN) pourraient être « potentiellement cultivables » (Zabel *et al.,* 2014), mais que certaines surfaces protégées sont sous forêts (alors prises en compte dans les surfaces forestières).

la période « 2010 » comme **surfaces potentiellement cultivables** pour 2050 : ces analyses de sensibilité renforceraient la contrainte des terres, ce qui pourrait être une manière grossière « d'anticiper » les phénomènes de dégradation des sols en lien avec le changement climatique.

6.7.3. Conclusion finale

Finalement, si l'objet de cette étude est la **sécurité alimentaire** et son avenir à l'horizon 2050, nous souhaitons faire le parallèle avec **« la sécurité des sols »** définie par Mc Bratney *et al.* (2014) (« le maintien et l'amélioration des ressources en sols de la planète pour produire de la nourriture, des fibres et de l'eau douce, pour contribuer à la durabilité énergétique et climatique, ainsi qu'à la préservation de la biodiversité et à la protection globale de l'écosystème »). Au-delà des surfaces potentiellement cultivables pour nourrir les populations, les sols sont le support de la production de biens et assurent d'importants services écosystémiques, qui peuvent se transformer en dis-services en contextes de changements climatiques et d'actions anthropiques (Encadré 6-1). Ainsi, certaines fonctions des sols sont susceptibles d'être perdues et/ou perturbées dans les scénarios d'utilisation des surfaces pour l'agriculture (Fischlin *et al.,* 2007 ; Lambin *et al.,* 2013 ; Minasny *et al.,* 2017). Il nous paraît donc important de **prendre en compte ces compromis entre services et dis-services** pour poursuivre les études et prospectives aux échelles locales, régionales et globales sur le devenir des sols (dégradation, amélioration, adaptation) en lien avec les changements climatiques et en interaction avec les actions anthropiques (IPCC, 2019a).

Références bibliographiques citées dans le Chapitre 6

Aksoy E, Gregor M, Schröder C, Löhnertz M, Louwagie G (2017). Assessing and analysing the impact of land take pressures on arable land. Solid Earth, 8, 683–695

Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. Soil Use and Management, 24(3), 223–234

Balkovic, J., Skalsky , R., Folberth, C., Khabarov, N., Schmid, E., Madaras, M., Obersteiner, M., & van der Velde, M. (2018). Impacts and Uncertainties of +2∘C of Climate Change and Soil Degradation on European Crop Calorie Supply. *Earth's Future*, *6*, 373– 395. https://doi.org/10.1002/2017EF000629

Bérard A, Ben Sassi M, Kaisermann A, Renault P (2015). Soil microbial community responses to heat wave components: drought and high temperature (review). *Climate Research*. 66: 243–264.

Bérard A., T. Bouchet, G. Sevenier, A.L. Pablo, R. Gros (2011). Resilience of soil microbial communities impacted by severe drought and high temperature in the context of Mediterranean heat-waves. *European Journal of Soil Biology*. 47 : 333-342.

Bot, AJ, Nachtergaele, FO, & Young, A (2000). Land resource potential and constraints at regional and country levels (L. a. W. D. Division,Trans.). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bradford MA, Wieder WR, Bonan GB, Fierer N, Raymond PA (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to Climate Change. Nature Climate Change 6 : 751-758.

Brovkin, V., Boysen, L., Arora, V. K., Boisier, J. P., Cadule, P., Chini, L., Claussen, M., Friedlingstein, P., Gayler, V., van den Hurk, B. J. J. M., Hurtt, G. C., Jones, C. D., Kato, E., de Noblet- Ducoudré, N., Pacifico, F., Pongratz, J., and Weiss, M. (2013). Effect of anthropogenic land-use and land-cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the twenty- first century, J. Climate, 26, 6859–6881, doi:10.1175/JCLI-D-12- 00623.1

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|August 22, 2017|vol. 114|no. 34|8939–894

Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, SukkelW, van Groenigen JW, Brussaard L. (2018). Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry 120 : 105-125.

Cai, X., Zhang, X., & Wang, D (2011) Land availability for biofuel production. Environmental Science and Technology, 45(1), 334-339

Campbell, J.E., Lobell, D.B., & Field, C.B. (2009). Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol. Science, 324(5930), 1055e1057.

Chaer G, Fernandes M, Myrold D, Bottomley P (2009). Comparative resistance and resilience of soil microbial com- munities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils. Microb Ecol 58: 414−424

Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., von Maltitz, G. (Eds.), *World Atlas of Desertification*, Publication Office of the European Union, Luxembourg, (2018).

Cong R-G, Hedlund K, Anderson H, Brady M (2014). Managing soil natural capital: An effective strategy for mitigating future agricultural risks? Agricultural Systems 129 : 30–39

Crouzet O., Consentino L., Petraud J.P., Marrauld C., Aguer J.P., Bureau S., Le Bourvellec C., Touloumet L., Bérard A. (2019). Soil Photosynthetic Microbial Communities Mediate Aggregate Stability: Influence of Cropping Systems and Herbicide Use in an Agricultural Soil. Front. Microbiol., 14 June 2019. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01319

Darwin R.F.,Tsigas M., Lewandrowski J., Raneses A. (1995). World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptations. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Economic Research Service, Economic Report No. 703, 1995. Available online: http://www.ers.usda.gov (accessed on 9 September 2013).

Di Paola, A., Caporaso, L., Di Paola, F., Bombelli, A., Vasenev, I., Nesterova, O. V., ... & Valentini, R. (2018). The expansion of wheat thermal suitability of Russia in response to climate change. Land use policy, 78, 70-77.

Di Vittorio A.V., Kyle P., Collins W.D. (2016). What are the effects of Agro-Ecological Zones and land use region boundaries on land resource projection using the Global Change Assessment Model? Environmental Modelling & Software 85 : 246-265.

Doran, J.W., Parkin, T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA, Madison, WI, pp. 3–21.

Dregne,H.E.,& Chou,N.T.(1992). Global desertification dimensions and costs. Degradation & Restoration of Arid Lands,73-92.

Dudley, N., & Stolton, S. (2008). Defining protected areas: an international conference in Almeria, Spain. IUCN, Gland.

Dudley, N., Stolton S., Belokurov A., Krueger L., Lopoukhine N., MacKinnon K., Sandwith T., Sekhran N. (2010). Natural Solutions: Protected areas helping people cope with climate change, IUCN-WCPA, TNC, UNDP, WCS, The World Bank and WWF, Gland, Switzerland, Washington DC and New York, USA.

Duniway, M. C., A. A. Pfennigwerth, S. E. Fick, T. W. Nauman, J. Belnap, N. N. Barger. (2019). Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world. Ecosphere 10(3). e02650. 10.1002/ecs2.2650

Erb, K.-H., C. Lauk, T. Kastner, A. Mayer, M. C. Theurl, and H. Haberl (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nat. Commun.*, 7.

Ericson JP, Vörösmarty CJ, Dingman SL, Ward LG, Meybeck M (2006). Effective sea- level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. Global Planet Change 50:63–82

European Court of Auditors (2018). *Desertification in Europe. Background paper.* 15 pp

Falloon P, Smith P, Betts R, Jones CD, Smith J, Hemming D, Challinor A (2009). Chapter 5. Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Fluxes from Cropland Soils – Climate Opportunities and Threats. S.N. Singh (ed.), *Climate Change and Crops*, Environmental Science and Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 8-111. 1 DOI 10.1007/978-3-540-88246-6 5

FAO and ITPS (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

FAO (2015). Partenariat mondial sur les sols - Charte mondiale des sols. Trente-neuvième session. Rome, 6-13 juin 2015. C 2015/31. http://www.fao.org/3/a-mn442f.pdf

FAO (2018). The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Rome. 224 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Field, C.B., Campbell, J.E., & Lobell, D.B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. Trends in Ecology & Evolution, 23(2), 65e72.

Fischer, G., Shah, M. M., & Van Velthuizen, H. T. (2002). Climate change and agricultural vulnerability. Special report, prepared by IIASA as a contribution to the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg 2002. 152 p.

Fischer G, Hizsnyik E, Prieler S, Wiberg D. (2010). Scarcity and abundance of land resources: competing uses and the shrinking land resource base. SOLAW Background Thematic Report. TR02 - FAO.

Fischlin, A., G.F. Midgley, J.T. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M.D.A. Rounsevell, O.P. Dube, J. Tarazona, A.A. Velichko (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 211-272.

Fontaine, S., Bardoux, G., Abbadie, L., and Mariotti, A. (2004). Carbon input to soil may decrease soil carbon content, Ecol. Lett., 7, 314– 320, doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00579.x

Gibbs, H. K., Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. Applied Geography, 57, 12–21.

Gomiero T (2016). Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security: Reviewing a Complex Challenge, review. *Sustainability* 2016, *8*, 281 ; doi:10.3390/su8030281 www.mdpi.com/journal/sustainability

Grimm N.B., Faeth S.H., Golubiewski N.E., Redman C.L., Wu J., Bai X., Briggs J.M. (2008) Global change and the ecology of cities. Science 319(5864): 756–760.

Hamidov A, Helming K, Bellocchi G, Bojar W, Dalgaard T, Ghaley BB, Hoffmann C, Holman I, Holzkämper A, Krzeminska D, Kværnø SH, LehtonenH, Niedrist G, Øygarden L, Reidsma P, Roggero PP, Rusu T, Santos C, Seddaiu G, Skarbøvik E, Ventrella D, Żarski J, Schönhart M (2018). Impacts of climate change adaptation options on soil functions: A review of European case-studies. *Land Degrad Dev*. 2018;1–12.

Herrmann, S. M., G. G. Tappan (2013). Vegetation impoverishment despite greening: A case study from central Senegal. J. Arid Environ., 90 : 55–66.

Hinkel J., Lincke D., Vafeidis A.T., Perrette M., Nicholls R.J., Tol R.S.J., Marzeion B., Fettweis X., Ionescu C., Levermann A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. PNAS 111-9 : 3292–3297. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1222469111

Ibarrola Rivas M.J., Nonhebel S. (2016). Assessing changes in availability of land and water for food (1960–2050): An analysis linking food demand and available resources. Outlook on Agriculture Vol. 45(2) 124–131

IPBES (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration. 965 pages.

IPCC (2019a). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V.

Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

IPCC (2019b). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Izaurralde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., Jakas, M. C. Q. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, *192*(3–4), 362–384

Juliá R., Duchin F. (2013). Land Use Change and Global Adaptations to Climate Change. Sustainability 5 : 5442-5459. doi:10.3390/su5125442.

Kassa H, Dondeyne S, Poesen J, Frankl A, Nyssen J (2017). Transition from forest-based to cereal-based agricultural systems: a review of the drivers of land use change and degradation in southwest Ethiopia. Land Degrad. Develop. 28: 431–449

King M, Altdorff D, Li P, Galagedara L , Holden J, Unc A (2018). Northward shift of the agricultural 21th-century global climate change. Scientific Reports *8:7904*

Lal R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability 7: 5875-5895.

Lal, R. (2008). Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *81*(2), 113–127.

Lambin, E. F., Gibbs, H. K., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., et al. (2013). Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. Global Environmental Change, 23(5) : 892-901.

Lambin, E.F., Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. PNAS 108 : 3465–3472.

Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science 47, 425–437

Le Q. B., Nkonya E., Mirzabaev A. (2016). Biomass Productivity-Based Mapping of Global Land Degradation Hotspots. Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development, Springer International Publishing, Cham, 55–84.

Liu Y., He N., Wen X., Sun X., Yu G., Liang L., Schippe L.A. (2018). The optimum temperature of soil microbial respiration: Patterns and controls. Soil Biology and Biochemistry 121: 35–42

Lorenz K., Lal R. (2016). Soil Organic Carbon – An Appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework? (S. M. Starke & K. Ehlers, Eds.). Retrieved from http://www.umweltbundesamt.de/publikationen .

Malek Z, Verburg PH, Geijzendorffer IR, Bondeau A, Cramer W (2018). Global change effects on land management in the Mediterranean region. Global Environmental Change 50 (2018) 238–254

Mc Bratney, A. B., Field, D. J., Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213: 203-213.

MEA (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington DC: Millennium Ecosystem Assessment.

Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., *et al.* (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, *292*, 59–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma2017.01.002.

Mori S., Kato M., Ido T. (2010). GISELA – GIS-based evaluation of land use and agriculture market analysis under global warming. Applied Energy 87 : 236–242.

Nyawira SS, Nabel JEMS, DonA, Brovkin V, Pongratz J (2016). Soil carbon response to land-use change: Evaluation of a global vegetation model using meta-data. Biogeosciences Discuss., doi:10.5194/bg-2016-161

Oldeman, D.C., T.A. Hakkeling, W.G. Sombrock (1991). World Map of the Status of Human Induced Soil Degradation: An Explanatory Note. The Netherlands and Nairobi International Soil Reference and Information Centre and UN environment program

Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. SOIL, 5, 15–32 https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019

Perrette M, Landerer F, Riva R, Frieler K, Meinshausen M (2013). A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties. Earth System Dynamics 4(1):11–29.

Prince, S., Von Maltitz, G., Zhang, F., Byrne, K., Driscoll, C., Eshel, G., Kust, G., Martínez-Garza, C., Metzger, J. P., Midgley, G., Moreno-Mateos, D., Sghaier, M., Thwin, S. (2018). Chapter 4: Status and trends of land degradation and restoration and associated changes in biodiversity and ecosystem fundtions. In IPBES (2018): The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem services, Bonn, Germany, pp. 315-496.

Ramankutty N, Evan AT, Monfreda C, Foley JA (2008). Farming the planet: 1. Geo- graphic distribution of global agricultural lands in the year 2000. Glob Biogeochem Cycles 22(1). GB1003. doi:10.1029/2007GB002952

Ramankutty N, Foley JA, Norman J, Mcsweeney K (2002). The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Global Ecology & Biogeography* 11, 377– 392

Reyer, C. P. O., Leuzinger S., Rammig A., Wolf A., Bartholomeus R.P., Bonfante A., de Lorenzi F., Dury M., Gloning P., Abou Jaoudé R., Klein T., Kuster T. M., Martins M., Niedrist G., Riccardi M., Wohlfahrt G., de Angelis P., de Dato G., François L., Menzel A., Pereira M. (2013). A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. Glob. Chang. Biol., 19 : 75–89.

Rojas M., Lambery F., Ramirez-Villegas J., Challinor A.J. (2019). Emergence of robust precipitation changes across crop production areas in the 21st century. PNAS :1-6.

Roudart L. (2010).Terres cultivables et terres cultivées : apports de l'analyse croisée de trois bases de données à l'échelle mondiale. Etude n° 8 financée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche sur le programme 215, action 2, sous action 22. 59pp. NESE n° 3 4, décembre 2010 pp. 57-95. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_nese101234A3.pdf

Schmitz C, van Meijl H, Kyle P, Nelson GC, Fujimori S, et al. (2014). Land-use change trajectories up to 2050: insights from a global agro-economic model comparison. Agricultural Economics 45: 69–84.

Schuur, E.A.G., Bockenheim, J.,Canadell, J.P., Euskirchen, E., Field, C.B., Goryachkin, S.V., Hagemann, S., Kuhry, P., La eur, P.M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F.E., Rinke, A., Romanovsky, V.E., Shiklomanov, N., Tarnocai,C., Venevsky, S., Vogel, J.G., and Zimov, S.A. (2008). Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *Bioscience*, 58(8): 701-714

Serdeczny, O., Adams S., Baarsch F., Coumou D., Robinson A., Hare W., Schaeffer M., Perrette M., Reinhardt J. (2017). Climate change impacts in Sub-Saharan Africa: from physical changes to their social repercussions. Reg. Environ. Chang., 17 : 1585–1600.

Seto KC, Fragkias M, Güneralp B, Reilly MK (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. PLoS ONE 6(8): e23777.

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

SoCo Project Team (2009). Addressing soil degradation in EU agriculture-relevant processes, practices and policies. Report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'. Geertrui Louwagie, Stephan Hubertus Gay, Alison Burrell *Editors. JRC*. EUR 23767 EN. 330 pp.

Thebo AL, Drechsel P, Lambin EF (2014). Global assessment of urban and peri-urban agriculture: Irrigated and rainfed croplands. Environ Res Lett 9(11):114002.

Todd-Brown K. E. O., Randerson J. T., Hopkins F., Arora V., Hajima T., Jones C., Shevliakova E., Tjiputra J., Volodin E., Wu T., Zhang Q., Allison S. D. (2014). Changes in soil organic carbon storage predicted by Earth system models during the 21st century. Biogeosciences, 11, 2341–2356

Turetsky, M. R., Kane, E. S., Harden, J. W., Ottmar, R. D., Manies, K. L., Hoy, E., and Kasischke, E. S. (2011). Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peat- lands, Nat. Geosci., 4, 27–31, 2011.

Webb N.P. Marshall N.A., Stringer L.C., Reed M.S., Chappell A., Herrick J.E. (2017). Land degradation and climate change: building climate resilience in agriculture Front Ecol Environ 15(8): 450–459, doi: 10.1002/fee.1530.

Williams, J. R. (1995). The EPIC model. In V. P. Singh (Ed.), *Computer models of watershed hydrology* (pp. 909–1000). Fort Collins, CO: Water Resources Publisher

Winkler F.E., Belnap J., Hoover D., Reed S.C., Duniway M.C. (2019). Shrub persistence and increased grass mortality in response to drought in dryland systems. Global Change Biology. doi: 10.1111/gcb.14667

Yokoki H, Tamura M, Yotsukuri M, Kumano N, Kuwahara Y (2018). Global distribution of projected dynamic ocean sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise. CLIVAR Exchanges 74:36–39

Zabel F., Putzenlechner B., Mauser W. (2014). Global Agricultural Land Resources – A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. PLoS ONE 9(9): e107522. doi:10.1371/journal.pone.0107522.

Zdruli P., Lamaddalena N. (2015). Mediterranean Region: Too many people, too little land. Terre et mer : ressources vitales pour la Méditerranée. Edt La bibliothèque de l'Iremmo. Collection dirigée par Pierre Blanc et Bruno Péquignot. L'Harmattan : 13-22.

Zhang X., Cai X. (2011). Climate change impacts on global agricultural land availability. Environ. Res. Lett. 6 (2011) 014014 (8pp)

Zhao, T., A. Dai (2015). The Magnitude and Causes of Global Drought Changes in the Twenty-First Century under a Low–Moderate Emissions Scenario. J. Clim., 28 : 4490–4512.

Chapitre 7. Éclairages complémentaires

7.1. Effets du changement climatique sur les pertes de récoltes causées par les bioagresseurs des cultures : focus sur le blé d'hiver

Philippe Debaeke, Serge Savary, Laetitia Willocquet

Cet éclairage complémentaire cherche à analyser comment le changement climatique pourrait affecter la santé des plantes cultivées en jouant sur les épidémies de pathogènes et les infestations d'adventices et de ravageurs, avec des conséquences sur les rendements et les volumes de production. Les cultures sont exposées à un cortège de bioagresseurs (champignons, virus, adventices, ravageurs) dont la biologie est extrêmement diverse (cycles de reproduction, préférences écologiques…). Les maladies infectieuses couvrent l'ensemble des maladies causées par les oomycètes, les champignons, les bactéries, et les virus (et leurs vecteurs éventuels) ; les ravageurs incluent les arthropodes et les nématodes.

La diversité des agents pathogènes *s.l* s'accompagne de réponses aux manifestations du changement climatique et aux pratiques culturales également très variables. De plus, ces organismes ont co-évolué avec leurs plantes hôtes et les systèmes de culture mis en œuvre, s'adaptant de fait progressivement aux grandes tendances d'évolution du climat. Ainsi, les dynamiques des populations et les aires de répartition des bioagresseurs ont déjà été modifiées par ces évolutions.

La réponse des bioagresseurs au changement climatique résulte de deux groupes de processus distincts : (i) les épidémies et dynamiques de populations, qui se traduisent par des niveaux de dégâts (symptômes) ou d'infestation et (ii) les pertes de récolte ou dommages pour les cultures (baisse du rendement et/ou altération de la qualité technologique, nutritionnelle ou sanitaire des produits récoltés). La notion de « pression de bioagresseurs » inclut ces deux éléments qui sont liés, *via* le développement et la croissance du peuplement végétal. Ce sont à l'évidence les pertes de récoltes qui présentent un intérêt opérationnel en termes d'impacts sur les rendements et le niveau de production agricole. En agronomie, les pathogènes, les ravageurs et les adventices constituent ensemble les facteurs de réduction biotiques des performances (dont le rendement), par opposition aux facteurs de limitation des performances végétales (et du rendement) qui sont abiotiques (nutriments, eau) (van Ittersum et Rabbinge, 1997).

Les changements d'environnements (climat, systèmes de culture) agissent différemment sur ces deux groupes de processus. De ce fait, cette section tente d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes : le changement climatique va-t-il, et avec quelle ampleur, modifier les épidémies ? et pour un même niveau d'épidémie, doit-on s'attendre à des impacts négatifs sur la quantité et la qualité des récoltes ?

Les effets du changement climatique sur les bioagresseurs sont à la fois directs (effets du climat) et indirects (*via* les situations de production ; Savary *et al.,* 2011 a-b ; 2017a ; West *et al.,* 2012). Les effets directs correspondent aux conséquences de variations du micro-environnement (ex. température) sur les cycles (ex. taux d'infection, taux de reproduction). S'y ajoutent des effets indirects dus à l'adaptation progressive (incrémentale) des situations de production au changement climatique : par exemple, la distribution des dates de semis dans un territoire ou le niveau d'irrigation (volume/fréquence) peuvent influer sur les dynamiques des bioagresseurs.

En ce qui concerne les analyses expérimentales sur les niveaux de dégâts (incidence, sévérité) causées par les pathogènes, Juroszek et von Tiedemann (2013) évoquent deux types d'approches :

- Monofactorielles : par exemple, le CO_2 augmente le niveau de certaines maladies : cas de la fusariose et de la septoriose du blé (Váry *et al.,* 2015) ;

- Multifactorielles : il existe de fortes interactions entre facteurs (O_3, CO_2, température) pour plusieurs maladies du blé, avec parfois un effet net non significatif mais des effets individuels des facteurs significatifs (Mikkelsen *et al.*, 2015)

Par ailleurs, plusieurs analyses s'appuient sur la modélisation de la dynamique des maladies : il s'agit de manière générale d'utiliser des modèles d'épidémiologie dont les entrées correspondent aux données climatiques estimées dans le cadre de scénarios de changement climatique.

Plusieurs revues récentes (Juroszek et von Tiedemann, 2015 ; Newberry *et al,* 2016) portent principalement sur les effets directs du changement climatique sur les dynamiques de maladies (et non sur les pertes de récolte qui peuvent en résulter). La prise en compte des effets directs et indirects sur les niveaux de dégâts (sur les épidémies) causées par les pathogènes relève de synthèses qualitatives fondées sur les caractéristiques épidémiologiques des pathogènes (Royaume-Uni, West *et al.,* 2012) mais également d'études de cas : ex. les maladies du blé à l'horizon 2050 par l'analyse de scénarios (Savary *et al,* 2017b).

La question de l'émergence (ou de la ré-émergence) de maladies et de ravageurs dans certaines zones géographiques est intuitivement associée au changement climatique. Or les "invasions biologiques" sont principalement liées aux échanges mondiaux et peu aux variations climatiques (Anderson *et al.,* 2004). Les émergences (ou ré-émergences) soudaines sont souvent causées par des modifications de la structure génétique des populations pathogènes liées à des facteurs anthropiques (ex. pyriculariose du blé ; rouille noire du blé, rouille jaune du blé; Singh *et al,* 2016). Le changement climatique a des effets plus graduels sur les populations, permettant l'établissement de bioagresseurs dans des régions jusqu'alors peu propices (ou leur déclin dès lors que les conditions deviennent durablement défavorables) (Bebber *et al,* 2013).

Concrètement, les invasions biologiques impliquant des pathogènes ou des ravageurs, dont la composition génétique évoluerait, ne peuvent pas être prédites. Tout au plus peut-on identifier des zones de "risque" (d'invasion – mais non nécessairement de pertes de récoltes) avec différentes approches empiriques (du type « modèle de niche écologique »). Ces invasions biologiques peuvent prendre de court les systèmes de protection des plantes actuellement en place, spécialement lorsqu'on considère les programmes (internationaux, nationaux) d'amélioration des plantes, de même que les programmes (nationaux) de multiplication de semences.

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

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

La question, pourtant centrale, de l'effet du climat sur les pertes de récoltes (dommages) a été très peu traitée. S'agissant des *pertes de récolte*, on sait par exemple qu'un stress hydrique est susceptible d'aggraver l'effet physiologique de certaines maladies (ex. rouille brune en blé) et qu'une épidémie précoce de rouille jaune peut induire une croissance racinaire réduite, augmentant la vulnérabilité du peuplement à un stress hydrique ultérieur. Pour autant, la physiologie de la plante et du peuplement malades ne sont pas des objets de recherche actifs aujourd'hui.

L'analyse de terrain se heurte à la rareté des données disponibles et à la confusion d'effets, car les pratiques agricoles évoluent pour faire face au renforcement des contraintes climatiques. Dans la plupart des cas, les productions végétales ne sont pas exposées à un bioagresseur isolé, mais à un ensemble de pathogènes, d'adventices et de ravageurs, correspondant à un profil de dégâts (Savary *et al.,* 2017a) qui est susceptible d'évoluer sous l'effet du changement climatique.

Des modèles mécanistes (publiés, accessibles, validés) permettent toutefois de simuler (1) des épidémies pour différentes maladies (notamment sur blé), et (2) des pertes de récoltes occasionnées par ces maladies, prises isolément ou en

combinaisons (Willocquet *et al.*, 2008 ; Savary *et al.*, 2015 ; Newberry *et al.*, 2016 ; Donatelli *et al.*, 2017 ; Willocquet *et al.*, 2018). On peut s'appuyer sur ces modèles pour explorer des scénarios de santé végétale combinant des niveaux d'épidémies donnés associés à des contextes climatiques et agronomiques donnés. Cela nécessite (1) une anticipation des dynamiques de dégâts (épidémies, infestations); (2) une anticipation des situations de production du futur (climat et pratiques) ; (3) une quantification des performances en l'absence et en présence des dommages anticipés. Il est en revanche plus difficile de prédire des invasions biologiques. Tout au plus peut-on identifier des zones à « risque d'invasion » à l'aide de différentes approches empiriques (comme les modèles de niche utilisés en écologie).

La diversité des productions végétales conjuguée à celle des bioagresseurs ne permet pas cependant d'apporter de réponse générale aux questions posées plus haut. Des travaux de recherche ponctuels conduits sur le blé, culture majeure en Europe et dans le Monde (*cf.* Encadré 1), ont permis d'éclairer et de quantifier les effets du climat et de ses variations sur quelques éléments des cycles parasitaires, avec une portée néanmoins limitée pour expliquer les épidémies. La revue de littérature réalisée dans le cadre de cette étude n'a pas mis en évidence de travaux dédiés à l'analyse expérimentale, quantitative, des effets du changement et de la variabilité climatique sur les épidémies, qu'il s'agisse des dynamiques saisonnières au sein du peuplement cultivé et à l'échelle des paysages, ou des dynamiques inter-saisonnières qui conditionnent l'inoculum primaire.

Encadré 7-1. Évolution passée de la santé du blé au niveau mondial

La santé du blé a très fortement évolué au cours des deux décennies passées. Des épidémies très graves de fusariose (épis) ont eu lieu dans le Mid-West des USA, puis en Europe. Ces épidémies ont causé des pertes de récolte très lourdes.

De nouvelles souches de rouille noire sont apparues en Afrique orientale, et ont migré vers le Moyen-Orient. Localement (en Afrique) les pertes de récoltes ont été importantes, mais un programme de sélection international accéléré semble avoir produit des variétés de blé avec une résistance satisfaisante. Cependant, ces dernières années, des épidémies ponctuelles de rouille noire se sont manifestées en Italie et en Allemagne; des cas ont été rapportés en Suède et au Royaume-Uni.

En Europe (et spécialement en France), mais aussi dans le MidWest des USA, en Inde, et en Australie, des épidémies importantes de rouille jaune se sont produites au cours des 20 dernières années. Ces épidémies de rouille jaune sont associées à des pathotypes nouveaux, plus agressifs et virulents (USA, Europe, Australie) mais aussi, adaptés à des conditions climatiques plus chaudes (Europe, USA).

Par ailleurs, ces dernières années, des évènements extraordinaires se sont produits : le blast du blé, causé par un pathotype spécifique de Pyricularia, qui provoque des épidémies épisodiques en Amérique Latine, est apparu en Asie du Sud, à la suite d'une introduction accidentelle. On ignore l'expansion actuelle exacte de l'épidémie.

Tout ne va pas nécessairement dans le sens d'une augmentation des épidémies : on constate parallèlement un déclin progressif, et très important, de l'oïdium, autrefois considéré comme une priorité de protection. Néanmoins, la septoriose (Zymoseptoria) et la rouille brune demeurent les maladies les plus fréquentes et les plus dommageables du blé, en Europe et en France, comme dans beaucoup de régions du monde.

Les évolutions génétiques des populations de pathogènes ne peuvent pas être prédites facilement, comme le montrent des cas récents sur blé: rouille jaune, pyriculariose du blé, rouille noire (Singh *et al,* 2016). Comme explicité plus haut, la prévision des effets du changement climatique sur les populations de bioagresseurs doit combiner plusieurs sources d'incertitudes liées (1) aux scénarios climatiques, (2) à leurs effets sur les systèmes de culture (incluant les stratégies d'adaptation) et (3) aux effets des scénarios (climatiques et systèmes de cultures) sur les bioagresseurs.

Pour autant, des travaux récents à l'échelle mondiale (Savary *et al*, 2019) indiquent que pour le blé, le soja, le riz, le maïs et la pomme de terre, la plupart des pertes de récoltes dues à un seul bio-agresseur (pathogène ou ravageur) sont actuellement de l'ordre de 0-5%, une plus petite fraction, de l'ordre de 5-20%, et une fraction mineure avec des valeurs supérieures à 20%. Ce type de classes pourrait être utilisé, sous l'hypothèse que les instruments de gestion de la protection des cultures du futur aient une efficience constante.

En outre, on peut considérer que l'instrument privilégié d'une adaptation efficace restera la sélection variétale, avec des variétés résistantes aux nouveaux profils de dégâts (Mundt, 2014). Dans la mesure où les variations climatiques interannuelles actuelles (+ également variations économiques et technologiques) apparaissent être du même ordre de grandeur que les variations climatiques estimées dans les scénarios climatiques pour les prochaines décennies, l'adaptation

dans le cadre du changement climatique ne semble pas plus problématique que dans les conditions actuelles (Juroszek et von Tiedemann, 2011). Il demeure cependant que le nombre d'invasions biologiques (incluant les maladies émergentes) a considérablement augmenté récemment (Anderson *et al.,* 2004), ce qui, superposé à une évolution des climats, pose de nouveaux problèmes (Savary *et al.,* 2011 a-b).

Conclusions opérationnelles pour l'étude

Si la littérature tend à conclure à la plus grande vulnérabilité aux bioagresseurs des systèmes agricoles soumis au changement climatique (Mbow *et al.,* 2019), cette conclusion (qualitative) s'appuie principalement sur des études d'impacts théoriques, peu nombreuses et concentrées sur quelques espèces cultivées et quelques pathogènes. Les tendances qu'elles énoncent sont incertaines : d'une part, les modèles de prévision des épidémies et pertes de récolte sont incomplets et peu nombreux ; d'autre part, les effets prédits sont parfois opposés pour une même culture selon les pathogènes considérés, et les tendances mises en évidence sont variables selon les zones géographiques et les horizons temporels. Enfin, ces prévisions n'intègrent pas explicitement les adaptations des systèmes de culture.

Les obstacles mis en évidence dans la revue de littérature conduite dans le cadre de la présente étude conduisent donc à conclure que l'on ne peut chiffrer de façon réaliste les pertes attribuables aux bioagresseurs à l'horizon 2050 pour l'ensemble des 33 cultures et des 21 régions considérées dans le modèle GlobAgri-AE2050. En effet, si des projections quantifiées de pertes de récoltes attribuables aux bioagresseurs existent dans la littérature, elles sont ponctuelles, ciblées sur des cultures en particulier (notamment le blé), et surtout elles sont valables à des échelles géographiques très inférieures à celles considérées dans la présente étude. De plus, il n'a pas été possible, dans le temps imparti à l'étude, d'instruire la possibilité de mobiliser ces travaux quantitatifs pour élaborer une hypothèse alternative spécifique sur le rendement du blé en France (par exemple).

7.2. Quantification du progrès génétique sur les rendements des cultures : exemple du blé et du maïs

Auteurs : Jacques Le Gouis, Alain Charcosset

7.2.1. Rappels (introduction)

Définition du progrès génétique (sélection végétale)

Le progrès génétique correspond à une augmentation par unité de temps d'un critère, par exemple du rendement en grain, des variétés disponibles pour les agriculteurs. Il est dans le cas du rendement qui intéresse cette expertise scientifique, calculé par une régression linéaire entre le rendement en grain et la date d'inscription d'une variété. Il est classiquement exprimé soit en q (ou dt) ha^{-1} an^{-1}, soit en % an^{-1}. Les deux manières de l'exprimer posent des soucis lors de la comparaison entre études :

- q ha^{-1} an^{-1} : les humidités du grain peuvent être différentes selon les études (0% à 15%), ne pas être précisées ou même ne pas être mesurées. Un progrès génétique calculé à partir de rendements à 15% sera 15% supérieur à un progrès génétique calculé à partir de rendements à 0%. Mais comparé avec la variation entre études, ce biais ne semble pas trop fort.
- % an^{-1} : il est calculé à partir du progrès génétique en q ha^{-1} an^{-1} divisé par une référence. La référence peut être le rendement moyen des variétés de l'étude, la variété la plus ancienne, un témoin, une année de référence ou ne pas être précisé. Le progrès génétique sera alors très dépendant de cette référence, supérieur si la référence est la variété la plus ancienne et plus faible si la référence est la moyenne des variétés. Ce biais peut être très fort, mais il souvent impossible de refaire les calculs car les données brutes ne sont pas disponibles. C'est une raison pour laquelle il est souvent plus facile de comparer entre études le progrès génétique en q ha^{-1} an^{-1}.

Méthodes utilisées pour l'évaluer (typologie)

Trois types d'études peuvent identifiées aussi bien en blé qu'en maïs :

- (type 1) Des études de progrès génétique basées sur des séries variétales (variétés) représentant différentes périodes de sélection et cultivées dans les mêmes environnements parfois en réseau. Cela permet de comparer les variétés dans le même environnement agronomique et climatique. Mais les séries variétales sont souvent petites, le nombre d'environnements restreint (combinaison année x lieu x itinéraire technique) et les variétés anciennes ne sont pas cultivées dans l'environnement dans lequel elles ont été sélectionnées (notamment changement du contexte biotique).

- (type 2) Des études de progrès génétique basées sur des essais variétaux (essais) réalisés à différentes périodes. Les séries variétales et les environnements sont souvent nombreux car fondés sur les réseaux de sélection, d'inscription ou de post-inscription. Mais la connexion entre les essais, pour corriger correctement les effets années (et l'évolution des conduites), peut être difficile (et basée sur la ou les mêmes variétés, ou sur des variétés différentes en fonction des périodes). En conditions « non traité fongicides », la perte de résistance aux maladies des témoins peut poser problème : si le rendement des témoins à tendance à baisser, le progrès génétique sera surestimé. De même, le progrès génétique peut être calculé sur toute la série ou seulement les n meilleures, avec des résultats un peu différents.

- (type 3) Des études d'évolution des rendements nationaux. C'est le plus facile à obtenir car il peut être calculé de façon homogène à partir des bases de données comme FAOstat (www.fao.org/faostat/). Mais ce calcul intègre le progrès génétique et l'effet de l'environnement au sens large (environnement biotique et abiotique ainsi que celui des techniques de culture). Il est alors difficile de faire la part du seul progrès génétique. Il dépend aussi de la qualité et fiabilité des données présentes dans la base.

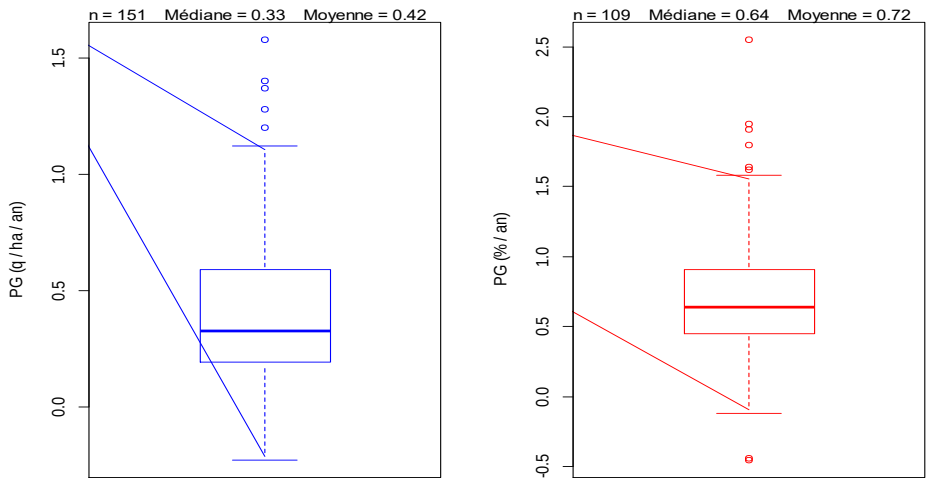
7.2.2. Quantification du progrès génétique sur les données historiques

Données générales

Concernant le **blé**, sur la base des études recensées dans l'Annexe 7-1 et en essayant d'homogénéiser les unités quand c'est possible (15% d'humidité pour le calcul du progrès en q ha^{-1} an^{-1} et en prenant comme référence la moyenne des variétés pour le calcul du progrès en % an^{-1}), le progrès génétique moyen pour le blé dans le monde est de :

- 0,42 q ha^{-1} an^{-1} avec 50% des valeurs entre 0,19 et 0,59
- 0,72 % an^{-1} avec 50% des valeurs entre 0,45 et 0,91

Figure 7-1. Boxplot des progrès génétiques mesurés sur le blé tendre en q ha^{-1} an^{-1} et en % an^{-1}. Distribution réalisée à partir de 75 études (*cf.* liste de l'Annexe 7-1)



Sadras et Lawson (2011) montrent une forte relation entre progrès génétique (kg ha^{-1} an^{-1}) et moyenne des environnements dans lequel il est testé. Nous retrouvons cette relation (Figure 7-2) avec les essais variétaux (type 1) recensés dans le cadre de la présente étude. Cette relation n'existe pas avec le progrès génétique exprimé en %.

Figure 7-2. Pour le blé : (a) Figure originale de Sadras et Lawson (2011) et (b) relation entre progrès génétique et moyenne des environnements dans lesquels il est testé pour les essais variétaux (de type 1) recensés dans le cadre de l'étude AE2050 (*cf.* Annexe 7-1)

La régression linéaire explique 44% de la variance. Est aussi tracée une régression polynomiale de degré 2.

(a)

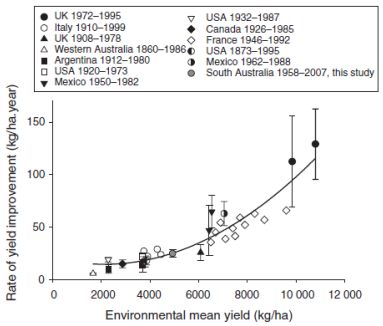
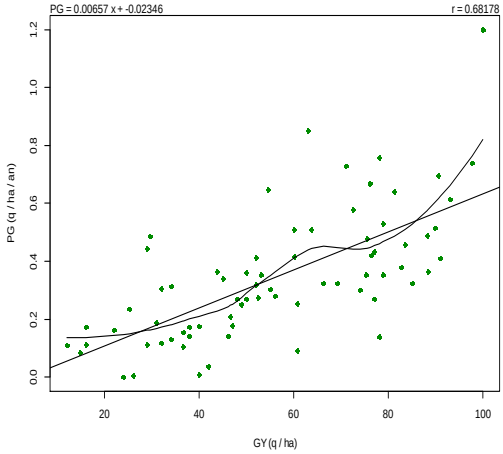


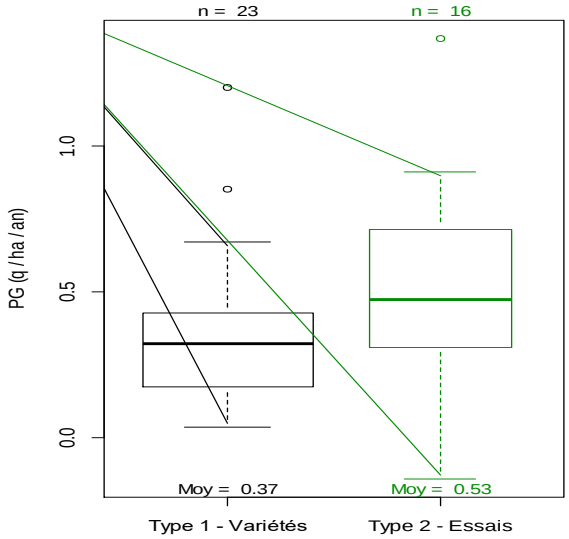
Fig. 5. Comparison of the rate of yield improvement for South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007 (red symbol) and the expected improvement as related to environmental mean yield (solid line). Sources of data used to derive the benchmark function, in the same order as the symbols: Shearman *et al.* (2005), Giunta *et al.* (2007), Austin *et al.* (1980), Siddique *et al.* (1989), Slafer and Andrade (1989), Jensen (1978), Waddington *et al.* (1986), Cox *et al.* (1989), Hucl and Baker (1987), Brancourt-Hulmel *et al.* (2003), Donmez *et al.* (2001), Sayre *et al.* (1997). Error bars are standard errors of slopes of linear regressions.

(b)



Une rapide comparaison des deux méthodes d'estimation du progrès génétique sur la base de pays dans lesquels les deux types d'études ont été conduites semble montrer une estimation en moyenne un peu supérieure pour les essais de type 2, mais la différence est faible (Figure 7-3). Cela pourrait être dû, comme expliqué en introduction, à la méthode utilisée pour établir la connexion entre des essais réalisés au cours d'années différentes.

Figure 7-3. Comparaison des estimations du progrès génétique du blé avec les séries variétales de type 1 et les essais variétaux de type 2 pour des pays dans lesquels les deux types d'études sont disponibles (réalisée à partir des références listées en Annexe 7-1)



Il est à noter qu'il peut exister une très grande variabilité entre études réalisées dans un même pays ; en effet, celui-ci, en fonction de sa taille, peut regrouper des environnements très différents. Ainsi, par exemple, si on considère les études pour la France en se limitant aux études en situations optimales (forte fertilisation N + traitements fongicides) :

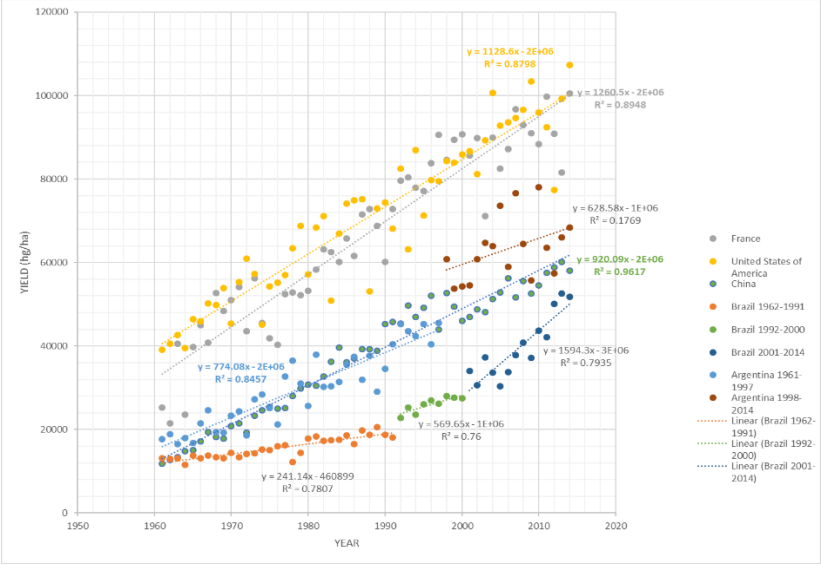
- 10 études (pas toutes indépendantes, parfois les jeux de données sont en partie communs), différentes zones, différents réseaux, différentes méthodes
- Estimation moyenne de 0,62, médiane de 0,55 q ha^{-1} an^{-1}
- Variation de 0,30 à 1,37 q ha^{-1} an^{-1}

En **maïs**, on ne dispose pas de synthèse globale récente. Une étude de Pioneer présentée par Huffman *et al.* (2018)[1] fournissent des tendances de productivité) et gains génétiques (Figure 7-4) mais cite trop peu ses sources.

La requête « (maize or corn) * genetic gain" dans le WOS fournit 29 articles. La requête « (maize or corn) genetic (gain* or improvement) » en livre 77, mais beaucoup traitent de programmes de sélection spécifiques.

Si l'on exclut l'Afrique de l'Ouest, le progrès génétique en maïs varie entre 0,06 t ha^{-1} an^{-1} (Chine, USA conditions défavorables) et 0,100-0,110 (Argentine, USA conditions favorables, France) (Tableau de l'Annexe 7-2). Il ne semble pas y avoir de ralentissement clair du progrès génétique dans les études qui l'abordent en tant que tel.
L'évolution des productions nationales peut être supérieure au progrès génétique (USA, Chine) mais aussi inférieure (Argentine, France).

Figure 7-4. Évolution des rendements du maïs pour plusieurs régions du monde



Source : Huffman *et al.* (2018)

Données par région

Selon les bases de données FAOstat (2015-2017) et IndexMundi (www.indexmundi.com/agriculture, 2018), 19 pays représentent 85% de la production de blé, 14 pays 50% des importations (y compris Europe à 27) et 9 pays 93% des exportations (y compris Europe à 27). En croisant les trois informations, cela permet de cibler en priorité une quinzaine de pays. Le tableau de l'Annexe 7-1 présente les études de progrès génétique disponibles, récentes et en conditions « optimales », obtenues par des séries variétales (type 1) et par des essais variétaux (type 2), ainsi que la progression des rendements selon les données FAOstat (type 3). A ce stade, nous ne disposons pas d'étude recensée pour l'Algérie et Ukraine.

En Europe, le progrès génétique est de l'ordre de 0,3-0,4 q ha^{-1} an^{-1} (essais variétaux, type 1). Il est un peu plus faible en Amérique du Nord, Amérique du Sud et Australie, de l'ordre de 0,1-0,2 q ha^{-1} an^{-1}. Il semble un peu plus élevé en Chine avec un progrès de l'ordre de 0,6 q ha^{-1} an^{-1}. Il est plus difficile à estimer en Russie et Ukraine en l'absence d'étude spécifique.

L'évolution des rendements nationaux (type 3) montre une stagnation en Europe et en Inde. Dans les autres pays il est en moyenne de 0,54 et 1,98 soit environ deux fois plus fort que le progrès estimé en q ha^{-1} an^{-1} et quatre fois plus fort que celui estimé en % an^{-1}. Cela traduit à la fois le fait (i) que les rendements nationaux dépendent du progrès génétique, du progrès

des techniques et des changements dans l'environnement et (ii) que les rendements moyens des essais dans lesquels sont estimés les progrès génétiques sont supérieurs aux rendement nationaux.

Études en conditions limitantes des études avec stress maladies, eau ou N

Pour le **blé**, les effets de facteurs spécifiques de l'environnement ont été testés dans quelques études (Figure 7-5) :
- Comparaison « fort et faible apport d'engrais azoté » : les estimations donnent un progrès génétique plus fort en fort apport d'azote :

- 0,22 q ha^{-1} an^{-1} en faible N
- 0,43 q ha^{-1} an^{-1} en fort N

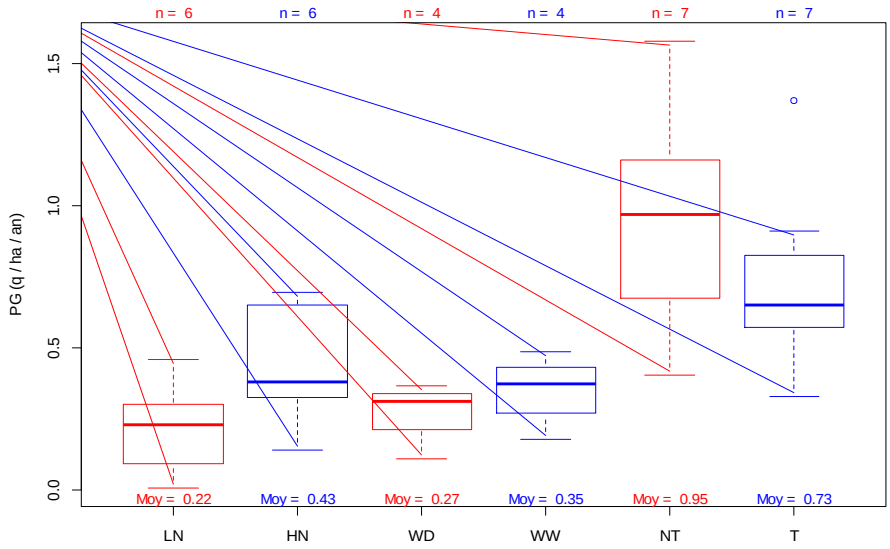
- Comparaison de scénarios de stress hydrique : les estimations donnent un progrès génétique plus fort en « irrigué » mais la différence est faible.

- 0,27 q ha-1 an-1 en « sec »
- 0,35 q ha-1 an-1 en « irrigué »

- Comparaison en traité et non traité fongicide : les estimations donnent un progrès génétique plus fort en conditions « non traité » :

- 0,73 q ha-1 an-1 en traité
- 0,95 q ha-1 an-1 en non traité

Figure 7-5. Comparaison des estimations du progrès génétique du blé avec les séries variétales (type 1) pour différentes conditions: LN et HN = faible et fort apport d'azote, WD et WW = faible et forte disponibilité hydrique, NT et T = non traité et traité fongicides
(réalisée à partir des références listées en Annexe 7-1)



La différence entre les comparaisons T/NT et les deux autres (LN/HN et WD/WW) vient peut-être du fait qu'il y a une sélection forte pour les résistances aux maladies fongiques en blé et que les résistances sont régulièrement contournées (toutes les comparaisons rentrant dans le calcul ont été réalisées en Europe). Il y a par contre peu ou pas de sélection spécifique pour les situations à faible niveau d'azote (études d'ailleurs majoritairement en Europe) et de plus un effet du niveau de rendement moyen comme montré sur la Figure 7-2.

Séparer la période 1995-2018 (changement climatique à l'œuvre) des années plus anciennes (années 60-90)

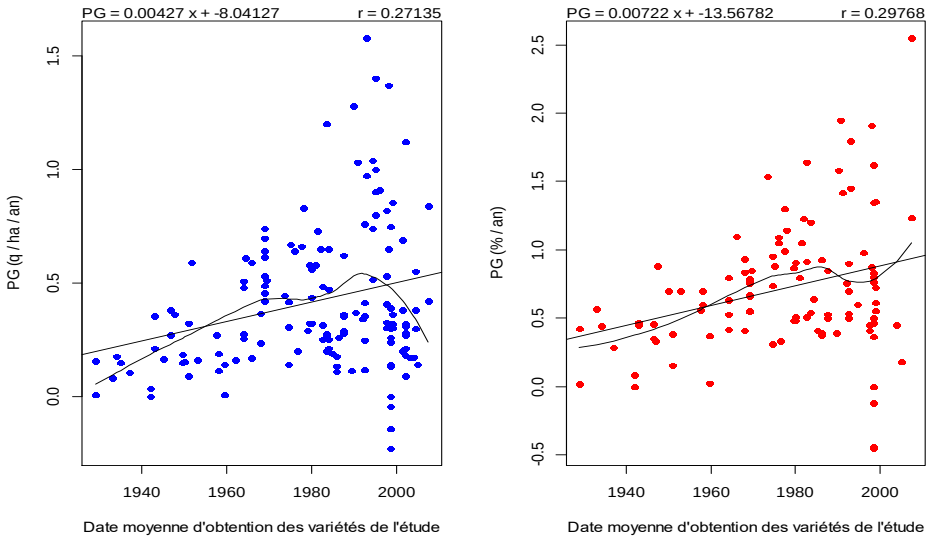
La très grande majorité des études rapportent un progrès génétique significatif pour le **blé** (le plus souvent estimé par une régression linéaire). Mais il est à noter plusieurs études qui mentionnent dans certains environnements soit une absence de progrès (Etats-Unis, Graybosch et Paterson, 2010 ; Inde, Sankaran *et al.*, 2015 ; Roumanie, Mustatea et Saulescu, 2011), soit

un ralentissement du progrès souvent à partir des années 1990 (Argentine, Lo Valvo *et al.*, 2018 ; Brésil, Beche *et al.*, 2014 ; Espagne, Acreche *et al.*, 2008 ; Etats-Unis, Graybosch et Paterson, 2012 ; Pays de Galles, Flohr *et al.*, 2018 ; Turquie, Gummadov *et al.*, 2015).

Pour essayer d'objectiver cette observation, il est possible de mettre en relation le progrès génétique estimé en relation avec la date moyenne d'obtention des variétés de l'étude (calculée par la moyenne entre la date d'obtention de la première et la dernière variété de l'étude). En étant prudent étant donné la dispersion des points, une régression polynomiale tend à montrer un déclin à la fin des années 1990 pour la mesure en q ha^{-1} an^{-1} mais pas pour la mesure en % an^{-1}. On pourrait donc sans doute plutôt interpréter cette observation comme un impact du changement de l'environnement sur les essais dans lesquels les variétés ont été testées (la date moyenne d'obtention des variétés étant corrélée aux années durant lesquelles les expérimentations pour estimer le progrès génétique ont été réalisées).

Figure 7-6. Corrélation entre la date moyenne d'obtention des variétés de blé et les estimations du progrès génétique en q ha^{-1} an^{-1} (A) et en % an^{-1} (B)

L'équation de la régression linéaire et le coefficient de corrélation sont indiqués. Est aussi tracée une régression polynomiale de degré 2.



7.2.3. Peut-on projeter le progrès génétique à l'horizon 2050 sous l'effet du changement climatique ?

Q1 : peut-on espérer un supplément de rendement par le progrès génétique par rapport aux projections (Makowski et al., 2020) qui ne se fondent que sur les effets du changement climatique à 2050 (T, P, CO_2) et sur le rendement actuel (variétés actuelles) estimé par les bases de données nationales ?

A partir du moment où la majorité des études rapportent un progrès génétique (Figure 7-1), il semble raisonnable de compter sur un progrès génétique à l'horizon 2050. Sur la base de la moyenne de ce qui a été observé dans le monde, on pourrait baser un scénario moyen sur un progrès de l'ordre de 0,4 q ha^{-1} an^{-1} et 0,7 en % an^{-1}.

Q2 : peut-on faire l'hypothèse que le progrès génétique se maintiendra selon la même dynamique que celle observée dans les données de la littérature pour les dernières décennies : c'est-à-dire qu'on saura intégrer la variabilité et les tendances climatiques et qu'il n'y aura pas de contre-sélection supplémentaire pour le rendement due à d'autres critères (qualité, résistance aux maladies…) ?

Il semble que la sélection saura intégrer les contraintes moyennes comme elle le fait actuellement. La qualité et les résistances aux maladies sont des critères très forts, au moins dans les systèmes d'inscription européens. La sélection pour la qualité et notamment la concentration en protéines (qui est génétiquement négativement corrélée avec le rendement) a déjà tendance impacter le progrès génétique. D'après Gate (2014) on trouve en France un écart de + 0,2 q ha^{-1} an^{-1} en faveur des blés pour

d'autres usages par rapport aux blés panifiables. Certes il faut bien que la récolte corresponde aux attentes des utilisateurs, mais des recherches ont été initiées pour conserver les propriétés technologiques avec une plus faible teneur en protéines ou adapter les procédés de transformation à une matière première moins riche en protéines. L'augmentation de la concentration en CO_2, des températures plus élevées, des épisodes de sécheresse plus fréquents pourront sans doute être pris en compte car ils impacteront les réseaux d'essais multilocaux et pluriannuels. Il est par contre très difficile pour la sélection de prendre en compte actuellement des évènements rares (comme l'année 2016, avec excès d'eau, faible rayonnement, pression de maladies très forte). Les interactions génotype x environnement sont mal comprises et peu valorisées.

Q3 : peut-on espérer une accélération du progrès génétique par les nouvelles biotechnologies (NBT) ? les NBT permettraient-elles une meilleure adaptation au changement climatique et/ou plus rapidement ?

On peut penser à trois groupes de NBT au sens large :

• Les blés hybrides : les sélectionneurs investissent fortement dans des schémas de sélection hybrides utilisant des solutions chimiques ou génétiques. Un hétérosis, c'est-à-dire la meilleure performance de l'hybride par rapport à ses parents, relativement limité (3-10%) mais constant a été signalé pour le rendement en grain sous des conditions de rendement élevé (par exemple Borghi *et al.,* 1988 ; Oury *et al.,* 1990 ; Longin *et al.*, 2012). Il a également été signalé que les hybrides sont plus stables que les variétés classiques (Muhleisen *et al.,* 2014), ce qui indiquerait une plus grande tolérance aux stress abiotiques. Mais en Europe au moins, à l'inscription et dans les exploitations, les hybrides ont du mal à se démarquer des meilleures lignées. Il est difficile d'estimer le progrès que pourraient apporter les hybrides dans des situations à forte pression biotique ou abiotique mais le prix des semences reste le principal facteur limitant pour leur développement, car le surcoût absorbe presque entièrement le gain procuré par l'hétérosis pour le rendement.

• Les méthodes de sélection assistées par marqueurs ou assimilées (sélection phénomique, Rincent *et al.,* 2018 ; *speed breeding*, Watson *et al.,* 2018) : les sélectionneurs investissent tous fortement dans toutes ces méthodes qui en théorie permettent d'accélérer le progrès génétique (Meuwissen *et al.,* 2001). On peut donc attendre un effet positif de ces méthodes à partir du moment ou des équations de calibration robustes auront été développées, que les interactions génotype x environnement seront mieux prises en compte et que la sélection multi-traits sera intégrée. Ces méthodes peuvent permettre de mieux raisonner les croisements, notamment pour mieux utiliser des ressources génétiques (y compris des blés synthétiques intégrant une nouvelle diversité en reconstituant le génome hexaploïde en croisant des espèces tétraploïdes et diploïdes). Il est difficile de chiffrer cet apport mais il est peu probable que ces techniques se traduisent par une rupture forte des tendances. Selon G. Charmet, « il est difficile de chiffrer cet apport, mais on peut penser que, si la sélection génomique pouvait être généralisée (problèmes de coûts et d'organisation pratique) et combinée à l'accélération des cycles de sélection, elle permettrait sans doute une augmentation significative du progrès génétique par unité de temps ».

• Les méthodes de transformation (notamment édition de gènes) : en principe, la technologie peut être appliquée à tout caractère qualitatif ou agronomique, à condition de connaître en amont les gènes à cibler et les modifications précises nécessaires pour améliorer les allèles. Les preuves de concepts publiées concernent un large éventail de caractères, les plus fréquents étant la résistance aux maladies, la tolérance aux herbicides et la composition des produits récoltés. En dehors du statut réglementaire des plantes obtenues par ces technologies qui soulève de nombreuses questions, il est difficile de chiffrer leur apport possible. On cite la possibilité de modifier rapidement des allèles en linkage ou de modifier en même temps plusieurs gènes (ou gènes homéologues sur le blé héxaploïde). Mais la limite reste quand même les connaissances en amont sur l'effet des gènes et des allèles. De gros projets existent sur l'amélioration de l'efficacité de la photosynthèse (comme la transformation des C3 en C4) ou sur le transfert de la fixation symbiotique de l'azote (Dent et Cocking, 2017) mais des résultats à moyen terme semblent peu probables.

Q4 : y a-t-il des travaux qui laissent présager une amélioration de la tolérance des variétés aux stress abiotiques (en particulier sécheresse, hautes températures…) ? a-t-on une connaissance des cibles de sélection des grandes entreprises semencières ou des grands instituts internationaux (Cimmyt, Icrisat…).

A travers la Wheat Initiative (www.wheatinitiative.org) et les projets nationaux (FSOV, www.fsov.org) et internationaux (International Wheat Yield Partnership, www.iwyp.org) on peut avoir une idée des cibles de recherche. En dehors du rendement, la résistance aux maladies (notamment des maladies encore peu travaillées comme le piétin échaudage (« take-all ») ou les viroses transmises par les insectes…) et la qualité (dont récemment les aspects d'intolérances liées au gluten)

sont des cibles majeures. Mais les projets sur la tolérance à la sécheresse et aux fortes températures sont aussi très présents et restent une des priorités du Cimmyt. En France, les projets ayant comme cible la sécheresse (PIA BreedWheat par exemple) ou les fortes températures (FSOV Heatwheat) montrent une variabilité génétique exploitable. Au niveau international, le projet HeDWIC (Heat and drought Wheat Improvment Consortium) a toutefois du mal à trouver des sources de financement.

Q5 : peut-on faire l'hypothèse que la sélection pourra poursuivre également l'amélioration de la résistance aux maladies (même en cas de maladies émergentes dans grands bassins producteurs) ?

Comme déjà mentionné la résistance aux maladies est une cible majeure de sélection et elle représente un poids important dans les critères d'inscription. Cela se traduit par une augmentation des notes de résistance aux maladies à l'inscription et en post-inscription (Du Cheyron et Lorgeou, 2013). Il y a deux points dans la question : (1) il est difficile d'estimer si les conditions futures seront plus favorables (diminution de la protection phytosanitaire, changement climatique avec hiver plus doux et humides) ou moins favorable (désintensification, changement climatique avec printemps/été plus secs) aux maladies et ravageurs. (2) il est aussi difficile de prévoir les maladies émergentes. En blé une forte inquiétude a été créée par le développement de la souche Ug99 de la rouille noire (*Puccinia graminis f. sp. tritici*). Il semble par contre bien exister des gènes de résistance provenant parfois d'introgression d'espèces sauvages apparentées au blé tendre (Zhang *et al.,* 2019). La pyriculariose du blé (*Magnaporthe oryzae*) est aussi une menace avancée, décrite pour la première fois au Brésil et maintenant très présente en Amérique du sud, elle a été détectée au Bengladesh. Des tolérances ont toutefois été sélectionnées en Amérique du Sud (Cimmyt, Wheat-Blast-Priority-Brief-web-07Apr2016).

Q6 : L'étude de Parent et al. (2018) dans PNAS montre en maïs que l'adaptation variétale mobilisant la variabilité génétique actuelle permettra de répondre aux enjeux du changement climatique en 2050 en Europe. Cela est-il vrai aussi pour le blé ? ou d'autres espèces ?

L'étude de Parent *et al.* (2018) sur maïs est basée sur une adaptation de la date de floraison et de la date de semis. Il est précisé que "Optimal sowing dates were earlier by 10—39 d depending on sites in 2050 under RCP4.5 compared with the baseline period". Le maïs étant une espèce semée au printemps, elle peut profiter en Europe du Nord d'un réchauffement qui permet d'avancer les dates de semis et donc de mieux intercepter le rayonnement lumineux maximal au mois de juin. Bien que disposant aussi d'une large variabilité génétique sur la date de floraison, il semble probable que les espèces semées en hiver comme le blé ne profiteront pas aussi directement de cette possibilité. Gouache *et al.* (2012) montrent que parmi les stratégies d'adaptation aux fortes températures, l'avancée des dates de semis est peu efficace, la culture de variétés plus précoces est partiellement efficace, et la sélection de variétés tolérantes (seuil d'impact des fortes températures durant le remplissage du grain plus élevé) serait le plus efficace. Pour le blé de printemps, qui est minoritaire en Europe, il est toutefois possible qu'une stratégie semblable à celle du maïs serait efficace.

Q7 : Doit-on moduler les réponses précédentes selon qu'on se situe dans le cas d'un changement « tendanciel » ou « aggravé » ?

Cela semble très probable. Plus les conditions de culture seront défavorables et variables, plus la sélection aura du mal à compenser les effets négatifs des contraintes abiotiques et biotiques.

Annexes de la Section 7.2

Annexe 7-1. Études disponibles sur le blé

Liste des références « blé » collectées dans le cadre de l'étude AE2050 :

Référence	Pays concerné(s)
Acreche MM, Briceno-Felix G, Sanchez JAM, Slafer GA (2008) Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. Eur J Agron 28: 162-170.	Espagne
Afridi N, Khalil IH (2007) Genetic improvement in yield related traits of wheat under irrigated and rainfed environments. Sarhad J Agric 23 (4): 965-972.	Pakistan
Ahlemeyer J, Friedt W (2011) Progress in winter wheat yield in Germany–what's the share of the genetic gain? In: 61 Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, pp 19–24.	Allemagne
Ahrends HE, Eugster W, Gaiser T, Rueda-Ayala V, Huging H, Ewert F, Siebert S (2018) Genetic yield gains of winter wheat in Germany over more than 100 years (1895-2007) under contrasting fertilizer applications. Environ Res Lett 13 104003.	Allemagne
Aisawi KAB, Reynolds MP, Singh RP, Foulkes MJ (2015) The Physiological Basis of the Genetic Progress in Yield Potential of CIMMYT Spring Wheat Cultivars from 1966 to 2009. Crop Sci 55: 1749-1764.	Mexique
Austin RB, Bingham J, Blackwell RD, Evans LT, Ford MA, Morgan CL, Taylor M (1980) Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. J Agric Sci, Camb 94: 675-689.	Grande Bretagne
Austin RB, Ford MA, Morgan CL (1989) Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. J Agric Sci, Camb 112: 295-301.	Grande Bretagne
Avcin A, Avci M, Donmez, O (1997) Genetic gains in yields of bread wheat (Triticum aestivum L.) cultivars under Central Anatolian Conditions. J. Field Crops Cent. Res. Inst., 6 (1) : 1-13.	Turquie
Battenfield SD, Guzman C, Gaynor RC, Singh RP, Pena RJ, Dreisigacker S, Fritz AK, Poland JA (2016) Genomic Selection for Processing and End-Use Quality Traits in the CIMMYT Spring Bread Wheat Breeding Program. Plant Genome 9 (2).	Etats-Unis
Beche E, Benin G, da Silva CL, Munaro LB, Marchese JA (2014) Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. Eur J Agron 61: 49-59.	Brésil
Bell MA, Fischer RA, Byerlee D, Sayre K (1995) Genetic and agronomic contributions to yield gains: A case study for wheat. Field Crops Res 44: 55-65.	Mexique
Berzonsky WA, Lafever HN (1993) Progress in Ohio soft red winter-wheat breeding - Grain yield and agronomic traits of cultivars released from 1871 to 1987. Crop Sci 33: 1382-1386.	Etats-Unis
Brancourt-Hulmel M, Doussinault G, Lecomte C, Bérard P, Le Buanec B, Trottet M (2003) Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. Crop Sci 43: 37-45.	France
Cargnin A, de Souza MA, Fronza V, Fogaca CM (2009) Genetic and environmental contributions to increased wheat yield in Minas Gerais, Brazil. Sci Agric 66: 317-322.	Brésil
Cormier F, Faure S, Dubreuil P, Heumez E, Beauchêne K, Lafarge S, Praud S, Le Gouis J (2013) A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (Triticum aestivum L.). Theoretical and Applied Genetics 126: 3035-3048.	France
Cox TS, Shroyer JP, Liu BH, Sears RG, Martin TJ (1988) Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter-wheat cultivars from 1919 to 1987. Crop Sci 28: 756-760.	Etats-Unis
Deckerd EL, Busch RH, Kofoid KD (1985). Physiological aspects of spring wheat improvement. p. 46–54. In J. E. Harper *et al.* (ed.). Exploitation of physiological and genetic variability to enhance crop productivity. Am. Soc. Plant Physiol., Rockville, MD (USA).	Etats-Unis
del Pozo A, Matus I, Serret MD, Araus JL (2014) Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. Environ Exp Bot 103: 180-189.	Chili
DePauw RM, Knox RE, Clarke FR, Wang H, Fernandez MR, Clarke JM, McCaig TN (2007) Shifting undesirable correlations. Euphytica 157: 409-415.	Canada
Donmez E, Sears RG, Shroyer JP, Paulsen GM (2001) Genetic gain in yield attributes of winter wheat in the great plains. Crop Sci 41: 1412-1419.	Etats-Unis
du Cheyron P, Lorgeou J (2013) Évaluation du progrès génétique du blé tendre. Colloque ESPERA : Etude de la Stagnation des Performances et des Rendements Agronomiques, INRA, Paris.	France
Flohr BM, Hunt JR, Kirkegaard JA, Evans JR, Swan A, Rheinheimer B (2018) Genetic gains in NSW wheat cultivars from 1901 to 2014 as revealed from synchronous flowering during the optimum period. Eur J Agron 98: 1-13.	Pays de Galles

Follmann DN, Cargnelutti A, Lucio AD, de Souza VQ, Caraffa M, Wartha CA (2017) Genetic progress in homogeneous regions of wheat cultivation in Rio Grande do Sul State, Brazil. Genet Mol Res 16(1).	Brésil
Fufa H, Baenziger PS, Beecher BS, Graybosch RA, Eskridge KM, Nelson LA (2005) Genetic improvement trends in agronomic performances and end-use quality characteristics among hard red winter wheat cultivars in Nebraska. Euphytica 144: 187-198.	Etats-Unis
Gao FM, Ma DY, Yin GH, Rasheed A, Dong Y, Xiao YG, Xia XC, Wu XX, He ZH (2017) Genetic Progress in Grain Yield and Physiological Traits in Chinese Wheat Cultivars of Southern Yellow and Huai Valley since 1950. Crop Sci 57: 760-773.	Chine
Graybosch RA, Peterson CJ (2010) Genetic Improvement in Winter Wheat Yields in the Great Plains of North America, 1959-2008. Crop Sci 50: 1882-1890.	Etats-Unis
Graybosch RA, Peterson CJ (2012) Specific Adaptation and Genetic Progress for Grain Yield in Great Plains Hard Winter Wheats from 1987 to 2010. Crop Sci 52: 631-643.	Etats-Unis
Green AJ, Berger G, Griffey CA, Pitman R, Thomason W, Balota M, Ahmed A (2012) Genetic Yield Improvement in Soft Red Winter Wheat in the Eastern United States from 1919 to 2009. Crop Sci 52: 2097-2108.	Etats-Unis
Gummadov N, Keser M, Akin B, Cakmak M, Mert Z, Taner S, Ozturk I, Topal A, Yazar S, Morgounov A (2015) Genetic gains in wheat in Turkey: Winter wheat for irrigated conditions. Crop Journal 3: 507-516.	Turquie
Jonard P, Koller J (1951). Les facteurs de la productivité chez le blé. Ann. Amélior. Plantes 1 : 256-276.	France
Joudi M, Ahmadi A, Mohammadi V, Abbasi A, Mohammadi H (2014) Genetic changes in agronomic and phenologic traits of Iranian wheat cultivars grown in different environmental conditions. Euphytica 196: 237-249.	Iran
Karpenstein-Machan M., Scheffer MK (1989). Der werdegang unserer Weizensorten dargestellt anhand der Erträge und Ertragsaufbaus von Sorten ab 1921 bis zu den heutigen modernen Sorten. Angew. Botanik 63: 417–427.	Allemagne
Keser M, Gummadov N, Akin B, Belen S, Mert Z, Taner S, Topal A, Yazar S, Morgounov A, Sharma RC, Ozdemir F (2017) Genetic gains in wheat in Turkey: Winter wheat for dryland conditions. Crop Journal 5: 533-540.	Turquie
Khalil IH, Carver BF, Krenzer EG, MacKown CT, Horn GW, Rayas-Duarte P (2002) Genetic trends in winter wheat grain quality with dual-purpose and grain-only management systems. Crop Sci 42: 1112-1116	Etats-Unis
Kubota H, Iqbal M, Dyck M, Quideau S, Yang RC, Spaner D (2018) Investigating Genetic Progress and Variation for Nitrogen Use Efficiency in Spring Wheat. Crop Sci 58: 1542-1557.	Canada
Laidig F, Piepho HP, Drobek T, Meyer U (2014) Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. Theoretical and Applied Genetics 127: 2599-2617.	Allemagne
Ledent JF, Stoy V (1988) Yield of winter-wheat, a comparison of genotypes from 1910 to 1976. Cereal Res Commun 16: 151-156.	Suède
Lo Valvo PJ, Miralles DJ, Serrago RA (2018) Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. Field Crops Res 221: 314-321.	Argentine
Lopes MS, Reynolds MP, Manes Y, Singh RP, Crossa J, Braun HJ (2012) Genetic Yield Gains and Changes in Associated Traits of CIMMYT Spring Bread Wheat in a "Historic" Set Representing 30 Years of Breeding. Crop Sci 52: 1123-1131.	Mexique, Soudan, Iran, Egypte, Bangladesh
Lorgeou J, du Cheyron P, Meleard B (2017) Progrès génétique multicritères des variétés de blé tendre depuis 30 ans. Séminaire AG de l'AIPF.	France
Luciani A (2004) Etude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture. Rapport GEVES.	France
Mackay I, Horwell A, Garner J, White J, McKee J, Philpott H (2011) Reanalyses of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. Theoretical and Applied Genetics 122: 225-238.	Grande Bretagne
Manes Y, Gomez HF, Puhl L, Reynolds M, Braun HJ, Trethowan R (2012) Genetic Yield Gains of the CIMMYT International Semi-Arid Wheat Yield Trials from 1994 to 2010. Crop Sci 52: 1543-1552.	Semiarid CIMMYT trials
Marinciu C, Mustatea P, Serban G, Ittu G, Saulescu NN (2013) Effects of climated change and genetic progress on performance of wheat cultivars, during the last twenty years in South Romania. Romanian Agricultural Research 30: 3-11.	Roumanie
Matus I, Mellado M, Pinares M, Madariaga R, del Pozo A (2012) Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 to 2000. Chil J Agric Res 72: 303-308.	Chili
Masle, J. (1985) Elaboration du nombre de grains potentiels d'un peuplement de blé d'hiver. C. R. Acad. Agric. Fr. 71(8): 857–869.	France
Mustatea P, Saulescu NN (2011) Estimation of genetic trends in yield and agronomic traits of recent Romanian winter wheat (Triticum aestivum L.) cultivars, using direct comparisons in multiyear, multi-location yield trials. Romanian Agricultural Research 28: 17-24.	Roumanie
Nedel JL (1994) Genetic improvement on grain-yield of wheat cultivars released between 1940 and 1992. Pesqui Agropecu Bras 29: 1565-1570.	Brésil
Oury FX, Godin C, Mailliard A, Chassin A, Gardet O, Giraud A, Heumez E, Morlais JY, Rolland B, Rousset M, Trottet M, Charmet G (2012) A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France. Eur J Agron 40: 28-38.	France

Peltonen-Sainio P, Jauhiainen L, Hakala K (2009) Are there indications of climate change induced increases in yield variability of major field crops in the northernmost European conditions? Agricultural and Food Science 18: 206-226.	Finlande
Perry MW, D'Antuono MF (1989) Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. Aust J Agric Res 40: 457-47	Australie
Pswarayi HA, Kubota H, Estrada H, Spaner D (2014) Evaluation of Wheat Cultivars to Test Indirect Selection for Organic Conditions. Agron J 106: 441-451.	Canada
Rife TW, Graybosch RA, Poland JA (2019) A field-based analysis of genetic improvement for grain yield in winter wheat cultivars developed in the US Central Plains from 1992 to 2014. Crop Sci 59:905–910.	Etats-Unis
Rijk B, van Ittersum M, Withagen J (2013) Genetic progress in Dutch crop yields. Field Crops Res 149: 262-268	Pays bas
Rodrigues O, Lhamby JCB, Didonet AD, Marchese JA (2007) Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. Pesqui Agropecu Bras 42: 817-825.	Brésil
Sadras VO, Lawson C (2011) Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. Crop & Pasture Science 62: 533-549.	Australie
Sanchez-Garcia M, Royo C, Aparicio N, Martin-Sanchez JA, Alvaro F (2013) Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. J Agric Sci 151: 105-118.	Espagne
Sankaran S, Khot LR, Espinoza CZ, Jarolmasjed S, Sathuvalli VR, Vandemark GJ, Miklas PN, Carter AH, Pumphrey MO, Knowles NR, Payek MJ (2015) Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. Eur J Agron 70: 112-123.	Inde
Sayre KD, Rajaram S, Fischer RA (1997) Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. Crop Sci 37: 36-42.	Mexique
Schmidt JW, Worrall WD (1983) Trends in yield improvement through genetic gains. 6th International Wheat Genetics Symposium, Kyoto, Japan, pp 691-700.	Etats-Unis
Sener O, Arslan M, Soysal Y, Erayman M (2009) Estimates of relative yield potential and genetic improvement of wheat cultivars in the Mediterranean region. J Agric Sci 147: 323-332.	Turquie
Sharma RC, Crossa J, Velu G, Huerta-Espino J, Vargas M, Payne TS, Singh RP (2012) Genetic Gains for Grain Yield in CIMMYT Spring Bread Wheat across International Environments. Crop Sci 52: 1522-1533.	Cimmyt, Pakistan, Egypte, Inde
Shearman VJ, Sylvester-Bradley R, Scott RK, Foulkes J (2005) Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. Crop Sci 45: 175-185.	Grande Bretagne
Sun YY, Wang XL, Wang N, Chen YL, Zhang SQ (2014) Changes in the yield and associated photosynthetic traits of dry-land winter wheat (Triticum aestivum L.) from the 1940s to the 2010s in Shaanxi Province of China. Field Crops Res 167: 1-10	Chine
Touzy G, Rincent R, Bogard M, Lafarge S, Dubreuil P, Mini A, Deswarte J-C, Beauchene K, Le Gouis J, Praud S (2019) Identifying drought tolerance specific QTLs in bread wheat (T. aestivum L.) using environmental clustering. Theoretical and Applied Genetics 132(10): 2859-2880.	France + Etats-Unis
Trethowan RM, van Ginkel M, Rajaram S (2002) Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global drought affected environments. Crop Sci 42: 1441-1446.	Cimmyt
Waddington SR, Ransom JK, Osmanzai M, Saunders DA (1986) Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to Northwest Mexico. Crop Sci 26: 698-703.	Mexique
White EM, Wilson FEA (2006) Responses of grain yield, biomass and harvest index and their rates of genetic progress to nitrogen availability in ten winter wheat varieties. Irish Journal of Agricultural and Food Research 45 :85-101.	Irlande du nord
Wu W, Li CJ, Ma BL, Shah F, Liu Y, Liao YC (2014) Genetic progress in wheat yield and associated traits in China since 1945 and future prospects. Euphytica 196: 155-168.	Chine
Xiao YG, Qian ZG, Wu K, Liu JJ, Xia XC, Ji WQ, He ZH (2012) Genetic Gains in Grain Yield and Physiological Traits of Winter Wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. Crop Sci 52: 44-56.	Chine
Zhang Y, Li S, Wu Z, Yang W, Yu Y, Xia X, He Z (2011) Contribution of CIMMYT wheat germplasm to genetic improvement of grain yield in spring wheat of Sichuan, Yunnan, Gansu, and Xinjiang Provinces. Acta agron Sin 37: 1752-1762.	Chine
Zhang Y, Xu WG, Wang HW, Dong HB, Qi XL, Zhao MZ, Fang YH, Gao C, Hu L (2016) Progress in genetic improvement of grain yield and related physiological traits of Chinese wheat in Henan Province. Field Crops Res 199: 117-128.	Chine
Zheng TC, Zhang XK, Yin GH, Wang LN, Han YL, Chen L, Huang F, Tang JW, Xia XC, He ZH (2011) Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. Field Crops Res 122: 225-233.	Chine
Zhou Y, He ZH, Sui XX, Xia XC, Zhang XK, Zhang GS (2007a) Genetic improvement of grain yield and associated traits in the Northern China winter wheat region from 1960 to 2000. Crop Sci 47: 245-253.	Chine
Zhou Y, Zhu HZ, Cai SB, He ZH, Zhang XK, Xia XC, Zhang GS (2007b) Genetic improvement of grain yield and associated traits in the southern China winter wheat region: 1949 to 2000. Euphytica 157: 465-473.	Chine

Tableau 1. Synthèse pour les principaux pays producteurs, importateurs et exportateurs de blé : (1) progrès génétique du blé estimé grâce à des séries variétales (type 1), (2) progrès génétique estimé grâce à des essais variétaux (type 2) et (3) évolution des rendements nationaux (type 3) sur 20 ans

Pays	Progrès génétique (variétés – type 1)				Progrès génétique (essais – type 2)				FAOstat (1998-2017 – type 3)		
	Etudes	Rdt Moy q ha^{-1}	q ha^{-1} an^{-1}	% an^{-1}	Etudes	Rdt Moy q ha^{-1}	q ha^{-1} an^{-1}	% an^{-1}	Rdt Moy q ha^{-1}	q ha^{-1} an^{-1}	% an^{-1}
Algérie									13	0.26	1.92
Allemagne	Ahrends *et al.*, 2018	84	0.32	0.39	Laidig *et al.*, 2014		0.53	0.66[b]	75	ns[e]	ns
Argentine	Lo Valvo *et al.*, 2018	78[a]	0.14	0.18					26	0.38	1.44
Australie	Sadras et Lawson, 2011	49[a]	0.25	0.51					18	ns	ns
Brésil	Beche *et al.*, 2014	37[a]	0.17	0.45					22	0.53	2.41
Canada	Pswarayi *et al.*, 2014	42[a]	0.04	0.09[a]	DePauw *et al.*, 2007		0.25	0.54[b]	28	0.74	2.68
Chine	Wu *et al.*, 2014	67	0.66	1.00					46	1.00	2.19
Egypte					Sharma *et al.*, 2012		1.12	1.13[c]	64	ns	ns
Etats-Unis	Rife *et al.*, 2019	16[a]	0.17	1.10	Graybosch et Peterson, 2010			ns	29	0.25	0.86
Fédération russe	Morgounov *et al.*, 2010[d]		0.15	0.70					21	0.57	2.70
France	Cormier *et al.*, 2013	91	0.41	0.45	Lorgeou *et al.*, 2017		0.55		70	ns	ns
Grande-Bretagne					Mackay *et al.*, 2011		0.74		78	ns	ns
Inde					Sharma *et al.*, 2012		0.32	0.83[c]	28	0.30	1.07
Ukraine									31	0.80	2.59

[a]données recalculées, [b]année de référence 1983-1984, [c]par rapport à un témoin ,[d]Sibérie ouest, [e]ns = non significatif

Annexe 7-2. Études disponibles sur le maïs

Liste des références « maïs » collectées dans le cadre de l'étude AE2050 :

1. Huffman, W.E., J.S. Smith, and A. McCunn (2018). "Maize Yields and Yield Gain in Leading Producing Countries: How Much has U.S.-Developed Germplasm Contributed?" Presented at the 2018 International Consortium on Agricultural Bioeconomy Research (ICABR) Conference, The World Bank. Washington, DC, June 13-15, 2018.
2. FAOSTAT. www.fao.org/faostat/
3. Abdala, L. J. et al. (2018). Dry milling grain quality changes in Argentinean maize genotypes released from 1965 to 2016. Field Crops Research 226, 74-82, doi:10.1016/j.fcr.2018.07.008.
4. Di Matteo, J. A., Ferreyra, J. M., Cerrudo, A. A., Echarte, L. & Andrade, F. H. (2016). Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. Field Crops Research 197, 107-116, doi:10.1016/j.fcr.2016.07.023.
5. Butzena, S. & Smith, S. : Corn Yield Gains Due to Genetic and Management Improvements, https://www.pioneer.com/us/agronomy/corn_yield_gains.html
6. Chen, K. et al. (2016). Genetic improvement in density and nitrogen stress tolerance traits over 38 years of commercial maize hybrid release. Field Crops Research 196, 438-451, doi:10.1016/j.fcr.2016.07.025.
7. Schauberger, B. et al. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. Scientific Reports 8, doi:10.1038/s41598-018-35351-1.
8. Badu-Apraku, B., Fakorede, M. A. B. & Oyekunle, M. (2014). Agronomic traits associated with genetic gains in maize yield during three breeding eras in West Africa. Maydica 59, 50-58.
9. Qin, X. L. et al. (2016). Maize yield improvements in China: past trends and future directions. Plant Breeding 135, 166-176, doi:10.1111/pbr.12347.
10. Ci, X. K. et al. (2011). Genetic Contribution to Advanced Yield for Maize Hybrids Released from 1970 to 2000 in China. Crop Science 51, 13-20, doi:10.2135/cropsci2010.04.0207.
11. Li, Y. X. et al. (2014). Contributions of Parental Inbreds and Heterosis to Morphology and Yield of Single-Cross Maize Hybrids in China. Crop Science 54, 76-88, doi:10.2135/cropsci2013.02.0077.
12. Wang, T. Y. et al. (2011). Changes in Yield and Yield Components of Single-Cross Maize Hybrids Released in China between 1964 and 2001. Crop Science 51, 512-525, doi:10.2135/cropsci2010.06.0383.
13. Yadav, O. P. et al. (2015). Genetic Improvement of Maize in India: Retrospect and Prospects. Agricultural Research 4, 325-338, doi:10.1007/s40003-015-0180-8.
14. Yadav, O. P. et al. (2016). Doubling maize (Zea mays) production of India by 2025-Challenges and opportunities. Indian Journal of Agricultural Sciences 86, 427-434.
15. Haarhoff, S. J. & Swanepoel, P. A. (2018). Plant Population and Maize Grain Yield: A Global Systematic Review of Rainfed Trials. Crop Science 58, 1819-1829, doi:10.2135/cropsci.2018.01.0003.
16. Schauberger, B. et al. (2017). Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. Nature Communications 8, doi:10.1038/ncomms13931.
17. Luque, S. F., Cirilo, A. G. & Otegui, M. E. (2006). Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. Field Crops Research 95, 383-397, doi:10.1016/j.fcr.2005.04.007.
18. Duvick, D. N. (2005). GENETIC PROGRESS IN YIELD OF UNITED STATES MAIZE (Zea mays L.). Maydica 50, 193-202.
19. Tollenaar, M., Fridgen, J., Tyagi, P., Stackhouse, P. W. & Kumudini, S. (2017) The contribution of solar brightening to the US maize yield trend. Nature Climate Change 7, 275-+, doi:10.1038/nclimate3234.
20. Derieux, M. et al. (1987). EVALUATION OF THE GENETIC GAIN IN GRAIN MAIZE DURING THE LAST 30 YEARS IN FRANCE. Agronomie 7, 1-11, doi:10.1051/agro:19870101.
21. Mitrovic, B. et al. (2016). Genetic gains in grain yield, morphological traits and yield stability of middle-late maize hybrids released in Serbia between 1978 and 2011. Euphytica 211, 321-330, doi:10.1007/s10681-016-1739-6.
22. Badu-Apraku, B. et al. (2016). Genetic Improvement of Extra-Early Maize Cultivars for Grain Yield and Striga Resistance during Three Breeding Eras. Crop Science 56, 2564-2578, doi:10.2135/cropsci2016.02.0089.

Tableau 2. Progrès génétique sur maïs : synthèse régionale à partir des études disponibles

	Rendement moyen ($t.ha^{-1}$)	Gain de productivité ($t.ha^{-1}.y^{-1}$)	Gain génétique ($t.ha^{-1}.y^{-1}$)	Surface (M ha)	Dernière année de référence Gain génétique	Références
Brésil, Argentine	7,57 / 5,62	0,081* / 0,146*	0,110 / 0,065-0,100	6,5 / 17,4	2016 / 2014	1, 2, 3, 4, 17
Canada, USA	10,54 / 11,83	0,185* / 0,118*	? / 0,063-0,094	1,4 / 33,6	? / 2005-2011	1, 2, 5, 6, 16, 18, 19
Reste de l'Amérique	3,8	0,064*	?	7,3	?	2
EU-27 France / global	Ap. 9,0	0,06 / ?	0,100 / ?			7, 20, 21
Afrique de l'Ouest	3,21	?	0,030		2010	8, 22
Chine	6,00	0,078 ~0,091	0,063	36,3	2013-2014	9, 10, 11, 12
Inde	2,56	0,110	?	9,0	2014	13, 14

* calculé sur 1997-2007 à partir de FAO stat
En grisé, données dont la référence est peu précise

Références citées dans le Chapitre 7

Section 7.1

Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., Daszak, P., 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. Trends in Ecology & Evolution, 19, 535-544.

Bebber, D.P., Ramotowski, M.A., Gurr, S.J., 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. Nature Climate Change 3(11), 985, DOI: 10.1038/NCLIMATE19 90.

Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willocquet L., Whish J.P.M., Savary, S., 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. Agricultural Systems 155, 213–224

Juroszek P., von Tiedemann A. 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. Plant Pathol. 60, 100-112.

Juroszek, P., von Tiedemann, A., 2013. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. The Journal of Agricultural Science, 151, 163-188.

Juroszek, P., von Tiedemann, A., 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: a review. Journal of Plant Diseases and Protection 122, 3-15.

Mbow, C., C. Rosenzweig, L.G. Barioni, T.G. Benton, M. Herrero, M. Krishnapillai, E. Liwenga, P. Pradhan, M.G. Rivera-Ferre, T. Sapkota, F.N. Tubiello, Y. Xu, 2019. Food Security. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].

Mikkelsen, B.L., Jørgensen, R B., Lyngkjær, M.F. 2015. Complex interplay of future climate levels of CO_2, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. Plant Pathology 64, 319-327.

Mundt, C.C., 2014. Durable resistance: a key to sustainable management of pathogens and pests. Inf. Genet. 27, 446–455

Newbery, F., Qi, A., Fitt, B.D., 2016. Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. Current Opinion in Plant Biology32, 101-109.

Savary S., Mila A., Willocquet L., Esker P.D, Carisse O., McRoberts N., 2011a. Risk factors for crop health under global change and agricultural shifts: a framework of analyses using rice in tropical and subtropical Asia as a model. Phytopathology 101, 696-709.

Savary S., Nelson A., Sparks A.H., Willocquet L., Duveiller E., Mahuku G., Forbes G., Garrett K.A., Hodson D., Padgham J., Pande S., Sharma M., Yuen J., Djurle A., 2011b. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. Plant Disease 95, 1204-1216.

Savary, S., Stetkiewicz, S., Brun, F., Willocquet, L., 2015. Modelling and mapping potential epidemics of wheat diseases–examples on leaf rust and Septoria tritici blotch using EPIWHEAT. European Journal of Plant Pathology 142, 771-790.

Savary S, McRoberts N, Esker PD, Willocquet L, Teng PS., 2017a. Production situations as drivers of crop health: evidence and implications. Plant Pathology 66, 867-876.

Savary S., Djurle A., Yuen J., Ficke A., Rossi V., Esker P. D., Fernandes J. M. C., Del Ponte E. M., Kumar J., Madden L. V., Paul P., McRoberts N., Singh P. K., Huber L., Pope de Vallavielle C., Saint-Jean S., Willocquet L., 2017b. A white paper on global wheat health based on scenario development and analysis. Phytopathology 107, 1109-1122.

Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.R., Esker P., McRoberts N., Nelson A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. Nature Ecology & Evolution 3, 430-439.

Singh, R.P., Singh, P.K., Rutkoski, J., Hodson, D.P., He, X., Jørgensen, L.N., Hovmøller, M.S., Huerta-Espino, J., 2016. Disease impact on wheat yield potential and prospects of genetic control. Annual Review of Phytopathology, 54, 303-322.

Van Ittersum MK, Rabbinge R, 1997. Concept of production ecology for analysis and quantification of agricultural imput-output combination. Field Crop Res 52, 197–208.

Váry, Z., Mullins, E., McElwain, J. C., & Doohan, F. M., 2015. The severity of wheat diseases increases when plants and pathogens are acclimatized to elevated carbon dioxide. Global Change Biology 21, 2661-2669.

West, J.S., Townsend, J, Stevens, A.M., Fitt, B.D.L., 2012. Comparative biology of different plant pathogens to estimate effects of climate change on crop diseases in Europe. European Journal of Plant Pathology 133, 315-331.

Willocquet L, Aubertot JN, Lebard S, Robert C, Lannou C, Savary S, 2008. Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. Field Crops Research 107, 12-28.

Willocquet, L., Félix, I., de Vallavieille-Pope, C., Savary, S. 2018. Reverse modelling to estimate yield losses caused by crop diseases. Plant Pathology 67, 1669–1679.

Section 7.2

Acreche MM, Briceno-Felix G, Sanchez JAM, Slafer GA (2008) Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. Eur J Agron 28:162-170

Beche E, Benin G, da Silva CL, Munaro LB, Marchese JA (2014) Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. Eur J Agron 61:49-59

Borghi B, Perenzin M, Nash RJ (1988) Agronomic and qualitative characteristics of ten bread wheat hybrids produced using a chemical hybridizing agent. Euphytica 39:185-194

Dent D, Cocking E (2017) Establishing symbiotic nitrogen fixation in cereals and other non-legume crops: The Greener Nitrogen Revolution. Agriculture & Food Security 6

du Cheyron P, Lorgeou J (2013) Évaluation du progrès génétique du blé tendre. ESPERA : Etude de la Stagnation des Performanceset et des Rendements Agronomiques, Paris

Flohr BM, Hunt JR, Kirkegaard JA, Evans JR, Swan A, Rheinheimer B (2018) Genetic gains in NSW wheat cultivars from 1901 to 2014 as revealed from synchronous flowering during the optimum period. Eur J Agron 98:1-13

Gate P (2014) Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement ? L'exemple des céréales. Agronomie Environnement & Sociétés 4:55-61

Gouache D, Le Bris X, Bogard M, Deudon O, Page C, Gate P (2012) Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. Eur J Agron 39:62-70

Graybosch RA, Peterson CJ (2010) Genetic Improvement in Winter Wheat Yields in the Great Plains of North America, 1959-2008. Crop Sci 50:1882-1890

Graybosch RA, Peterson CJ (2012) Specific Adaptation and Genetic Progress for Grain Yield in Great Plains Hard Winter Wheats from 1987 to 2010. Crop Sci 52:631-643

Gummadov N, Keser M, Akin B, Cakmak M, Mert Z, Taner S, Ozturk I, Topal A, Yazar S, Morgounov A (2015) Genetic gains in wheat in Turkey: Winter wheat for irrigated conditions. Crop Journal 3:507-516

Huffman, W.E., J.S. Smith, and A. McCunn (2018). Maize Yields and Yield Gain in Leading Producing Countries: How Much has U.S.-Developed Germplasm Contributed?" Presented at the 2018 International Consortium on Agricultural Bioeconomy Research (ICABR) Conference, The World Bank. Washington, DC, June 13-15, 2018.

Lo Valvo PJ, Miralles DJ, Serrago RA (2018) Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. Field Crops Res 221:314-321

Longin C, Mühleisen J, Maurer H, Zhang H, Gowda M, Reif J (2012) Hybrid breeding in autogamous cereals. Theoretical and Applied Genetics 125:1087-1096

Makowski D., Marajo-Petitzon E., Durand J-L., Ben-Ari T. (2020). Quantitative synthesis of temperature, CO2, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. European Journal of Agronomy (in press).

Meuwissen THE, Hayes BJ, Goddard ME (2001) Prediction ot total genetic value using genome-wide dense marker maps. Genetics 157:1819-1829

Mühleisen J, Piepho H, Maurer H, Longin C, Reif J (2014) Yield stability of hybrids versus lines in wheat, barley and triticale. Theoretical and Applied Genetics 127:309-316

Mustatea P, Saulescu NN (2011) Estimation of genetic trends in yield and agronomic traits of recent Romanian winter wheat (Triticum aestivum L.) cultivars, using direct comparisons in multiyear, multi-location yield trials. Romanian Agricultural Research 28:17-24

Oury FX, Koenig J, Bérard P, Rousset M (1990) Une comparaison entre des blés hybrides produits par voie chimique et leurs parents: niveau d'hétérosis et élaboration du rendement. Agronomie 10:291-304

Parent B, Leclere M, Lacube S, Semenov MA, Welcker C, Martre P, Tardieu F (2018) Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 115:10642-10647

Rincent R, Charpentier J-P, Faivre-Rampant P, Paux E, Le Gouis J, Bastien C, Segura V (2018) Phenomic selection: a low-cost and high-throughput method based on indirect predictions. Proof of concept on wheat and poplar. G3 8:3961-3972

Sadras VO, Lawson C (2011) Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. Crop & Pasture Science 62:533-549

Sankaran S, Khot LR, Espinoza CZ, Jarolmasjed S, Sathuvalli VR, Vandemark GJ, Miklas PN, Carter AH, Pumphrey MO, Knowles NR, Payek MJ (2015) Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. Eur J Agron 70:112-123

Watson A, Ghosh S, Williams MJ, Cuddy WS, Simmonds J, Rey MD, Hatta MAM, Hinchliffe A, Steed A, Reynolds D, Adamski NM, Breakspear A, Korolev A, Rayner T, Dixon LE, Riaz A, Martin W, Ryan M, Edwards D, Batley J, Raman H, Carter J, Rogers C, Domoney C, Moore G, Harwood W, Nicholson P, Dieters MJ, DeLacy IH, Zhou J, Uauy C, Boden SA, Park RF, Wulff BBH, Hickey LT (2018) Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. Nat Plants 4:23-29

Zhang JP, Zhang P, Hewitt T, Li JB, Dundas I, Schnippenkoetter W, Hoxha S, Chen CH, Park R, Lagudah E (2019) A strategy for identifying markers linked with stem rust resistance in wheat harbouring an alien chromosome introgression from a non-sequenced genome. Theoretical and Applied Genetics 132:125-135

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