

Juin 2015
volume n° 5 / numéro n° 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

Changement climatique et agriculture
comprendre et anticiper, ici et ailleurs.



Agronomie, Environnement & Sociétés est une revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie (AFA) sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes. L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Vers une prospective des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire : les enseignements du 5^{ème} rapport du GIEC

Climate change impacts and food security: lessons from the IPCC fifth assessment report

Thierry BRUNELLE*

*Cirad, UMR CIREN - F-94736 Nogent-sur-Marne - France
Correspondance : brunelle@centre-cired.fr

Résumé

Cet article détaille les principales conclusions du 5^{ème} rapport du GIEC concernant l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire. Pour ce faire, il explicite les hypothèses et/ou limites des résultats présentés et met en lumière les avancées majeures par rapport au précédent rapport. Les principales lacunes sont également discutées.

Le 5^{ème} rapport du GIEC conclut que les baisses de rendement seront particulièrement importantes en zone tropicale et interviendront pour un réchauffement même modéré (<2°C). Des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire semblent pour cette raison difficilement évitables.

Malgré certaines avancées, des lacunes subsistent sur l'évaluation des impacts sur la sécurité alimentaire. Celles-ci apparaissent particulièrement problématiques car elles concernent deux enjeux clés en matière de sécurité alimentaire, à savoir l'élevage et la variabilité climatique.

Mots-clés

Impacts du changement climatique, sécurité alimentaire, GIEC.

JEL classification : Q11, Q18, Q54

Summary

This paper sums up the main conclusions of the IPCC fifth assessment report regarding the impacts of climate change on food security. To do so, it presents the main assumptions and limitations of some key results and brings light on the major advances compared to the previous report. The main shortcomings are also discussed.

The IPCC fifth assessment report confirms that crop yields of wheat, maize and rice in both tropical and temperate regions will be negatively affected beyond 2°C-3°C of local warming without adaptation. Fall in crop yields will be particularly strong in the tropics and will happen even for slight rise in temperature (<2°C). Negative impacts on food security seem for this reason hardly avoidable.

In spite of some advances, e.g. on the observed impacts of climate change at the global scale, important knowledge gaps regarding the impacts on food security

remain. They concern mainly the livestock sector and the impacts of higher climate variability. These shortcomings are particularly problematic as livestock farming and climate variability are two key drivers of food insecurity.

Key-words

Climate change impacts, Food security, GIEC.

Introduction

Dans son dernier rapport sur l'état de l'insécurité alimentaire dans le monde, l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) indique que plus de 800 millions de personnes souffrent actuellement de la faim (11,3% de la population mondiale). Malgré une diminution sensible de la sous-alimentation depuis 1990, la situation reste critique dans certaines régions du monde, en particulier en Asie et en Afrique, et plusieurs facteurs pourraient entraîner une rupture de tendance dans les années à venir.

A cet égard, le changement climatique constitue une inconnue. Les événements climatiques extrêmes ont joué un rôle important dans les crises alimentaires de 2007-2008 et continuent de se multiplier. S'il est encore trop tôt pour attribuer ces phénomènes au changement climatique d'origine anthropique, des modifications majeures de températures et de précipitations dues à l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre pourraient fortement perturber les systèmes de production agricole et mettre en péril la sécurité alimentaire mondiale.

Plusieurs travaux ont été menés pour évaluer ce risque (Nelson et al., 2010 ; HLPE, 2012). Au niveau de la recherche française, la question du changement climatique a été prise en compte dans la phase 1 de l'exercice de prospective agricole Agrimonde (Paillard et al., 2010) afin de déterminer l'évolution des rendements et des surfaces cultivées et irriguées. La phase 2 de cet exercice, intitulé Agrimonde Terra, vise à rendre plus explicite l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire en considérant différents scénarios inspirés du 5^{ème} rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Cet article, réalisé dans le cadre d'Agrimonde Terra, fournit le cadrage général à partir duquel s'est opéré le choix des scénarios climatiques.

Les rapports du GIEC constituent une référence par l'ampleur du nombre d'experts mobilisés et par son influence sur les négociations climatiques. Le GIEC a publié son 5^{ème} et dernier rapport en date (noté AR5 pour 5th assessment report) en 2013, pour la partie concernant le groupe de travail I (éléments scientifiques), et 2014, pour les parties concernant les groupes de travail II (conséquences, adaptation et vulnérabilité) et III (atténuation) ainsi que le résumé pour décideurs. Dans le cadre de l'AR5, la sécurité alimentaire est traitée dans le cadre du chapitre 7 du groupe de travail II intitulé « Food Security and Food Production Systems ». Ce chapitre constitue une base de travail essentielle pour les exercices de perspectives sur la sécurité alimentaire, il est donc intéressant d'en détailler les principales conclusions, et de montrer ses lacunes et avancées majeures. Pour ce faire, nous remontrons la chaîne de causalité de l'insécurité alimentaire, des processus biophysiques jusqu'aux déterminants socio-économiques. Lorsque cela s'avèrera pertinent, nous expliciterons les hypothèses et/ou limites des résultats obtenus et nous les comparerons avec ceux obtenus dans l'AR4.

L'impact du changement climatique sur la production agricole : processus physiologiques et biogéochimiques en jeu

L'AR5 identifie quatre canaux principaux via lesquels le changement climatique affecte la capacité productive des écosystèmes (IPCC, 2014a) : (i) l'augmentation moyenne des températures, (ii) les changements de fréquence, d'intensité, d'amplitude spatiale et temporelle des événements météorologiques et climatiques extrêmes, (iii) la modification des cycles biogéochimiques (augmentation des concentrations en dioxyde de carbone - CO₂ - et ozone - O₃ -) et (iv) les pertes dues aux ravageurs, maladies et mauvaises herbes.

L'augmentation moyenne des températures réduit la durée de maturation des céréales et des oléagineux dans les basses latitudes (Iqbal et al., 2009) et l'allonge dans les hautes latitudes (> 50° N) en raison de la plus grande précocité des dernières gelées (Trnka et al., 2011). Elle contribue aussi au stress hydrique par l'augmentation de la demande en eau nécessaire à l'assimilation du carbone et l'accroissement de l'évapotranspiration (Lobell et al., 2013). Les températures extrêmes se produisant durant l'anthèse (période pendant laquelle une fleur est complètement ouverte et fonctionnelle) réduit la croissance journalière de l'indice de récolte (part des grains dans la quantité totale de récolte) en diminuant le nombre des fleurs fertiles ou la fertilité des grains (Moriondo, 2011). L'accumulation de températures au-dessus de 30°C a un impact particulièrement important sur le stress hydrique (Lobell et al., 2013). L'AR5 relève toutefois que l'effet températures au-delà de l'optimum pour le développement n'est pas aussi bien représenté dans les modèles de croissance des plantes que l'effet des températures en-deçà de cet optimum.

L'élévation des concentrations en CO₂ stimule la photosynthèse et la croissance des plantes, augmentant ainsi l'efficacité dans l'utilisation des nutriments et réduisant les besoins en eau. Cet effet semble être plus élevé pour les plantes C₃ (blé, riz, coton, soja, betterave à sucre et pomme de terre) que pour les plantes C₄ (maïs, sorgho, sucre de canne). L'effet de fertilisation du CO₂ pourrait cependant se produire aux dépens d'une réduction de la valeur nutritionnelle de la plante. Sur la base de données d'essais d'enrichissement en dioxyde de carbone à l'air libre (free-air carbon dioxide enrichment - FACE), Myers et al. (2014) montre que les teneurs en certains minéraux essentiels, tels que le zinc ou le fer, ainsi qu'en protéines décroissent significativement sous l'effet du CO₂ pour les plantes en C₃, tandis que les plantes en C₄ se sont révélées moins réactives. L'ozone, dont la concentration globale a cru depuis l'ère préindustrielle du fait de des émissions anthropogéniques de ses précurseurs (principalement CO et NO₂), est un polluant de l'air phytotoxique, causant des retards de croissance des plantes, et réduisant leur qualité et leur rendement (Pleijel and Uddling, 2012). De nouvelles preuves depuis l'AR4 viennent confirmer les effets positifs du CO₂ et négatifs de l'ozone troposphérique sur les rendements. Cependant, en raison des interactions non linéaires entre le CO₂, l'ozone, les températures moyennes et extrêmes, l'eau

et l'azote, ces effets sont difficiles à mesurer précisément (IPCC, 2014a).

L'interaction entre le changement climatique et l'effet des ravageurs, maladies et mauvaises herbes est encore peu étayée scientifiquement. Même s'il existe des exemples d'une plus grande prévalence des pathogènes liée au changement climatique (mildiou en Finlande, rouille du blé), l'AR5 note que ce sujet est insuffisamment étudié pour établir des conclusions robustes. Les mauvaises herbes étant généralement des plantes C₄, leur impact négatif sur les plantes C₃ pourrait se réduire du fait du différentiel d'effet de fertilisation du CO₂ entre C₃ et C₄ (voir paragraphe ci-avant). Cependant, il reste là encore difficile de tirer des conclusions robustes.

Le changement climatique est susceptible d'affecter la production animale via trois principaux canaux : (i) le rendement de l'herbe et des fourrages, (ii) l'effet de la chaleur sur les animaux et (iii) le stress hydrique (particulièrement en Afrique sub-Saharienne et en Asie du Sud). L'AR5 reste très prudent sur le premier effet, l'interaction entre l'élévation des concentrations en CO₂, l'augmentation des températures et la disponibilité en eau sur la productivité des pâtures étant encore trop peu étudiée pour tirer des conclusions générales. L'élevage pourrait être particulièrement vulnérable au stress thermique car la sélection des animaux sur leurs caractéristiques productives tend à réduire leur tolérance à la chaleur.

Mesures, méthodes et incertitudes

Identifier les impacts du changement climatique sur les écosystèmes et leur capacité productive nécessite de spécifier une trajectoire de référence (baseline) qui décrit les évolutions en absence de changement climatique, telles que l'amélioration de cultivars ou une variation de l'irrigation (IPCC, 2014a). Il est cependant difficile de distinguer au sein de chacune de ces évolutions la part qui résulte de mesures d'adaptation au changement climatique de celle qui résulte d'autres facteurs (réponse aux prix, progrès technique etc.). Les indicateurs d'impacts du changement climatique doivent être pour cette raison interprétés avec prudence.

Dans le cadre du 5^{ème} rapport du GIEC, l'impact du changement climatique sur la production agricole est mesuré au travers des variations des rendements et des prix des denrées agricoles. Ces deux indicateurs sont pertinents pour mesurer l'effet du changement climatique sur la disponibilité alimentaire : le rendement décrit les conditions moyennes de production sur une unité de terre tandis que les prix reflètent la rareté relative des denrées compte de l'offre et la demande. Ils sont en revanche moins adaptés pour décrire les impacts sur l'accès à l'alimentation, car les rendements ne donnent des informations que sur le côté offre et le lien entre les prix et l'accès à l'alimentation est ambigu (par exemple, une augmentation des prix agricoles peut accroître le revenu des agriculteurs et améliore leurs conditions d'accès à l'alimentation).

Les impacts sur les rendements peuvent être mesurés soit par des modèles statistiques (aussi appelés « empiriques »), qui reposent sur des équations de régression relativement simples reliant les données historiques de rendements aux données climatiques, soit par des modèles de processus

(« process-based » aussi appelés « mécanistes »), qui représentent les processus physiologiques de croissance des plantes en réponse au climat. La résolution géographique à laquelle opèrent ces modèles varie : les modèles globaux grillés couvrent la surface terrestre à une résolution de 50km² ou 10km², tandis que d'autres modèles, dits « point-based », fonctionnent sur des points donnés qui sont ensuite extrapolés à l'échelle d'une région ou du monde.

Les impacts sur les prix agricoles peuvent être mesurés à partir de modèles statistiques qui relient les prix à un certain nombre de déterminants économiques ou climatiques, ou à partir de modèles économiques qui représentent de manière explicite les mécanismes d'optimisation des agents conduisant aux équilibres de marché. Dans le chapitre 7 de l'AR5, seuls ces derniers modèles sont utilisés. Ils peuvent fonctionner en équilibre général (l'ensemble des marchés sont représentés, donnant une cohérence d'ensemble à l'analyse) ou en équilibre partiel (seul le marché agricole est représenté, avec souvent plus de détails qu'en équilibre général, les autres marchés étant exogènes).

Les méthodologies pour estimer l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire consistent à estimer l'incidence de la malnutrition¹ soit à partir d'équations économétriques incluant des variables explicatives telles que la disponibilité alimentaire moyenne, l'espérance de vie ou l'accès à l'eau (Nelson et al., 2010), soit en reliant par des hypothèses appropriées les changements de distribution de la disponibilité alimentaire aux variations de sa moyenne (Baldos et Hertel ; 2014). Ces études se concentrent par conséquent sur une seule des dimensions de la sécurité alimentaire (la disponibilité), en laissant de côté les questions d'accès, de stabilité ou de qualité. Cette limite, déjà mentionnée dans l'AR4, n'est donc pas surmontée dans l'AR5. Une autre limite mentionnée dans l'AR4 concerne l'insuffisante évaluation des performances des modèles économiques utilisés à reproduire les observations. L'article de Baldos et Hertel (2014) constitue de ce point de vue une avancée car elle fournit une évaluation des performances de leur modèle sur le passé. Les résultats de cette évaluation apparaissent néanmoins contrastés, puisque si les simulations sont proches des observations à l'échelle globale, les résultats à l'échelle des grandes régions sont moins satisfaisants, avec notamment une sous-estimation de la prévalence de la malnutrition en Afrique sub-saharienne et une forte surestimation en Asie du Sud.

L'incertitude associée à la production de chacun de ces indicateurs est dans l'ensemble importante. Agarwal et al. (2002) and Mearns et al. (1999) indiquent que les divergences entre les modèles de végétation sur l'estimation des rendements est au moins aussi importante que les divergences entre les modèles de climat. Sur la base d'un exercice d'inter-comparaison de modèles, Nelson et al. (2013) concluent que le choix du modèle économique compte au moins autant que celui du modèle de climat ou de végétation afin de déterminer l'impact du changement climatique sur les prix.

L'évaluation des impacts futurs du changement climatique sur la sécurité alimentaire se caractérise par conséquent par un important intervalle de confiance car elle résulte d'un

processus complexe d'estimation impliquant quatre sources d'incertitudes d'égale amplitude : le scénario d'émission, le scénario climatique, la variation de rendements et les changements de prix (voir Figure 1).

Dans le cas des changements de rendements, Lobell et al. (2008) montrent, dans le cadre de projections à l'horizon 2030, que les changements de température moyenne pendant la période de croissance constituent la plus forte source d'incertitude devant les changements de précipitation, en raison de la plus forte sensibilité des températures à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre. Dans le cas des impacts sur les prix, la source principale d'incertitude provient du choix des paramètres de réponse aux prix de la demande, des rendements et de l'offre de terre, ainsi que de la modélisation de l'effet revenu (voir section 5.3 pour plus de détails).

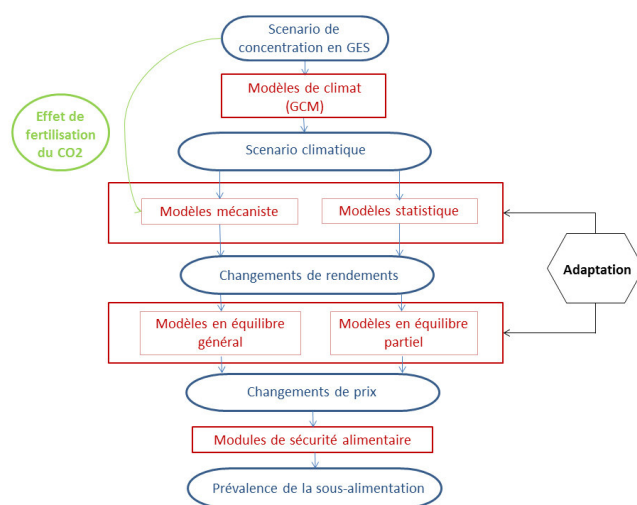


Figure 1 : Processus d'estimation des impacts futurs du changement climatique sur la sécurité alimentaire

Impacts observés

En 2005, le rapport du Millennium Ecosystem Assessment soulignait que « les preuves des impacts historiques et récents du changement climatique sur la production alimentaire sont encore rares. Bien que le climat ait une influence majeure sur la production alimentaire [...], il est extrêmement difficile d'isoler de façon fiable l'influence du climat d'autres facteurs tels que l'amélioration des semences, l'irrigation, les engrais, les pesticides et la gestion des sols ». En l'espace de 10 ans, des progrès dans l'observation des impacts du changement climatique ont été réalisés, d'importantes zones d'ombre subsistent cependant, par exemple concernant les impacts sur l'élevage ou les conséquences des événements extrêmes. Selon l'AR5, le manque d'éléments concernant l'élevage ne reflète pas nécessairement une absence effective d'impacts, mais plutôt un déficit d'analyse de ce sujet. Les conséquences des événements extrêmes souffrent de ce même déficit, lié principalement à la difficulté de calibrer et tester des modèles sur des phénomènes qui se produisent par définition rarement.

Impacts observés sur les cultures

Sur la base d'un recensement de 56 estimations réalisées aussi bien avec des modèles statistiques que mécanistes,

¹ Les études emploient le terme général de "malnutrition" bien qu'elles ne s'intéressent qu'à la sous-nutrition.

L'AR5 conclut avec un niveau moyen de confiance² que les tendances climatiques récentes ont négativement affecté les rendements du blé et du maïs dans de nombreuses régions, tandis que les impacts sur le riz et le soja ont été faibles. Plusieurs limites à cette analyse justifient le niveau moyen de confiance affiché par l'AR5. Tout d'abord, ces études ne constituent pas une détection formelle des impacts car elles ne comparent pas les rendements observés à un contrefactuel, i.e., un scénario sans changement climatique (IPCC, 2014a). Une seconde limite est que cet échantillon d'études n'est pas nécessairement représentatif des impacts effectifs au travers du monde. Par exemple, les études menées sur les régions tempérées portent plus fréquemment sur des plantes relativement sensibles au changement climatique (blé et maïs), tandis que les études recensées sur les zones tropicales portent généralement sur des plantes relativement moins sensibles (riz et soja) et fournissent peu d'estimations sur des plantes plus réactives telles que le sorgho, le mil ou le maïs (B. Sultan, com. pers.). L'article de Lobell *et al.* (2011a), cité dans l'AR5, surmonte en partie ces limites. En utilisant des données de panel reliant le rendement de 4 cultures (maïs, blé, riz et soja) aux températures et précipitations pour l'ensemble des pays du monde sur la période 1980-2008, cette étude calcule des pertes de rendement par rapport à un contrefactuel. Elle démontre ainsi que la production de maïs et de blé a globalement diminué de respectivement 3,8% et 5,5% par rapport à ce qui aurait été obtenu sans modification du climat entre 1980 et 2008. Une conclusion notable de cette étude est que les changements de température ont beaucoup plus affecté les rendements que les changements de précipitation : hors effet du CO₂, 80% des pertes de rendement du blé et 90% de celles du maïs peuvent être attribuées à l'effet des températures.

Bien que l'article de Lobell *et al.* (2011a) fournisse des estimations sur l'ensemble des pays du monde, les comparaisons entre différentes régions, particulièrement à différentes latitudes, restent délicates car l'échantillon des cultures retenus n'est pas représentatif des productions effectives. Il n'est donc pas étonnant de ne voir aucun gradient latitudinal évident ressortir des résultats de Lobell *et al.* (2011a). Le débat sur l'impact du changement climatique en fonction de la latitude reste par conséquent ouvert. Les résultats de Lobell *et al.* (2011a) indiquent que le riz semble avoir bénéficié du réchauffement dans les hautes latitudes, les auteurs suggèrent néanmoins que les systèmes tempérés pourraient être plus vulnérables au changement climatique en raison de leur plus forte utilisation d'engrais et parce que les régions tempérées tendent à se réchauffer plus rapidement que les régions tropicales. Si l'impact médian estimé du climat dans les 56 études recensées dans l'AR5 est plus important dans les régions tempérées que dans les régions tropicales (environ -1%/décennie contre environ 0%/décennie), ce résultat est peu robuste étant donné le manque de représentativité de l'échantillon des cultures. L'AR5 cite par ailleurs un certain nombre d'études indiquant des bénéfices dans les hautes latitudes (Nord-Est de la Chine et Royaume-Uni).

Impacts observés du changement climatique sur les prix et la sécurité alimentaire

La période 2007-2014 séparant la publication des 4^{ème} et 5^{ème} rapports du GIEC a été marquée par d'importantes fluctuations des prix alimentaires. De fortes augmentations de prix ont été à l'origine de crises alimentaires dans de nombreuses régions du monde. L'AR5 met en évidence la corrélation temporelle entre les événements climatiques qui ont affecté la production agricole en Australie, en Russie et aux Etats-Unis et les pics de prix qui se sont produits durant cette période. Si les facteurs météorologiques ont indiscutablement joué un rôle, ils ne constituent cependant pas à eux seuls une cause convaincante des pics de prix de 2007-2008 et des crises alimentaires qui s'en sont suivies (Headey and Fan, 2008). Les baisses de production qui ont eu lieu en Australie, en Russie et aux Etats-Unis durant cette période n'avaient rien d'exceptionnel. Des baisses équivalentes ont eu lieu en 2000/2001 ou en 1993/1994 sans conséquences importantes sur les systèmes alimentaires (Headey and Fan, 2008). D'autres facteurs ont donc joué, parmi lesquels l'AR5 cite l'augmentation de la demande agricole due à la production de biocarburants, et l'effet négatif des réponses nationales aux événements climatiques, tels que les interdictions d'exportation.

L'AR5 fournit des estimations de l'impact du changement climatique sur les prix agricoles tirées des travaux de Lobell *et al.* (2011a). Selon cette étude, le changement climatique aurait entraîné une augmentation des prix agricoles mondiaux comprise entre 6,4% (avec effet du CO₂) et 18,4% (sans effet du CO₂) entre 1961 et 2003. Ces résultats restent cependant difficilement interprétables en termes de sécurité alimentaire car ils concernent une période où les prix étaient considérés comme étant trop bas. Par ailleurs, l'effet des événements extrêmes n'est pas pris en compte dans l'étude.

Impacts futurs du changement climatique sur l'agriculture

Les scénarios de changement climatique

Les projections climatiques réalisées dans le cadre de l'AR5 ont été développées sur la base de « trajectoires représentatives de concentration » (« Representative Concentration pathways » noté RCP). Ces scénarios ont vocation à illustrer des trajectoires plausibles, sans aucune visée prédictive (aucune probabilité ne leur associée). Ils sont exprimés en fonction de l'augmentation du forçage radiatif³ en 2100 par rapport à 1750. Quatre trajectoires ont été conçues à partir des sorties de quatre modèles intégrés, c'est-à-dire incluant des variables économiques, démographiques, l'énergie et certaines composantes climatiques simples. Les noms de ces trajectoires font référence au forçage radiatif atteint en 2100 : le RCP 2.6 (aussi appelé RCP3-PD) qui atteint 2,6 W/m² en 2100 après un pic à 3 W/m² ; RCP 4.5, RCP 6 et RCP 8.5. Les projections de changements de températures moyennes à la surface du sol en 2081-2100⁴ par rapport à 1986—2005 sont comprises entre +1,0°C ±0,4 dans le RCP 2.6 et +3,7°C

² Le GIEC indique : "A level of confidence is expressed using five qualifiers: "very low," "low," "medium," "high," and "very high." It synthesizes the author teams' judgments about the validity of findings as determined through evaluation of evidence and agreement".

³ Le forçage radiatif est défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue et émise par le système climatique. Il est exprimé en Watt par m².

⁴ Les prévisions climatiques s'établissent sur un pas de temps de 20 ans.

$\pm 0,7$ dans le RCP 8.5. Dans tous les scénarios, les terres se réchauffent plus que les océans, et l'arctique plus que les tropiques. En plus du changement de températures moyennes, l'AR5 considère comme virtuellement certain (probabilité de 99%-100%) qu'il y aura plus de températures extrêmes chaudes et moins de froides, et comme très probable (probabilité de 90%-100%) que les vagues de chaleur soient plus longues et plus fréquentes.

L'AR5 projette une augmentation graduelle des précipitations sur le 21^{ème} siècle comprise entre +0.05 mm/jour dans le RCP2.6 et +0.15 mm/jour dans le RCP 8.5. L'incertitude est cependant plus forte que concernant les températures. Elle concerne l'intensité de l'augmentation globale et, de manière plus aigüe encore, sa répartition géographique. Il n'y a pas non plus de consensus entre les modèles sur les changements d'humidité en surface des sols, sinon sur un assèchement dans le RCP 8.5 en Méditerranée, dans le nord-est et sud-ouest de l'Amérique du Sud et dans le sud-ouest américain.

Impacts futurs sur le rendement des cultures

Dans le cadre de l'AR5, les impacts futurs sur les rendements des cultures sont mesurés sur la base d'une méta-analyse menée sur un échantillon de plus 1700 estimations publiées dans 91 études entre 2007 et 2012 (aussi publiée dans Challinor et al., 2014). L'analyse se concentre sur les 3 cultures les plus courantes dans la base de données : le maïs, le blé et le riz. L'analyse est ici plus poussée que sur la partie observations des impacts (voir section 4.1), avec un échantillon plus large (1700 points contre 56), et par conséquent plus représentatif des conditions effectives de production, et l'estimation d'un intervalle de confiance à 95%.

Il ressort de cette analyse qu'en l'absence d'adaptation, les rendements du blé et du maïs tropicaux diminuent significativement même pour de faibles augmentations de températures locales (1 à 2°C). Le riz et le maïs en zones tempérées résistent mieux à un faible réchauffement, mais diminuent significativement au-delà d'une hausse de 3°C des températures locales lorsqu'il n'y a pas d'adaptation. Enfin, des pertes de rendement sont possibles en zones tempérées pour les 3 cultures.

Les bénéfices potentiels de l'adaptation sont compris entre +7% et +15% pour les rendements du blé et du riz (contre +10%-15% dans l'AR4), en revanche les études ne mettent en lumière aucun bénéfice potentiel pour le maïs. Parmi les stratégies possibles d'adaptation étudiées, l'adaptation des cultivars et l'irrigation affichent les meilleurs résultats. Les gains de l'adaptation restent relativement stables en fonction des changements de température et de précipitations.

Ces résultats sont dans l'ensemble en accord avec les conclusions de l'AR4. Le point principal de divergence concerne la question des réductions de rendement avec une hausse faible des températures (<2°C) : tandis que l'AR4 concluait avec une confiance médiane qu'un réchauffement modéré augmenterait les rendements dans les latitudes hautes ou moyennes, l'AR5 considère les baisses de rendements du blé en zones tempérées aussi probables qu'improbables. Selon Challinor et al. (2014), l'utilisation accrue de modèles statistiques, qui ont tendance à prédire des impacts plus négatifs du climat sur les rendements dans le futur proche (2020),

pourrait être à l'origine des conclusions plus pessimistes de l'AR5.

L'intervalle de confiance à 95% est moins important dans l'AR5 que dans l'AR4, traduisant une diminution de l'incertitude sur les estimations des rendements agrégés. En revanche la dispersion des résultats est plus grande, sans doute en raison du plus large recours aux modèles globaux grillés plutôt qu'aux modèles « point-based » (Challinor et al., 2014). Cette plus grande dispersion peut traduire soit une meilleure modélisation de la variabilité naturelle soit une plus grande incertitude sur certains points spécifiques.

Parmi les 42 études exprimant les impacts en fonction du temps, plus de 70% d'entre elles projettent des pertes de rendement dès 2030. A partir de 2070, les augmentations de rendement concernent exclusivement les zones tempérées. L'ampleur des pertes de rendement augmente avec le temps : environ 40% des études projettent des pertes de rendement supérieures à 10% à l'horizon 2030/2040, alors qu'à l'horizon 2090/2100, 70% des études prédisent des pertes de rendement supérieures à 10% (Challinor et al., 2014).

D'un point de vue régional, l'Asie du Sud et l'Afrique Australe sont les deux régions qui, en l'absence d'adaptation, souffriraient le plus du changement climatique (IPCC, 2014a). L'Afrique semble particulièrement vulnérable du fait de sa forte dépendance à l'agriculture irriguée, d'une grande variabilité intra- et inter-saisonnière, de sécheresses et inondations récurrentes et de capacités économiques et institutionnelles d'adaptation limitées (IPCC, 2014b ; Boko et al., 2007 ; Roudier et al., 2011). En raison du rôle prépondérant des températures, les réductions de rendement se produiront plus probablement dans les régions qui sont sensibles aux changements de températures, telles que la région Soudanienne (sud du Sénégal, Mali, Burkina Faso, nord du Togo et Bénin), que dans les régions sensibles aux changements de précipitation, telles que la région sahélienne (Niger, Nord du Sénégal et Burkina Faso) (Sultan et al. ; 2013).

L'évaluation des impacts sur l'Afrique sub-saharienne est néanmoins peu robuste en raison d'un manque de données fiables sur les propriétés du sol et les pratiques agricoles (Schlenker et al., 2010 ; Lobell et al., 2011a ; Roudier et al., 2011). Afin d'intégrer cette incertitude, plusieurs études ont combiné les résultats de différents modèles de climat et de végétation, et ont fait ressortir des estimations médianes de changement de rendements significativement négatives, allant de -8% à -22% selon les plantes (Roudier et al., 2011 ; Schlenker et al., 2010).

Impacts futurs sur les prix agricoles et la sécurité alimentaire

L'AR5 conclut avec un niveau de confiance élevé (probabilité : 90%-100%) que les changements de températures et de précipitations conduiront, hors effet de fertilisation du CO₂, à des augmentations de prix agricoles comprises entre +3% et +84%. En tenant compte de l'effet de fertilisation du CO₂, les changements de prix à 2050 sont compris entre -30% et +45%, mais avec cette fois un niveau de confiance sensiblement plus faible (probabilité : 33% à 66%).

Pour établir ces projections, le GIEC se fonde sur 5 études dont l'horizon temporel s'étend au maximum à 2050 (Hertel et al., 2010 ; Baldos and Hertel, 2014 ; Calzadilla et al., 2013 ; Lobell et al., 2013 ; Nelson et al., 2014). Ces estimations sont

réalisées à partir de différentes trajectoires de changement de productivité (voir tableau 1), couvrant la plupart des scénarios de climat possibles et l'incertitude épistémique liée aux modèles de climat et de végétation. La plupart des simulations retenues (40 sur 51) proviennent de l'article de Nelson *et al.* (2014) comparant les résultats de 10 modèles d'agriculture en équilibre général ou partiel dans le cas du scénario RCP 8.5.

Compte tenu du large éventail d'estimations, le niveau élevé de confiance affiché par l'IPCC sur les résultats sans effet CO₂ est difficilement explicable. Cet éventail s'est élargi par rapport à l'AR4. La variation de prix pour un réchauffement à +2°C, correspondant approximativement au changement de température le plus élevé parmi les simulations de l'AR5, était alors comprise entre -10% et +10%. L'AR4 ne retenait cependant que 5 simulations, contre plus de 50 dans l'AR5. Il reste que les résultats fournis par l'AR5 sur les changements apparaissent très dépendants du cadre de modélisation considéré, et semblent dans l'ensemble peu robustes. Ainsi, l'exercice de comparaison de modèles mené par Nelson *et al.* montre que la plus forte augmentation de prix en réponse au changement climatique est produite par le modèle MAgPIE, qui est aussi le modèle le plus contraint, avec une demande agricole inélastique au prix et des surfaces de culture fixes ; à l'inverse, les modèles GCAM et ENVISAGE,

dans lesquels la demande et les surfaces s'ajustent relativement facilement, simulent les variations de prix les plus faibles. Il est par conséquent délicat d'interpréter les résultats de ces modèles sans qu'ils ne soient reliés aux hypothèses qui les sous-tendent. Au-delà des estimations de prix, l'article de Nelson *et al.* fait ressortir un enseignement particulièrement intéressant : en moyenne sur l'ensemble des scénarios, des modèles et des produits agricoles, l'ajustement au choc de productivité se fait principalement en augmentant les surfaces cultivées (contribution = 44%), puis en augmentant les rendements (contribution = 38%) et enfin par une baisse de la demande (contribution = 17%). Ainsi, en moyenne, les modèles sont relativement pessimistes sur la possibilité d'absorber un choc de productivité par une réduction de la demande. En revanche, ils prévoient une réponse relativement importante sur le côté offre, notamment par une augmentation des surfaces agricoles avec de potentielles implications en matière de déforestation et de perte de biodiversité. Notons également que ces études détaillent généralement peu leurs résultats à l'échelle des grandes régions du monde et les effets induits sur le commerce international. Compte tenu du différentiel géographique des impacts du changement climatique, on peut penser que les conséquences sur l'allocation mondiale de la production agricole pourraient être importantes.

Etude	Modèle utilisé	Scénario Climat / Productivité	Horizon temporel	Nombre de simulations
Hertel <i>et al.</i> , 2010	GTAP	Synthèse de la littérature	2030	2
Baldos and Hertel, 2014	SIMPLE	Scénario moyen calculé à partir du modèle LPJmL dans 3 scénarios de climat (SRES A1b, A2, B1) selon 5 modèles de climat (voir Müller <i>et al.</i> , 2010)	2050	2
Calzadilla <i>et al.</i> 2013	GTAP Water	SRES A1B, A2	2020 et 2050	4
Lobell <i>et al.</i> , 2013	SIMPLE	Scénario moyen calculé à partir du modèle LPJmL dans 3 scénarios de climat (SRES A1b, A2, B1) selon 5 modèles de climat (voir Müller <i>et al.</i> , 2010)	2050	3
Nelson <i>et al.</i> 2014	AIM, ENVISAGE, EPPA, FARM, GTEM, MAGNET, GCAM, GLOBIOM, IMAGE, MAgPIE	RCP 8.5 selon 4 combinaisons de modèles climat/végétation	2050	40

Tableau 1 : Caractéristiques des études retenues dans l'AR5 pour les estimations de changements de prix agricoles sous changement climatique

Les variations de prix ne donnent qu'une indication très partielle de l'impact socio-économique du changement climatique. Afin d'approfondir l'analyse, l'AR5 cite un certain nombre d'études fournissant une estimation de l'impact du changement climatique sur la malnutrition (Nelson *et al.*, 2009 ; Baldos et Hertel, 2014 ; Loyd *et al.*, 2011). Baldos et Hertel (2014) estiment qu'en raison du changement climatique⁵, la population victime de malnutrition augmentera de 27 millions en 2050 par rapport à un scénario de référence sans changement climatique. Ce chiffre est compris entre l'estimation basse fournie dans l'AR4 à l'horizon 2080 (+5-10 millions dans le scénario SRES B1) et l'estimation haute (+120-170 millions dans le scénario SRES B2). Lorsque l'effet de fertilisation du CO₂ est pris en compte, le nombre de malnutris diminue de 35 millions de personnes par rapport au scénario de référence⁶. Les

résultats de Nelson *et al.* (2010) sont sensiblement plus pessimistes puisqu'ils considèrent que le changement climatique entraînera une augmentation de la malnutrition en 2050 comprise entre 20 et 25 millions pour les seuls enfants âgés de moins de 5 ans. Ces résultats sont dus en partie à un scénario de changement de rendements plus défavorable que celui retenu par Baldos et Hertel (2014). Néanmoins, il y a dans l'ensemble un consensus au sein de la littérature citée par l'AR5 sur le fait que la contribution du changement climatique à la malnutrition est de second ordre par rapport aux autres déterminants socio-économique tels que la population ou le revenu par tête.

Ainsi que le souligne l'AR5, une limite des études mesurant l'effet du changement climatique sur la malnutrition est de considérer que les revenus sont exogènes alors qu'ils pourraient être un déterminant plus important de l'insécurité alimentaire que les prix eux-mêmes (Hertel *et al.*, 2010). Ainsi, si les agriculteurs sont price-takers⁷ et si la demande est inélastique, une réduction de l'offre, résultant par exemple du changement climatique, augmentera les revenus des agriculteurs avec des bénéfices potentiels en matière de sécurité alimentaire pour cette catégorie de population. Ce point est particulièrement important sachant que l'insécurité alimentaire touche essentiellement les agriculteurs eux-mêmes. Hertel *et al.* (2010) étudie cet effet sur un échantillon de 15 pays en utilisant le modèle d'équilibre général GTAP associé à des distributions de revenus des ménages agrégés selon leur source primaire de revenu. Sur la base de cette méthodologie, cette étude montre que suite à une réduction modeste de productivité, la pauvreté diminue si les pauvres sont principalement auto-entrepreneurs dans l'agriculture, mais augmente si les pauvres sont principalement des salariés urbains.

Les lacunes du rapport

Impact du changement climatique sur les terres potentiellement cultivables

⁵ Le scénario retenu est décrit tableau 1.

⁶ L'AR5 mentionne un chiffre de 49 millions de malnutris supplémentaires qui n'apparaît pas dans l'article de Baldos et Hertel (2014). Cela s'explique très probablement par le fait que l'AR5 cite une version intermédiaire de l'article qui a été corrigée dans sa version définitive publiée.

⁷ En français preneur de prix, par opposition aux vendeurs qui ont un pouvoir de marché et qui peuvent dans ce cas être « price-makers » ou faiseurs de prix.

Contrairement à l'AR4, le 5ème rapport du GIEC ne donne pas d'indications sur les surfaces de terres potentiellement cultivables. A la date de publication du rapport, les études de référence sur le sujet (Fischer *et al.*, 2002 ; Ramankutty *et al.*, 2002) dataient de plus de 10 ans et ont probablement été jugées trop anciennes pour pouvoir figurer dans le rapport. L'article de Zabel *et al.* (2014), actualisant les connaissances sur le sujet, a été publié peu de temps après la sortie de l'AR5. Cette étude évalue les ressources foncières sur la base de règles écologiques reliant le potentiel cultivable des terres en fonction de 8 paramètres de sols (texture, ph, salinité, carbone organique etc...), 2 paramètres climatiques (température, précipitation), et 1 paramètre de terrain (la pente). Le scénario climatique retenu est le scénario SRES A1B issu du modèle ECHAM 5. Zabel *et al.* (2014) montrent que les surfaces de terres cultivables augmenteront de 560 millions d'ha d'ici 2100 sous l'effet du changement climatique. Le potentiel cultivable s'accroîtra principalement sous les hautes latitudes, le Canada et la Russie comptant à eux seuls plus de 500 millions d'ha cultivables supplémentaires. Les zones tropicales subiront à la fois une perte en terres potentiellement cultivables (-100 millions d'ha), et en surfaces permettant plusieurs récoltes annuelles (-300 millions d'ha). Zabel *et al.* soulignent par ailleurs que si les surfaces cultivables augmenteront, le potentiel cultivable moyen d'une unité de terre décroîtra avec le changement climatique. Les conclusions de Zabel *et al.* ne contredisent donc pas celles de l'AR5 concernant l'évolution des rendements en fonction du changement climatique.

Ces résultats sont globalement cohérents avec les précédentes études : Fischer *et al.* (2002) et Ramankutty *et al.* (2002) prévoyant également des gains en surfaces potentiellement cultivables dans les hautes latitudes et des pertes dans les zones tropicales. Les estimations de surfaces supplémentaires cultivables fournies par Ramankutty *et al.* à l'échelle globale (+660 millions d'ha en 2100) sont proches de celles fournies par Zabel *et al.*

Impacts futurs sur l'élevage

Le déficit de connaissance à propos des impacts futurs du changement climatique sur l'élevage est important, en particulier dans les zones tropicales et sous-tropicales (Thornton *et al.*, 2009). L'AR5 reste donc relativement évasif sur la sensibilité de la production animale au changement climatique, soulignant les nombreuses interactions, notamment entre plantes et animaux, qui rendent l'analyse particulièrement complexe. Les stress thermique et hydrique sont des facteurs limitants importants pour l'élevage, entraînant une hausse possible de la mortalité. A l'inverse, le rallongement des périodes de croissance et l'augmentation des concentrations en CO₂ pourraient permettre d'augmenter la production de fourrage et la productivité des pâtures, l'AR5 restant toutefois très prudent sur ce point.

L'impact du changement climatique sur l'élevage est également particulièrement difficile à évaluer car les systèmes de productions s'étendent sur des environnements biophysiques et socio-écologiques variés, et ont par conséquent un large éventail de possibilités en matière d'adaptation (IPCC, 2014a). Dans les pays développés, les systèmes d'élevage sont en général adaptables et résilients. En revanche, dans les pays en développement, les ménages qui vivent de

l'élevage pourraient être plus vulnérables aux changements climatiques (Thornton, 2008).

Variabilité climatique

Bien que l'AR5 souligne l'importance de la variabilité interannuelle des rendements comme facteur de l'insécurité alimentaire, affectant aussi bien la résilience des systèmes alimentaires que la stabilité de la provision et l'accès alimentaire, aucune évaluation quantitative de son impact sur les prix et la sécurité alimentaire n'est fournie dans le rapport. S'il existe un certain nombre d'études sur la gestion des stocks alimentaires (par exemple : Larson *et al.*, 2013), l'évaluation de l'impact futur du changement climatique est en effet largement sous-étudiée dans la littérature scientifique (Thornton *et al.*, 2014).

A l'échelle globale, l'AR5 mentionne l'étude menée par Müller *et al.* (2014) estimant la variabilité interannuelle entre 2000 et 2050 dans le scénario RCP 8.5 en utilisant le modèle de végétation LPJmL. La variabilité des rendements est mesurée à partir du coefficient de variation (CV), défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne. Les résultats indiquent une augmentation du CV de plus de 5% dans 64% des cas et une diminution du CV de plus de 5% dans 29% des cas. Il est cependant difficile de conclure à partir de ces chiffres sur les conséquences éventuelles en matière de sécurité alimentaire car l'étude ne fournit pas d'indications sur la distribution géographique des impacts. Par ailleurs, une augmentation du CV peut être due à une augmentation de l'écart-type comme à une réduction de la moyenne.

L'AR5 fournit également quelques indications qualitatives sur les impacts potentiels de la variabilité sur la sécurité alimentaire, en se basant notamment sur l'étude de Codjoe & Owusu (2011) menée sur 3 communautés ghanéennes. Il montre ainsi qu'en raison de l'importance du séchage dans le processus de stockage, les inondations et le froid rendent le stockage plus difficile tandis que la sécheresse extrême le facilite. Les inondations peuvent aussi couper les routes reliant les zones de production aux marchés.

Conclusion : quels apports pour une prospective sur la sécurité alimentaire ?

L'AR5 confirme dans l'ensemble les conclusions du précédent rapport : un réchauffement même modéré aura un impact négatif sur les rendements des cultures dans les basses latitudes ; les baisses de rendement deviennent significatives dans toutes les régions du monde au-delà d'un réchauffement de +2°C à +3°C ; de 7% à 15% des pertes de rendement peuvent être évitées grâce aux mesures d'adaptation. La principale divergence entre les 2 derniers rapports du GIEC concernent les gains de rendement sous les hautes latitudes mentionnés dans l'AR4 en cas de réchauffement modéré, alors que l'AR5 indique dans ce cas de possibles pertes de rendement dans les zones tempérées.

Malgré certaines avancées, par exemple sur l'estimation des impacts observés du changement climatique à l'échelle mondiale, de nombreuses incertitudes et zones d'ombres subsistent dans l'AR5. Elles concernent principalement la question de l'élevage et celle de la variabilité climatique. Ces lacunes sont particulièrement problématiques car il s'agit de

deux questions clés en matière de sécurité alimentaire. En effet, en plus d'être une source d'alimentation, l'élevage est une source de revenus, par ailleurs généralement plus stables que les revenus issus des cultures, d'énergie (traction animale), d'engrais et de biens d'autres services (peaux, fibres etc...). La variabilité climatique est un facteur prépondérant de l'insécurité alimentaire car en multipliant les événements climatiques, elle affaiblit progressivement les capacités adaptatives des agriculteurs, qui se voient par exemple dans l'obligation de vendre leur équipement agricole pour compenser les pertes de revenus liées aux faibles récoltes successives.

Si les impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaires semblent inévitables, il existe un certain consensus au sein de la littérature recensée par le GIEC sur le fait que ce sera un déterminant de second ordre de l'insécurité alimentaire, derrière les facteurs socio-économiques tels que la croissance démographique ou le revenu par tête. L'AR5 peine en revanche à fournir avec plus de précisions des estimations quantitatives. L'éventail des résultats sur l'impact du changement climatique sur les prix est particulièrement large (+3% à + 84%), et les estimations sont très dépendantes des hypothèses retenues dans chacun des modèles sur les élasticités rendement/surface/demande aux prix agricoles. Les estimations de la prévalence de la malnutrition citées dans l'AR5 se limitent encore uniquement à la question de la disponibilité alimentaire en laissant de côté les autres dimensions de la sécurité alimentaire, telles que la stabilité ou l'accès, pourtant tout aussi importantes. Des progrès significatifs ont été réalisés depuis l'AR4 en matière d'évaluation des performances des modèles économiques utilisés, et surtout concernant la prise en compte des effets revenus et des impacts du changement climatiques en fonction des différentes catégories de population. Dans l'ensemble, cependant, les estimations de l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire sont particulièrement délicates car elles résultent d'une chaîne d'évaluation conjuguant des modèles de climatiques, biophysiques et économiques, dont chacun des maillons est associé à une importante incertitude.

S'il est difficile de s'appuyer sur les estimations quantitatives fournies par l'AR5, les travaux du GIEC permettent en revanche d'identifier les principaux déterminants des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire. Nous les citons ici dans l'ordre de la chaîne de causalité de l'insécurité alimentaire. Le premier de ces déterminants concerne les changements de températures. Ils sont responsables de la modification de la durée de la période de croissance des plantes et de la réduction de l'indice de récoltes. Ils sont aussi responsables des changements de précipitations (IPCC, 2013), qui impactent particulièrement la sécurité alimentaire, et seront probablement d'une plus grande ampleur (Lobell *et al.*, 2008). D'après les estimations du GIEC, on peut penser qu'un réchauffement de +2°C à +3°C constitue un point de basculement au-delà duquel les impacts seront significatifs sous toutes les latitudes. Le second processus concerne l'effet direct des cycles biogéochimiques sur les plantes. Si une évaluation quantitative est à ce jour délicate, l'AR5 confirme l'effet positif du CO₂ et négatif de l'ozone sur les rendements, et indique un possible effet négatif du CO₂ sur le contenu en protéine des plantes.

Le troisième déterminant renvoie aux capacités adaptatives des sociétés. Il s'agit ici aussi bien des ajustements agronomiques à l'échelle du champ ou de la ferme (irrigation, date de semis etc.), que des stratégies d'adaptation à plus large échelle, telles que l'expansion agricole ou le changement de quantité et de composition de la demande de biomasse. Enfin, le dernier déterminant concerne les caractéristiques socio-économiques (ratio rural/urbain, pourcentage d'agriculteurs, répartition de la consommation alimentaire etc...) qui influent sur la vulnérabilité des sociétés à l'insécurité alimentaire résultant d'un choc climatique.

Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre de l'exercice de prospective « Agrimonde Terra » qui vise à étudier comment la sécurité alimentaire pourra à l'horizon 2050 être assurée en tenant compte des changements possibles dans l'utilisation des terres. Je remercie Patrice Dumas, Marie de Lattre Gasquet et Chantal Le Mouel pour leur relecture de versions précédentes de cet article, ainsi que Benjamin Sultan pour les éclairages qu'il m'a fournis sur certains points du 5^{ème} rapport du GIEC.

Références

Baldos, U. and T.W. Hertel, 2014. Global food security in 2050: The role of agricultural productivity and climate change, *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, (58):1-18, doi: 10.1111/1467-8489.12048.

Boko, M., I. Niang, A. Nyong, C. Vogel, A. Githeko, M. Medany, B. Osman-Elasha, R. Tabo, and P. Yanda, 2007. Africa. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.433-467.

Calzadilla, A., K. Rehdanz, R. Betts, P. Falloon, A. Wiltshire, and Tol, R. S. J., 2013. Climate change impacts on global agriculture. *Climatic Change*, 120, 1-18-357-374.

Challinor A.J., Watson J., Lobell D.B., Howden S.M., Smith D.R., Chhetri N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation, *Nature Climate Change*, 4, pp.287-291. doi: 10.1038/nclimate2153.

Codjoe S., Owusu G., 2011. Climate change/variability and food systems: evidence from the Afram Plains, Ghana. *Regional Environmental Change*, 11, 753-765.

El-Sharkawy, M.A., 2012. Stress-tolerant cassava: the role of integrative ecophysiology-breeding research in crop improvement. *Open Journal of Soil Science*, 2 (2), 162-186.

Headey, D., Fan, S., 2008. Anatomy of a crisis: The causes and consequences of surging food prices. *Agric. Econ.* 39, 375-391.

Hertel, T.W., M.B. Burke, and D.B. Lobell, 2010. The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030. *Global Environmental Change*, 20, 577-585.

HLPE, 2012. Sécurité alimentaire et changement climatique. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome, 2012.

Iqbal, M.M., M.A. Goheer, and A.M. Khan, 2009. Climate-change Aspersions on Food Security of Pakistan. *Science Vision*, 15 (1), 15-23.

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, 2014a: *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. 1150 pp.

IPCC, 2014b: *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, 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. 696 pp.

Jarvis, A., J. Ramirez-Villegas, B. Herrera Campo, and C. Navarro-Racines, 2012. Is cassava the answer to African climate change adaptation? *Tropical Plant Biology*, 51, 9-29.

Larson D., Lampietti J., Gouel C., Cafiero C., and Roberts J., 2014. Food Security and Storage in the Middle East and North Africa *World Bank Econ Rev.* 28 (1): 48-73 first published online June 11, 2013 doi:10.1093/wber/lht015.

Lobell, D. and M. B. Burke, 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 3, 034007.

Lobell, D.B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J., 2011a. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 333(6042): 616-620.

Lobell, D.B., M. Bänziger, C. Magorokosho, and B. Vivek, 2011b. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change*, 1, 42-45.

Lobell, D.B., Hammer, G.L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M.J. and Schlenker, W., 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3: 497-501.

- Lloyd, S. J., R. S. Kovats and Z. Chalabi, 2011. Climate change crop yields and undernutrition: development of a model to quantify the impact of climate scenarios on child undernutrition. *Environmental Health Perspectives*, 119, 1817-1823.
- Mearns, L. O., T. Mavromatis, E. Tsvetsinskaya, C. Hays, and W. Easterling (1999). Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low spatial resolution climate change scenarios, *J. Geophys. Res.*, 104(D6), 6623–6646, doi:10.1029/1998JD200061.
- Moriondo, M., C. Giannakopoulos, and M. Bindi, 2011. Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic Change*, 104, 679-701.
- Müller et al., 2013. Projecting Future Crop Productivity for Global Economic Modeling. *Agricultural Economics*.
- Myers, S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D. B., Bloom, A. J., Carlisle, E., Dietterich, L. H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N. M., Nelson, R. L., Ottman, M. J., Raboy, V., Sakai, H.; Sartor, K. A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M., Usui, Y., 2014. Increasing CO₂ Threatens Human Nutrition. Myers, S. et al. 2014. *Nature*. 510:139-142. DOI 10.1038/nature13179.
- Nelson G.C., Rosegrant MW, Palazzo A, Gray I, Ingersoll C, Robertson R, Tokgoz S, Zhu T, Sulser TB, Ringler C, Msangi S, You L., 2010. Food security, farming, and climate change to 2050: challenges to 2050 and beyond. IFPRI Issue Brief No. 66. Washington DC, USA: International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Nelson, G.C. et al., 2014. Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree? *Agricultural Economics*, 45(1).
- Paillard, S., Treyer, S., and Dorin, B. (Eds.). *Agrimonde, Scenarios and Challenges for Feeding the World in 2050*, Quae, Versailles, 2011.
- Pleijel, H. and J. Uddling, 2012. Yield vs. Quality trade-offs for wheat in response to carbon dioxide and ozone. *Global Change Biology*, 18, 596-605.
- 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 and Biogeography* 11: 377-392.
- Roudier, P., B. Sultan, P. Quirion, and A. Berg, 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change*, 21(3), 1073-1083.
- Rosenthal, D. and D.R. Ort, 2012. Examining Cassava's Potential to Enhance Food Security Under Climate Change. *Tropical Plant Biology*, 5, 30-38.
- Schlenker, W. and D.B. Lobell, 2010. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1).
- Sultan, B., P. Roudier, P. Quirion, A. Alhassane, B. Muller, M. Dingkuhn, P. Ciais, M. Guimberteau, S. Traore, and C. Baron, 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, 8(1).
- Thornton P K, Notenbaert A, van de Steeg J and Herrero M, 2008. The livestock-climate-poverty nexus: A discussion paper on ILRI research in relation to climate change. ILRI, Nairobi, Kenya, 80 pp, <http://www.dfid.gov.uk/r4d/Output/177861/Default.aspx>.
- Thornton, P.K., J. van de Steeg, A. Notenbaert, and M.K. Herrero, 2009. Impact of Climate Change on Livestock and Livestock Systems in Developing Countries: A Review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101, 113-127.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. and Challinor, A. J., 2014. Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology*. doi: 10.1111/gcb.12581.
- Trnka, M., J.E. Olesen, K.C. Kersebaum, A.O. Skjelvåg, J. Eitzinger, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, R. Rötter, A. Iglesias, S. Orlandini, M. Dubrovsky, P. Hlavinka, J. Balek, H. Eckersten, E. Cloppet, P. Calanca, A. Gobin, V. Vucetic, P. Nejedlik, S. Kumar, B. Lalic, A. Mestrea, F. Rossi, J. Kozyra, V. Alexandrov, D. Semerádová, and Z. Zalud, 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, 17, 2298-2318.
- 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.