

SUPPORTS DE FORMATION DU GCE POUR L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE ET DE L'ADAPTATION

Chapitre 7 : Agriculture



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
7.1 INTRODUCTION.....	1
7.2 FACTEURS DE CHANGEMENT	1
7.2.1 Effets de la variabilité climatique actuelle	1
7.2.2 Les facteurs de réponse de l'agriculture aux changements climatiques 2	
7.2.3 Facteurs non climatiques.....	6
7.3 IMPACTS POTENTIELS	6
7.3.1 Cultures agricoles et bétail	7
7.3.2 Sommaire de la situation	8
7.4 EXIGENCES RELATIVES AUX METHODES, OUTILS ET DONNEES....	13
7.4.1 Considérations générales.....	13
7.4.2 Limites et sources d'incertitude	18
7.4.3 Combiner les scénarios des changements climatiques avec les modèles et les outils agricoles.....	20
7.4.4 Indices agroclimatiques et systèmes d'information géographique (GIS) 23	
7.4.5 Modèles statistiques et fonctions de rendement.....	23
7.4.6 Modèles de culture basés sur des processus.....	24
7.4.7 CALIBRAGE ET VALIDATION DES MODÈLES DE CULTURE.....	28
7.4.8 Lier les modèles de culture et les modèles statistiques de la réponse de rendement	30
7.4.9 Outils économiques	33
7.4.10 Information sur les ensembles des données	36
7.5 ÉVALUATIONS INTEGREES	38
7.6 ADAPTATION	39



7.6.1	Planification	39
7.6.2	Intégration	48
7.6.3	Prise en compte.....	49
7.6.4	Suivi et évaluation	50
7.7	REFERENCES	51

7.1 INTRODUCTION

Selon le quatrième Rapport d'évaluation (RE4) du Groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Easterling et coll., 2007), les changements climatiques auront, à divers degrés, de nombreux impacts sur les cultures et le bétail. Actuellement, environ 40 pour cent de la superficie terrestre est gérée en terre cultivée ou en pâturage (Foley et coll., 2005). De plus, il est estimé que les moyens de subsistance d'environ 450 millions de personnes dans les régions en développement dépendent entièrement des écosystèmes gérés (FAO, 2004), ce qui reflète l'échelle d'importance de la question du bien-être humain.

De nombreuses études documentent les implications des changements climatiques pour l'agriculture et montrent aussi qu'ils sont une menace significative pour le développement durable, particulièrement pour les Parties non visées à l'annexe 1. Identifier les régions, populations et systèmes de production alimentaire qui courent le plus de risques par rapport aux changements climatiques peut aider à définir les priorités d'adaptation. Ce chapitre est consacré aux méthodes qui permettent de réaliser ces évaluations et comprend des exemples d'applications dans les pays en développement et un aperçu des connaissances existantes sur le sujet. Les mérites de chaque approche varient selon le niveau d'impact étudié et les approches peuvent souvent apporter un soutien mutuel. Par exemple, les indices agroclimatiques simples fournissent souvent les informations nécessaires concernant la réponse des récoltes aux précipitations et aux températures variables dans des zones géographiques étendues ; des modèles spécifiques réservés aux récoltes sont utilisés pour tester une gestion alternative qui à son tour peut être utilisée comme composante d'un modèle économique qui analyse la vulnérabilité régionale ou les stratégies d'adaptation nationales. Par conséquent, un mélange d'approches, de méthodes et d'outils constitue souvent la meilleure approche.

7.2 FACTEURS DE CHANGEMENT

7.2.1 EFFETS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE ACTUELLE

Dans de nombreuses régions du monde, telles que l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Amérique centrale, l'Asie du Sud-Est et la région du Pacifique, les climats sont extrêmement variables d'année en année et des sécheresses récurrentes ainsi que des problèmes d'inondation affectent souvent des pays entiers sur des périodes de plusieurs années. Ceux-ci provoquent souvent de graves problèmes socioéconomiques.

L'agriculture est fortement dépendante des ressources en eau et des conditions climatiques, particulièrement dans les régions du monde qui sont très sensibles aux risques liés au climat, telles que l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Amérique centrale, l'Asie



et le Pacifique. Quelques pays dans ces régions où les situations économiques et sociales sont souvent instables sont extrêmement vulnérables aux changements des facteurs environnementaux. C'est particulièrement le cas dans les pays où la technologie de tampon contre les sécheresses et les inondations est moins avancée et où les principaux facteurs physiques qui affectent la production (sols, terrain et climat) sont les moins adaptés aux exploitations agricoles. La production agricole est devenue extrêmement sensible aux importantes fluctuations météorologiques d'une année à l'autre. Les maladies ou les infestations parasitaires dépendent aussi du climat et ont tendance à causer plus de dommages dans les pays où les niveaux technologiques sont les moins avancés.

7.2.2 LES FACTEURS DE REPONSE DE L'AGRICULTURE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'estimation des réponses agricoles futures aux changements climatiques se base généralement sur les scénarios des futurs changements climatiques grâce aux méthodes et aux approches décrites au chapitre 3. Comme cela est souligné ci-dessous, un certain nombre de scénarios sont produits pour refléter les incertitudes inhérentes à la prédiction des conditions futures.

L'agriculture est un secteur complexe comprenant différents paramètres principaux (environnementaux, économiques et sociaux). Il est maintenant bien reconnu que les récoltes sont très sensibles aux changements climatiques (Easterling et coll., 2007), avec différents effets selon la région. Le Groupe de travail II du GIEC RE4 évalue une réduction générale des rendements agronomiques potentiels et une diminution de la disponibilité de l'eau pour l'agriculture et les populations dans de nombreuses parties du monde en voie de développement dues aux changements climatiques ([Tableau 7 - 1](#)).

Tableau 7 -2 : Changements climatiques et facteurs connexes liés à la production agricole et la sécurité alimentaire (adapté de Parry et coll., 2004) et Easterling et coll., 2007)

Facteur climatique	Direction du changement	Conséquences et facteurs qui interagissent avec la production agricole et la sécurité alimentaire
Élévation du niveau de la mer	Augmentation	Intrusion du niveau de la mer dans les zones côtières (agricoles) et salinisation de l'alimentation en eau
Intensité/ruissellement des précipitations	Intensification du cycle hydrologique, donc augmentation générale, mais avec des variations régionales	Changement des modèles d'érosion et d'accrétion, changement des impacts des tempêtes, de l'occurrence des inondations et des dommages dus aux tempêtes, de l'engorgement par l'eau, augmentation des organismes nuisibles



Stress dû à la chaleur	Augmentation des vagues de chaleur	Domage à la formation des grains, augmentation de certains organismes nuisibles
Sécheresse	Très peu connue, mais une augmentation significative de la variabilité spatiale et temporelle est à prévoir	Mauvaises récoltes, diminution des rendements, compétition pour l'eau
Dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂)	Augmentation	La productivité des récoltes augmente mais aussi celle des mauvaises herbes et par conséquent la compétition avec les cultures.

Les principaux facteurs des réponses agricoles aux changements climatiques sont les effets biophysiques (Tableau 7-2 **Caractérisation des impacts agronomiques, capacité d'adaptation et résultats du secteur**)

Impact biophysique	Niveau d'incertitude	Niveau d'intensité prévue des effets néfastes	Niveau de capacité d'adaptation	Impacts socioéconomiques et autres impacts secondaires
Changements des conditions de croissance des cultures	Moyen	Élevé pour quelques cultures et régions	Modéré à élevé	Changements concernant les systèmes agricoles optimaux, délocalisation de l'industrie de transformation agricole, risque économique accru, perte de revenu rural, pollution due au lessivage des nutriments, diminution de la biodiversité
Changements des conditions optimales pour la production du bétail	Élevé	Moyen	Élevé pour les systèmes de production intensifs	Changements concernant les systèmes agricoles optimaux, perte de revenu rural
Changements dans les	Moyen à faible	Élevé pour les pays	Modéré	Augmentation de la demande pour l'irrigation, diminution des

précipitations et de la disponibilité des ressources en eau		en développem ent		récoltes, augmentation du risque de salinisation des sols, augmentation de la pénurie d'eau, perte de revenu rural
Changements concernant les organismes nuisibles	Élevé à très élevé	Moyen	Modéré à élevé	Pollution due à l'usage accru des pesticides, diminution du rendement et de la qualité des récoltes, augmentation du risque économique, perte de revenu rural
Changements concernant la fertilité et l'érosion des sols	Moyen	Élevé pour les pays en développement	Modéré	Pollution par le lessivage des nutriments, diminution de la biodiversité, diminution du rendement des récoltes, abandon des terres, risque de désertification accru, perte de revenu rural

) et les facteurs socioéconomiques (Tableau 7-). La production des cultures est affectée biophysiquement par des variables météorologiques changeantes, notamment la hausse des températures, le changement du régime des précipitations et une élévation des taux de dioxyde de carbone atmosphérique. Les effets biophysiques des changements climatiques sur la production agricole dépendent de la région et du système agricole et ils varient à travers le temps.

Les facteurs socioéconomiques influent sur les réponses aux changements en matière de productivité des cultures, de prix et d'avantages comparatifs. La réponse finale dépend des stratégies d'adaptation dans chaque région et pour chaque système agricole. La combinaison des effets biophysiques et socioéconomiques peut avoir pour conséquence :

- des changements dans la croissance des mélange de cultures et donc dans le type d'exploitation agricole et l'utilisation des terres rurales ;
- des changements concernant la production, les revenus agricoles et les emplois ruraux ;
- des changements concernant les revenus ruraux, les contributions au produit intérieur brut (PIB) et les gains concernant les exportations agricoles.



Tableau 7-2 Caractérisation des impacts agronomiques, capacité d'adaptation et résultats du secteur

Impact biophysique	Niveau d'incertitude	Niveau d'intensité prévue des effets néfastes	Niveau de capacité d'adaptation	Impacts socioéconomiques et autres impacts secondaires
Changements des conditions de croissance des cultures	Moyen	Élevé pour quelques cultures et régions	Modéré à élevé	Changements concernant les systèmes agricoles optimaux, délocalisation de l'industrie de transformation agricole, risque économique accru, perte de revenu rural, pollution due au lessivage des nutriments, diminution de la biodiversité
Changements des conditions optimales pour la production du bétail	Élevé	Moyen	Élevé pour les systèmes de production intensifs	Changements concernant les systèmes agricoles optimaux, perte de revenu rural
Changements dans les précipitations et de la disponibilité des ressources en eau	Moyen à faible	Élevé pour les pays en développement	Modéré	Augmentation de la demande pour l'irrigation, diminution des récoltes, augmentation du risque de salinisation des sols, augmentation de la pénurie d'eau, perte de revenu rural
Changements concernant les organismes nuisibles	Élevé à très élevé	Moyen	Modéré à élevé	Pollution due à l'usage accru des pesticides, diminution du rendement et de la qualité des récoltes, augmentation du risque économique, perte de revenu rural
Changements concernant la fertilité et l'érosion des sols	Moyen	Élevé pour les pays en développement	Modéré	Pollution par le lessivage des nutriments, diminution de la biodiversité, diminution du rendement des récoltes, abandon des terres, risque de

désertification accru, perte de revenu rural

Tableau 7-3 : Caractérisation des impacts concernant les systèmes agricoles agrégés, capacité d'adaptation et résultats du secteur

Impacts socioéconomiques	Niveau d'incertitude	Niveau d'intensité prévue des effets néfastes	Niveau d'adaptation autonome (capacité de réponse privée)	Autres impacts
Changements des systèmes agricoles optimaux	Élevé	Élevé pour les régions où les systèmes agricoles optimaux actuels sont extensifs	Modéré	Changements dans les activités de cultures et de production de bétail, délocalisation de l'industrie de transformation agricole, perte de revenu rural, pollution due au lessivage des nutriments, diminution de la biodiversité
Délocalisation de l'industrie de transformation agricole	Élevé	Élevé pour quelques industries alimentaires qui ont besoin de grande infrastructure ou de main-d'œuvre locale	Modéré	Perte de revenu rural, perte d'héritage culturel
Risque (économique) accru	Moyen	Élevé pour les cultures près des limites climatiques	Faible	Perte de revenu rural
Perte de revenu rural et d'héritage culturel	Élevé	(Sans caractéristique)	Modéré	Abandon des terres, risque accru de désertification, diminution du bien-être dans les sociétés rurales, migration vers les zones urbaines, diminution de la biodiversité

7.2.3 FACTEURS NON CLIMATIQUES

Les facteurs non climatiques comprennent l'utilisation et la dégradation des terres, les processus géologiques, l'urbanisation et la pollution, ils affectent le secteur agricole directement et indirectement par leurs effets sur le climat. Ces facteurs peuvent opérer indépendamment ou en association avec d'autres (Lepers et coll., 2004).

Hazell et Wood (2007) ont une approche utile en abordant les facteurs non climatiques des changements dans le secteur agricole sur trois échelles distinctes :

Facteurs à l'échelle mondiale : ils affectent l'agriculture partout dans le monde, mais à des degrés variables. Ces facteurs comprennent, sans s'y limiter, le commerce international et la mondialisation des marchés, les politiques agricoles de l'OCDE, la mondialisation rapide de la science et de l'accès à la connaissance facilitée par les options de communication mondiale en expansion. Ces options peuvent servir à accélérer le flux d'information, de technologies et de produits en rapport avec le développement agricole.

Facteurs à l'échelle du pays : ils affectent toute l'agriculture à l'intérieur d'un pays, bien que certains facteurs tels que de faibles infrastructures et un accès réduit au marché puissent mener à des impacts spatialement différenciés. Les principaux facteurs comprennent les revenus et l'urbanisation, les changements des chaînes de marché et les changements de la politique générale.

Facteurs à l'échelle locale : ils sont spécifiques à chaque zone géographique locale et sont formés de différents systèmes de production agricole. Les facteurs pertinents comprennent la pauvreté, la pression démographique, la santé, la conception de la technologie, les droits à la propriété, l'infrastructure et l'accès au marché ainsi que les opportunités en dehors du monde agricole.

Ce qui précède concernant les facteurs non climatiques reflète le rôle essentiel de l'économie, mondialement et localement, sur les pratiques et les systèmes agricoles. En plus de ces principaux facteurs économiques, un ensemble de facteurs environnementaux importants, comprenant l'activité volcanique, les tremblements de terre et les tsunamis, la pollution et les espèces invasives, ont une influence significative sur les systèmes agricoles.

7.3 IMPACTS POTENTIELS

Les changements climatiques affectent tous les secteurs de l'agriculture de multiples façons qui varient d'une région à l'autre, parce qu'ils réduisent la prévisibilité des tendances météorologiques saisonnières et augmentent la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les cyclones et les vagues de chaleur (FAO, 2011). Les impacts des changements climatiques sur le secteur



agricole (Tableau 5-4) sont bien documentés grâce à plusieurs organismes et à des documents évalués par des pairs, notamment le GIEC et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Cette section présentera les principaux impacts sur les cultures agricoles, le bétail, les sous-secteurs de la sylviculture et de la pêche afin de s'aligner plus étroitement sur les résultats actualisés du RE4.

Tableau 7-4 : Direction probable du changement concernant de larges domaines d'impact dans l'agriculture (adapté de Easterling et coll., 2007)

Impact biophysique	Direction du changement	Niveau d'évaluation
Emplacements optimaux des zones de culture	Changement	Élevé
Productivité des récoltes	Changement	Élevé
Exigences en matière d'irrigation	Augmentation	Élevé
Érosion et salinité des sols	Augmentation	Moyen
Dommages causés par des événements climatiques extrêmes	Augmentation	Moyen
Dégradation environnementale	Augmentation	Moyen
Organismes nuisibles et maladies	Augmentation	Moyen

7.3.1 CULTURES AGRICOLES ET BETAIL

Les impacts à l'échelle mondiale sur les systèmes alimentaires, tels que les cultures, pourraient être relativement modestes pendant la première moitié du 21^e siècle, cependant ils deviendront progressivement plus importants dans la seconde moitié du siècle (Easterling et coll., 2007). D'après les prévisions, la production des cultures dans les pays en développement sous les basses latitudes en subira plus les effets, et plus tôt, que les pays sous les moyennes et hautes latitudes à cause d'une combinaison de conditions agroclimatiques, socioéconomiques et technologiques défavorables (Alexandratos, 2005). Des systèmes de production du bétail et de pâturages similaires existent sous la plupart des climats et vont des systèmes pastoraux extensifs avec des herbivores pâturant aux systèmes intensifs basés sur le fourrage et les récoltes de céréales, où les animaux sont généralement gardés à l'intérieur dans un environnement plus contrôlé (Easterling et coll., 2007). Les changements climatiques ont des effets directs et indirects sur la productivité du bétail à cause des changements dans la disponibilité des fourrages et des pâtures (FAO, 2011). Les impacts sur la production des pâturages et du bétail seront dus à l'augmentation de la concentration de dioxyde de



carbone (CO₂), en liaison avec les changements des précipitations et des températures qui auront probablement des implications significatives sur les herbages et les prairies, avec une augmentation de la production des herbages tempérés humides, mais une diminution dans les régions arides et semi-arides (Easterling et coll., 2007). Des impacts spécifiques pour les cultures, les pâturages et le bétail par région sont présentés dans le et le Tableau 7-.

7.3.2 SOMMAIRE DE LA SITUATION

Un ensemble considérable de documents concernant les impacts des changements climatiques et l'agriculture ont été publiés ces dernières années par des organismes multilatéraux, des gouvernements et des universités. Il est très clair que les changements climatiques auront des impacts variés à la fois spatialement et temporellement sur les principaux sous-secteurs, notamment les cultures servant à l'alimentation et le bétail.

Plus important encore, les changements prévus concernant la fréquence et la sévérité des événements climatiques extrêmes peuvent avoir des conséquences plus graves sur la production alimentaire et forestière que les changements prévus annuellement concernant la température et les précipitations (Easterling et coll., 2007). Un réchauffement modéré suite aux changements climatiques pourrait être bénéfique pour les rendements des cultures et les pâturages dans les régions de moyennes et hautes latitudes. Cependant, un léger réchauffement pourrait diminuer les rendements dans les régions de basses latitudes et saisonnièrement sèches (Easterling et coll., 2007).

Tableau 7-5 : Sommaire des conclusions sélectionnées pour le secteur agricole, par incrément de réchauffement (Easterling et coll., 2007)

Variation de température	Sous-secteur	Région	Constatation
+1 à +2 °C	Cultures alimentaires	Latitudes moyennes à élevées	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du froid allégée pour toutes les cultures • Adaptation du maïs et rendement du blé en augmentation de 10 à 15 %, aucun changement pour le rendement du riz, la variation régionale est élevée
	Pâturages et bétail	Tempérée	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du froid allégée pour les pâturages, augmentation saisonnière de la fréquence du stress dû à la chaleur pour le bétail
	Cultures alimentaires	Basses latitudes	<ul style="list-style-type: none"> • Les récoltes de blé et de maïs diminuent en dessous des niveaux de référence, le riz ne change pas • Adaptation du maïs et du blé, les rendements du riz se maintiennent au niveau actuel
	Pâturages et bétail	Semi-aride	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune augmentation de la Production primaire nette (PPN), augmentation saisonnière de la fréquence du stress dû à la chaleur pour le bétail
	Prix	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Prix agricoles -10 à -30 %
+2 à +3°C	Cultures alimentaires	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • 550 ppm CO₂ (égal à environ +2 °C) augmente en C3 le rendement des récoltes de 17 %, cette augmentation est contrebalancée par une augmentation de température de 2 °C sans adaptation et de 3 °C avec adaptation
	Prix	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Prix agricoles : -10 à +10 %
	Cultures alimentaires	Latitudes moyennes à élevées	<ul style="list-style-type: none"> • L'adaptation augmente toutes les cultures au-dessus du rendement de

		élevées	référence
	Pêche	Tempérée	<ul style="list-style-type: none"> • Effet positif sur les truites l'hiver, négatif en été
	Pâturages et bétail	Tempérée	<ul style="list-style-type: none"> • Perte de production modérée concernant les porcs et le bétail confiné
	Fibre	Température	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du rendement de 9 %
	Pâturages et bétail	Semi-aride	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du poids des animaux et de la production des pâturages, augmentation du stress dû à la chaleur pour le bétail
	Cultures alimentaires	Basses latitudes	<ul style="list-style-type: none"> • L'adaptation maintient le rendement de toutes les cultures, le rendement des récoltes est en dessous des références pour toutes les cultures sans adaptation
+3 à +5°C	Prix et commerce	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Inversion de la tendance à la baisse pour les prix du bois • Prix agricoles : +10 à +40 % • L'importation des céréales pour les pays en développement augmente de 10 à 40 %
	Foresterie	Tempérée Tropicale	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des feux de forêt et des dommages causés par les insectes • Déforestation amazonienne massive possible
	Cultures alimentaires	Basses latitudes	<ul style="list-style-type: none"> • L'adaptation maintient le rendement de toutes les cultures, le rendement des récoltes est en dessous des références pour toutes les cultures sans adaptation
	Pâturages et bétail	Tropicale	<ul style="list-style-type: none"> • Forte perte de production concernant les porcs et le bétail confiné
	Cultures alimentaires	Basses latitudes	<ul style="list-style-type: none"> • Les rendements du maïs et du blé se réduisent en dessous des références malgré l'adaptation mais cette dernière maintient les rendements du riz aux

niveaux de référence

Pâturages et
bétail

Semi-aride

- Réduction du poids des animaux et de la croissance des pâturages, augmentation du stress dû à la chaleur pour les animaux et mortalité
-

Tableau 7-6 : Sommaire des constatations sélectionnées pour le secteur de l'agriculture, par incrément de temps (Easterling et coll., 2007)

Tranche de temps	Sous-secteur	Emplacement	Constatation
2020	Cultures alimentaires	États-Unis	<ul style="list-style-type: none"> • Événements extrêmes, par ex. augmentation des fortes précipitations qui causent la perte des récoltes ; jusqu'à 3 milliards de \$ US en 2030 par rapport aux niveaux actuels
	Petites exploitations agricoles et de pêche	Basses latitudes, spécialement dans l'Est et le Sud de l'Afrique	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des rendements du maïs, augmentation des risques de mauvaises récoltes, mortalité élevée du bétail
	Petites exploitations agricoles et de pêche	Basses latitudes, particulièrement en Asie du Sud	<ul style="list-style-type: none"> • Fonte précoce de la neige, causant des inondations et une pénurie d'eau pour l'irrigation d'été
	Foresterie	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de l'exportation de bois des pays tempérés aux pays tropicaux • Augmentation des parts de production de bois en provenance des plantations • Production de bois +5 à +15 %
2050	Pêche	Global	<ul style="list-style-type: none"> • Production marine principale +0,7 à +8,1 % avec d'importantes variations régionales
	Cultures alimentaires	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Avec adaptation, rendements du blé, riz et maïs au-dessus des niveaux de référence dans les régions de moyennes et hautes latitudes et aux niveaux de référence dans les régions de basses latitudes
	Foresterie	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Production de bois +20 à +40 %
2080	Cultures alimentaires	Mondiale	<ul style="list-style-type: none"> • Le besoin en eau pour l'irrigation des cultures augmente de 5 à 20 %, avec une amplitude due aux variations régionales significatives

Foresterie	Mondiale	<ul style="list-style-type: none">• Production de bois +20 à +60 % avec d'importantes variations régionales
Secteur agricole	Mondiale	<ul style="list-style-type: none">• Une stabilisation à 550 ppm de CO₂ améliore 70 à 100 % des coûts de l'agriculture causés par des changements climatiques toujours aussi intenses

7.4 EXIGENCES RELATIVES AUX METHODES, OUTILS ET DONNEES

7.4.1 CONSIDERATIONS GENERALES

Les méthodes pour évaluer les impacts climatiques sur l'agriculture et les évaluations des stratégies d'adaptation ont été affinées pendant de nombreuses années et largement utilisées par les scientifiques, les services de vulgarisation, les agriculteurs commerciaux et les gestionnaires de ressources. Un défi majeur auquel toutes les évaluations agricoles doivent faire face est l'analyse des impacts biophysiques et socioéconomiques importants, parce qu'ils doivent être dérivés d'interactions complexes parmi les systèmes biophysiques et socioéconomiques qui sont fondamentalement difficiles à modéliser.

Les outils présentés dans le présent chapitre sont adaptés pour être utilisés avec des conditions climatiques moyennes changeantes. Pour évaluer les changements selon la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, tels que les sécheresses ou les inondations, il est important d'inclure une combinaison des réponses en rendement empirique basées sur les données statistiques et les approches de modélisation.

Un certain nombre d'approches concernant l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'agriculture ont été développées à partir des nombreuses études menées jusqu'à présent. Les approches utilisées pour évaluer les impacts biophysiques comprennent :

- des modèles basés sur des indices ;
- des modèles statistiques et des fonctions de rendement ;
- des modèles basés sur des processus.

De plus, différents outils peuvent être utilisés pour examiner les impacts socioéconomiques des changements climatiques. Un outil de prévision économique



relativement simple, tel que celui développé par le « United States Country Studies Program » (Benioff et Warren, 1996), est souvent utile. Des approches plus complexes, telles que des modèles de régression économique, des modèles microéconomiques et macroéconomiques, agricoles, domestiques et de villages peuvent être aussi utilisés.

Chacun de ces modèles possède des informations sur différents types d'impacts. Par exemple, des indices simples agroclimatiques peuvent être utilisés pour analyser les changements dans des grandes zones de cultures, alors que les modèles de croissance des cultures basées sur les processus devraient être utilisés pour analyser les changements de rendement de cultures spécifiques. Les effets sur les revenus, les moyens de subsistance et l'emploi sont évalués en utilisant des formes d'analyse économiques et sociales.

De plus, des études peuvent être entreprises en utilisant des approches régionales ou spécifiques à un site. Dans une *approche régionale*, plusieurs outils simples existants peuvent être appliqués et testés selon un ensemble de conditions dans une région donnée et les résultats visualisés sur des cartes. Cette approche régionale simple est essentielle pour intégrer les changements climatiques, la production des cultures, les indices de demande en eau et les indices socioéconomiques à une échelle régionale, fournissant ainsi un outil d'évaluation de premier ordre afin d'analyser des stratégies d'adaptation possibles.

Le *Compendium des méthodes et des outils pour évaluer les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation aux changements¹ climatiques* de la CCNUCC fournit un aperçu de l'ensemble des outils qui peuvent servir dans le secteur agricole. Les outils répertoriés dans le *Compendium* vont des analyses économiques sectorielles aux modèles de culture au niveau des exploitations. Les modèles de processus de culture abordent l'impact de différents scénarios de gestion et de changements climatiques sur des cultures uniques (p. ex. WOFOST, DSSAT, ALFALFA, ORYZA), des cultures multiples (p. ex. APSIM) et des écosystèmes entiers (p. ex. CENTURY).

D'autres outils peuvent être utilisés pour analyser des facteurs ou processus écologiques particuliers (p. ex. ACRU) ou supporter des décisions d'adaptation stratégique à plus grande échelle (p. ex. MAACV, RRI, CLOUD, CRAM). Les modèles économiques assistent aussi l'utilisateur dans l'évaluation des impacts économiques concernant les changements de la valeur, de l'offre et de la demande des terres ainsi que de la production des biens résultants des changements climatiques. Encadré 7-1 décrit un ensemble d'outils agricoles utilisés à l'intérieur du secteur.

1

<http://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/2674.php>



Encadré 7-1 : Outils répertoriés à l'intérieur du Compendium des méthodes et des outils de la CCNUCC (2008)

- APSIM (Simulateur des systèmes de production agricole)
- WOFOST
- ACRU (Unité de recherche du secteur agricole)
- Modèles de processus concernant les sols et les récoltes : CENTURY
- ORYZA 2000
- Information et système de support de décision pour les études sur les changements climatiques dans le Sud-Est de l'Amérique du Sud (Changements climatiques IDSS-SESA)
- Systèmes de support de décision liant les Indices agroclimatiques aux scénarios des changements climatiques issus du MCM
- Modèle d'adaptation agricole pour les variations climatiques (MAACV)
- Indice des risques relatifs (RRI)
- Support gouvernemental en agriculture pour les pertes dues aux variabilités climatiques
- AgroMetShell
- Cartographie agroclimatique du stress hydrique
- Estimateur climatique local (New_LocClim)
- FAOclim 2.0
- CLIMWAT 2.0
- CM Box
- CLOUD (Perspectives du climat et simulation basée sur des agents d'adaptation en Afrique)
- CRAM (Modèle agricole régional canadien)
- Modèle d'irrigation : CROPWAT
- Modèle d'irrigation : AquaCrop
- Modèles de processus appliqués aux cultures : Système d'appui à la prise de décisions pour les transferts agrotechnologiques (DSSAT) développé par le Consortium International pour l'application des systèmes agricoles (ICASA)
- Modèles de processus appliqués aux cultures : Application de simulation concernant les relations sol-plante-atmosphère (GAPS 3.1)
- Modèles de processus appliqués aux cultures : Calculateur des impacts de l'érosion sur la productivité (EPIC)



- Modèles de processus appliqués aux cultures : Alfalfa 1.4
- Modèles de processus appliqués aux cultures : AFRC-Wheat
- Modèles de processus appliqués aux cultures : RICEMOD
- Modèles de processus appliqués aux cultures : GOSSYM/COMAX
- Modèles de processus appliqués aux cultures : GLYCIM
- Modèles économiques : Modèles économétriques (basés sur les modèles ricardiens)
- Modèles économiques : Modélisation entrées-sorties (avec IMPLAN)
- Modèles économiques : Modèles d'équilibre général (GTAP)
- Modèles économiques : Méthodes statistiques de réponse au rendement (modèle ClimateCrop)

Tableau 7-7 : Sommaire des caractéristiques des principaux modèles agricoles

Type de modèle	Description et utilisation	Forces	Faiblesses
Indices agroclimatiques et systèmes d'information géographique (GIS)	Basés sur des combinaisons des facteurs climatiques importants pour les cultures. Utilisés dans de nombreuses études de planification agricole. Utiles pour le grand public.	Calculs simples. Efficaces pour effectuer des comparaisons entre les régions ou les cultures.	Basés seulement sur le climat, manque les réponses en matière de gestion ou de considérations concernant la fertilisation par le carbone.
Modèles statistiques et fonctions de rendement	Basés sur les relations empiriques entre le climat observé et les réponses des cultures. Utilisés pour la prédiction des rendements pour les marchés des produits de base et en vue d'émettre des alertes précoces contre la famine.	Offrent une bonne description des cultures actuelles et des variations climatiques.	N'expliquent pas les mécanismes de causalité. Ne rendent possiblement pas compte des relations futures entre le climat et les cultures ou de la fertilisation par le CO ₂ .
Modèles de culture basés sur des processus	Utilisés pour calculer la réponse des cultures par rapport aux facteurs qui affectent la croissance et le rendement (p. ex. climat, sols et gestion). Utilisés par de nombreux techniciens agricoles pour la recherche et le développement.	Basés sur les processus, largement étalonné et validé. Utiles pour tester un large éventail d'adaptations. Testent simultanément les stratégies d'atténuation et d'adaptation. Disponibles pour la plupart des cultures principales.	Nécessitent des données détaillées sur le climat et la gestion pour de meilleurs résultats.

Outils économiques	Utilisés pour calculer la valeur des terres, le prix des produits de base et les résultats économiques pour les agriculteurs et les consommateurs, basés sur les données de production des cultures.	Utile pour incorporer les considérations financières et les adaptations basées sur le prix du marché.	Ne représentent pas tous les systèmes sociaux, domestiques et individuels de façon appropriée. Ne prennent pas toujours en considération les changements induits par le climat dans la disponibilité des terres et de l'eau. Axés sur les profits et un comportement maximisant l'utilité. Les modèles sont complexes et nécessitent de nombreuses données.
Modèles domestique et de villages	Description des stratégies de prise en charge des conditions actuelles pour les ménages et les villages en tant qu'unités de réponse.	Utile dans les économies semi-commerciales.	Ne peuvent pas être généralisés ; ne tiennent pas compte des futurs stress causés par le futur, s'ils diffèrent de ceux actuels.

Une *approche spécifique au site* comprend des études locales qui analysent la sensibilité du rendement des cultures, la gestion des exploitations agricoles, l'utilisation de l'eau par rapport au climat à l'échelle locale et les implications pour les décisions politiques qui affectent la gestion de l'eau. Les modèles de culture sont généralement axés sur l'optimisation du temps de production et l'efficacité de l'utilisation des nutriments (principalement l'azote) ainsi que de l'eau d'irrigation.

Les secteurs économiques varient grandement entre les pays et les environnements physiques, l'utilisation de différentes méthodes d'évaluation d'impact serait appropriée. Il est probable qu'une *combinaison d'approches* mènera à l'ensemble de résultats le plus solide pour une zone donnée.

7.4.2 LIMITES ET SOURCES D'INCERTITUDE

Scénarios de changements climatiques. Les scénarios de changements climatiques sont dérivés des modèles de circulation générale (MCG) motivés par les changements de la composition atmosphérique, en particulier les gaz à effet de serre (GES), dérivés de différentes synopsis concernant les scénarios socioéconomiques (voir chapitre 4). Le défi principal est de savoir interpréter les résultats issus des scénarios climatiques. Dans



toutes les régions, les incertitudes relatives à l'ampleur des changements prévus suscitent des doutes dans les évaluations agricoles. Par exemple, dans certaines régions, les prévisions de précipitations – une variable clé de l'agriculture –, peuvent être positives ou négatives selon le scénario climatique utilisé. L'incertitude résultant du modèle climatique est liée aux limitations des modèles actuels pour ce qui est de représenter tous les processus atmosphériques et interactions du système climatique. Les limitations associées aux voies de développement socioéconomiques projetées représentent une source supplémentaire d'incertitude.

Variabilité du climat. Les climats régionaux fluctuent naturellement à long terme. Par exemple, la variabilité des précipitations est mesurée par rapport au temps et à la quantité, ce qui a une influence sur l'agriculture à chaque année. De nombreuses variabilités historiques qui ont eu lieu dans le passé continueront de se produire, les changements climatiques modifiant ces modèles de variabilité qui ont, par exemple, comme résultats des changements concernant le nombre et l'intensité des sécheresses et des inondations qui doivent être évaluées soigneusement dans toute évaluation d'impact – particulièrement en ce qui concerne les changements dans les modèles de précipitations futurs.

Modèles agricoles. Les modèles agricoles contiennent de nombreuses relations empiriques simples qui ne représentent pas complètement les processus réels concernant les plantes. Lorsque les modèles sont testés de façon adéquate par rapport à des données observées (processus de calibration et de validation), les résultats représentent les rendements agricoles sous les conditions climatiques actuelles. Cependant, les simplifications des modèles de culture sont une source d'incertitude concernant les résultats. Par exemple, les modèles agricoles en général considèrent que les mauvaises herbes, les maladies et les insectes nuisibles sont contrôlés, qu'il n'y a aucun problème de condition des sols, comme la salinité ou l'acidité, et qu'il n'y a pas de catastrophes météorologiques, telles que de fortes tempêtes. Les modèles agricoles simulent l'éventail actuel des technologies agricoles disponibles partout dans le monde. Ils n'incluent pas les améliorations potentielles de ces technologies, mais ils peuvent être utilisés pour tester les effets de quelques améliorations potentielles telles que l'amélioration des variétés et des schémas d'irrigation. Un ensemble de modèles agricoles sont largement utilisés par les scientifiques, les services de vulgarisation technique, les agriculteurs commerciaux et les directeurs de ressources pour évaluer les solutions agricoles de rechange dans un lieu donné dans des conditions différentes (p. ex. années de sécheresse, changement de politique concernant l'application des produits chimiques en agriculture, changements de l'alimentation en eau, parmi d'autres conditions).

Effets du CO₂ sur les cultures. Le CO₂, composante essentielle de la photosynthèse des plantes, influence la production de biomasse. Il régule également l'ouverture des stomates des plantes et affecte par conséquent leur transpiration. Par conséquent, en théorie, les plantes qui poussent avec des conditions de CO₂ accrues produiront plus de biomasse et consommeront moins d'eau. Des expériences dans des serres le confirment. Cependant, à cause des interactions multiples des processus physiologiques, les changements réels sont inférieurs à ceux de la théorie. Sur le terrain, les



changements sont encore plus minimes. La plupart des modèles de culture utilisés pour les évaluations des changements climatiques comprennent une option pour simuler les effets de l'augmentation du CO₂ sur le rendement des cultures et sur l'utilisation de l'eau (voir Rosenzweig et Iglesias, 1998). Il est difficile de valider les résultats des modèles de culture parce qu'il existe seulement un nombre très limité d'expériences dans le monde, ce qui augmente l'incertitude concernant les résultats simulés.

Problèmes d'échelle. L'accroissement d'échelle en ce qui concerne les résultats de vulnérabilité et d'adaptation à un niveau régional est, comme dans tout exercice de réduction ou d'accroissement, une tâche difficile. Dans l'idéal, il est possible d'utiliser les informations des exploitations agricoles représentatives de l'agriculture dans une région et leur degré de représentativité devrait être établi. Plus fréquemment, les évaluations régionales dépendent des résultats fournis par les économistes et les planificateurs régionaux en ce qui concerne les effets à l'échelle régionale, résultats basés sur les données locales qui leur ont été fournies et qui ont été discutées par de nombreuses parties prenantes.

Projections socioéconomiques. Les limitations de la projection des changements socioéconomiques affectent non seulement les scénarios socioéconomiques, mais également les capacités potentielles d'adaptation du système. Par exemple, l'incertitude concernant les changements de la population (densité, distribution, migration), le PIB et la technologie détermine et limite les stratégies d'adaptation possibles qui peuvent être employées (voir le chapitre 3 pour plus d'informations sur le développement des scénarios socioéconomiques).

7.4.3 COMBINER LES SCENARIOS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AVEC LES MODELES ET LES OUTILS AGRICOLES

Étant donné les incertitudes des scénarios (ampleur du changement et quelquefois direction du changement), une bonne approche est d'utiliser plusieurs scénarios possibles comme entrées pour les modèles agricoles. De même qu'il est conseillé d'utiliser plusieurs scénarios, il est aussi conseillé d'utiliser des ensembles de modèles (Rotter et coll., 2011). De plus, utiliser les scénarios de sensibilité combinés aux modèles agricoles (par exemple, les changements de température jusqu'à +3 °C et les changements concernant les précipitations, de -30 % à +30 %), fournit une idée des seuils de changement tolérables pour un système particulier.

Une méthode jugée efficace pour générer des scénarios de changements climatiques est d'utiliser les changements des dernières décennies et de les projeter dans le proche avenir. Par exemple, diviser la base de données climatiques d'une région (ou d'un site) sur le long terme en deux périodes : par exemple 1930–1960 et 1970–2000. Puis, étudier les propriétés statistiques de chacun des ensembles (significations, mais aussi fréquence, des périodes sèches ou de tempêtes, probabilité de précipitation sur les jours suivants, etc.). Ceci peut être fait avec des « générateurs météorologiques ». La

dernière étape est de continuer (projeter) la tendance observée dans tous ces paramètres statistiques et de créer un scénario synthétique pour le proche avenir (p. ex. 10 à 20 ans).

En plus de réaliser des analyses statistiques des tendances climatiques, les résultats des modèles de climat régionaux tels que PRECIS (voir le chapitre 4) peuvent être utilisés comme données d'entrée dans le Système d'appui à la prise de décisions pour les transferts agrotechnologiques (DSSAT) (voir **Error! Reference source not found.**). Les séries chronologiques de températures maximales et minimales, les précipitations et les radiations solaires tirées du modèle PRECIS peuvent être utilisées comme fichier de données du temps du DSSAT et les changements souhaités de rendement des récoltes peuvent être modélés pour une période future. Cette approche a été récemment utilisée dans la seconde communication nationale du Bhoutan².

² <www.nec.gov.bt/climate/snc/>



Encadré 7-2 : Système d'appui à la prise de décisions pour les transferts agrotechnologiques (DSSAT)

Le Système d'appui à la prise de décisions pour les transferts agrotechnologiques (DSSAT) est un système qui comprend des modèles informatiques basés sur les processus qui prévoit la croissance, le développement et le rendement comme fonction des conditions météorologiques et du sol, les scénarios de gestion des cultures et les informations génétiques à l'échelle locale.

Les cultures prises en compte comprennent les céréales à grain entier telles que le riz, le blé, le maïs, l'orge, le sorgho et le millet, les légumineuses telles que le soja, les cacahuètes, les haricots secs, les pois chiches, les tubercules tels que les pommes de terre et le manioc, le coton, la canne à sucre, les légumes et diverses autres espèces (voir le **Tableau 7-3**). Le DSSAT comprend aussi un ensemble basique d'outils pour préparer les données d'entrée ainsi que des programmes d'application pour les analyses saisonnières, spatiales et de rotation des cultures. Les modèles de culture ne prédisent pas seulement les rendements mais aussi la dynamique des ressources telle que pour l'eau, l'azote et le carbone ainsi que l'impact environnemental tel que la perte d'azote par lessivage des terres. Le DSSAT comprend une composante économique qui calcule le rendement des récoltes basé sur la marge brute et les produits dérivés, le prix des produits récoltés et les coûts de production.

Les modèles utilisent des données météorologiques journalières, des informations sur le profil des sols et des données de base sur la gestion des cultures en données d'entrée. Les résultats des modèles sont normalement comparés aux données expérimentales locales afin d'évaluer la performance du modèle et de déterminer les caractéristiques génétiques des variétés locales.

Le DSSAT peut être utilisé au niveau des exploitations agricoles afin de déterminer l'impact des changements climatiques sur la production et les pratiques d'adaptation éventuelles qui devraient être développées pour les agriculteurs. Il peut aussi être utilisé à un niveau régional pour déterminer l'impact des changements climatiques à différentes échelles spatiales, la principale considération étant la disponibilité si les données de saisie sont exactes. Le DSSAT peut être utilisé pour n'importe quelle région du monde, tant que les données d'entrée locales sont disponibles. Le DSSAT a été distribué à plus de 2 000 utilisateurs dans plus de 90 pays et a été testé dans la plupart des régions du monde.

Au moment de la rédaction de ce document, le DSSAT était dans une période de transition parce que le Applications - Consortium International pour l'application des systèmes agricoles (ICASA) était terminé depuis juillet 2011. Les développeurs se dirigent vers une fondation DSSAT pour le développement d'autres modèles. Une version beta du DSSAT 4.5 a été utilisée à l'atelier de formation du GCE à Nairobi en novembre 2011.

<<http://www.icasa.net/dssat/>>

Développeur : Dr Gerrit Hoogenboom, Directeur de AgWeatherNet, Washington State University, 24106 North Bunn Road, Prosser, Washington



7.4.4 INDICES AGROCLIMATIQUES ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (GIS)

Des indices agroclimatiques simples combinés ont été utilisés avec le GIS pour fournir une évaluation initiale des impacts mondiaux des changements climatiques et des changements des zones agricoles concernées dans des régions particulières. Les indices agroclimatiques sont basés sur les relations simples de la pertinence des cultures ou potentielles par rapport au climat, p. ex. identifier les seuils de température d'une culture donnée ou utiliser les températures accumulées concernant la saison de croissance pour prévoir le rendement des cultures (voir, par exemple, Holden, 2001). Ce type de coefficient empirique est spécialement utile pour la cartographie à grande échelle des zones d'impact potentiel.

Lorsqu'il est combiné à une base de données spatialement complètes sur le climat, les cultures et le GIS, les indices agroclimatiques simples sont une façon économique et rapide de cartographier le potentiel modifié des cultures pour de vastes superficies. L'application d'indices agroclimatiques en Afrique (Badini et coll., 1997) a fourni une compréhension des relations entre le climat, les sols et les systèmes de production agricoles ainsi que des complexités associées à leur variabilité. Carter et Saarikko (1996) décrivent les méthodes de base pour une analyse spatiale agroclimatique.

7.4.5 MODELES STATISTIQUES ET FONCTIONS DE RENDEMENT

Des modèles multivariés complexes tentent de fournir une explication statistique des phénomènes observés en prenant en compte la plupart des facteurs importants (p. ex. la prévision des rendements des cultures en fonction de la température, des précipitations, de la date des semis et de l'utilisation d'engrais). Une faiblesse possible dans leur utilisation en examinant les impacts des futurs changements climatiques, c'est leur capacité limitée à prédire les effets des événements climatiques en dehors de l'ensemble des variabilités actuelles. Leur utilisation a aussi été critiquée parce qu'ils sont basés sur les relations statistiques entre les facteurs plutôt que sur une compréhension des mécanismes de causalité importants.

Des modèles de régressions multiples ont été développés pour représenter les réponses en rendement basé sur les processus à ces variables environnementales et de gestion. Les fonctions de rendement ont été utilisées pour évaluer la sensibilité et l'adaptation au climat, par exemple en Chine (Rosenzweig et coll., 1999) et mondialement (Parry et coll., 2004).

7.4.6 MODELES DE CULTURE BASES SUR DES PROCESSUS

Les modèles basés sur les processus utilisent des fonctions simplifiées pour exprimer les interactions entre la croissance des cultures et les facteurs environnementaux majeurs affectant les cultures (p. ex. le climat, les sols et la gestion) et nombre d'entre eux ont été utilisés dans les évaluations de l'impact du climat. La plupart ont été élaborés comme des outils de gestion agricole, en particulier pour renseigner sur les quantités optimales d'intrants (comme les engrais, les pesticides et l'irrigation) et leur coordination optimale. Des modèles de culture dynamiques sont à présent disponibles pour la plupart des cultures importantes. Dans chaque cas, le but est de prévoir la réponse d'une culture donnée aux facteurs spécifiques liés au climat, aux sols et à la gestion régissant la production.

Les modèles dynamiques de croissance des cultures ICASA/IBSNAT (Consortium International pour l'application des systèmes agricoles – Réseau international des sites de référence pour le transfert de l'agrotechnologie) sont structurés comme un système d'aide à la décision pour faciliter les simulations des réponses des cultures à la gestion (DSSAT). Les modèles ICASA/IBSNAT ont été largement utilisés pour évaluer les impacts climatiques en agriculture à différents niveaux, allant des sites individuels aux larges zones géographiques (voir Rosenzweig et Iglesias, 1994 et 1998, pour une description complète de la méthode). Le type de structure de ce modèle est particulièrement utile pour l'évaluation de l'adaptation de la gestion agricole aux changements climatiques. Le logiciel DSSAT comprend tous les modèles ICASA/IBSNAT avec une interface qui autorise les analyses entrées-sorties.

La série de modèles WOFOST est générique et comprend des paramètres de modèle pour certaines cultures (Supit et coll., 1994 ; Boogaard et coll., 1998). Il existe plusieurs versions des modèles, qui sont en constante évolution à l'Université de Wageningen.

Le modèle de Calculateur de l'impact de l'érosion sur la productivité (EPIC) (Sharpley et Williams, 1990) intègre des fonctions simplifiées de croissance des cultures qui répondent au climat, à l'environnement et à la gestion ; il a été utilisé dans quelques évaluations concernant les impacts climatiques.

Le **Tableau 7-3** résume les modèles des principales cultures qui ont été utilisés pour évaluer les impacts et l'adaptation aux changements climatiques. Rosenzweig et Iglesias (1998) fournissent des directives plus complètes pour l'utilisation des modèles de culture pour des études d'adaptation.

Tableau 7-3 : Modèles de culture

Culture	Modèle
Spécifique aux cultures	Modèles spécifiques pour les cultures ICASA/IBSANT inclus dans le logiciel DSSAT (y compris tous les modèles CERES et GRO répertoriés sous chaque culture)
Générique	WOFOST fournit une famille de modèles génériques avec des paramètres spécifiques pour le maïs, le blé, le sucre de betterave et d'autres
Modèle général	EPIC
Nécessité d'irrigation pour toutes les cultures	CROPWAT
Luzerne	ALSIM, ALFALFA
Orge	CERES-Barley
Coton	GOSSYM, COTCROP, COTTAM
Haricots secs	BEANGRO
Maïs	CERES-Maize, CORNF, SIMAIZ, CORNMOD, VT-Maize, GAPS, CUPID
Cacahuètes	PNUTGRO
Millet perlé	CERES-Millet, RESCAP
Pommes de terre	SUBSTOR
Riz	CERES-Rice, RICEMOD
Sorgho	CERES-Sorghum, SORGF, SORKAM, RESCAP
Soja	SOYGRO, GLYCIM, REALSOY, SOYMOD
Canne à sucre	CANEMOD
Blé	CERES-Wheat, TAMW, SIMTAG, AFRC-WHEAT, NWHEAT, SIRIUS, SOILN-Wheat

L'**Error! Reference source not found.** ci-dessus fournit plus d'informations concernant le DSSAT comme exemple de famille de modèles spécifiques aux cultures et Encadré 7-3 aussi sur CROPWAT comme exemple de modèle générique.

Iglesias et coll. (2011(b)) ont utilisé des modèles de culture basés sur les processus pour fournir les moyens d'obtenir des informations concernant la réponse des cultures au climat et à la gestion de neuf sites en Europe, pour représenter les principales régions agroclimatiques et simuler les projections pour les scénarios de changements climatiques. Pour chaque site, les réponses des cultures basées sur les processus au climat et à la gestion sont simulées en utilisant les modèles de culture DSSAT pour le blé, le maïs et le soja. Les réponses du blé au climat selon le modèle sont représentatives des réponses possibles des céréales d'hiver dans toutes les régions et des céréales d'hiver et de printemps dans les régions méditerranéennes. La réponse du maïs représente la plupart des cultures irriguées d'été, alors que la réponse du soja au climat représente de nombreuses légumineuses dans différentes régions. Les cultures choisies sont représentatives d'environ le deux tiers des terres arables dans la plupart des régions et ont été utilisées en de nombreuses occasions pour représenter la production alimentaire mondiale. Le DSSAT simule le développement et la croissance phénologique quotidiens en réponse aux facteurs environnementaux (sol et climat), ainsi que la gestion (variété de cultures, conditions d'ensemencement, fertilisation à l'azote et irrigation). Les modèles de DSSAT peuvent simuler les compréhensions actuelles des effets du CO₂ sur les cultures (Long et coll., 2006). Les données quotidiennes concernant le climat de 1961 à 1990 ont été obtenues de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) ; les caractéristiques du sol et les données de gestion ont été obtenues des stations de recherche agricole. Les données concernant la production et la distribution des cultures ont été obtenues d'EUROSTAT. Des exemples de changements simulés concernant les variables de gestion sont montrés dans la Figure 7-1 et les impacts des changements climatiques établis pour l'Europe sont montrés dans la Figure 7-2.

Figure 7-1 : Réponse simulée des cultures selon la date d'ensemencement (a) et les apports d'azote et d'eau (b) dans un site sec, dans le Sud de l'Europe (Almeria, Espagne) (Iglesias et coll., 2011(b))

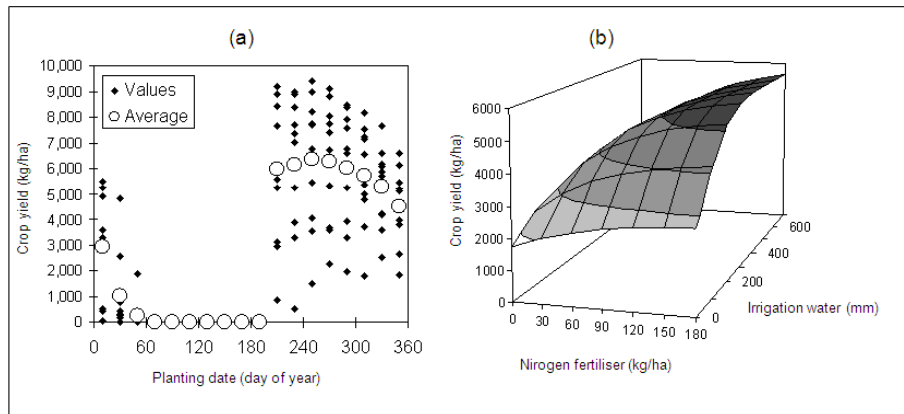
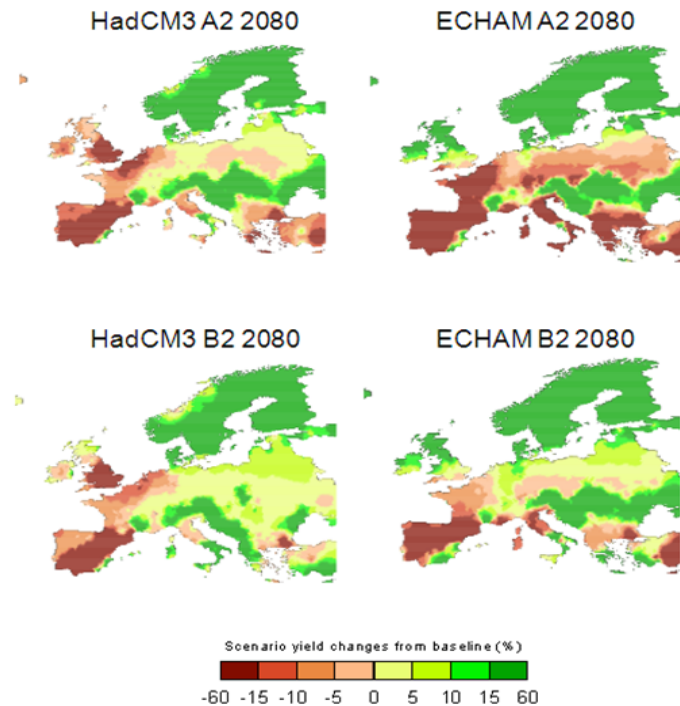


Figure 7-2 : Changements de rendement des cultures sous les scénarios HadCM3/HIRHAM A2 et B2 pour la période 2071–2100 (Iglesias et coll., 2011(b))



Encadré 7-3 : Description de CROPWAT

CROPWAT est un outil d'aide à la décision sous Windows développé par la Division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO. CROPWAT est utilisé pour effectuer des calculs standards pour des études sur l'évapotranspiration et l'utilisation de l'eau pour les cultures, particulièrement la conception et la gestion des schémas d'irrigation. Il permet le développement de recommandations pour l'amélioration des pratiques d'irrigation, la planification des plans d'irrigation en fonction de conditions variables d'alimentation en eau et l'évaluation de la production sous régime pluvial ou en déficit d'irrigation.

L'outil peut être appliqué pour tester l'efficacité et différentes stratégies d'irrigation (p. ex. l'irrigation programmée, l'efficacité de l'irrigation améliorée) dans des conditions des changements climatiques. La simulation des effets directs du changement des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère sur l'utilisation de l'eau pour les cultures est en dehors de la portée de l'outil. Il a besoin de données sur les cultures et climatiques (disponibles à partir de la base de données CLIMWAT, comprise avec l'outil) pour effectuer des calculs sur l'eau et l'irrigation nécessaires aux cultures. Le développement des plans d'irrigation et l'évaluation des pratiques d'irrigation et de pluie sont basés sur un équilibre quotidien sol-eau en utilisant différentes options d'alimentation en eau et de conditions de gestion d'irrigation.



CROPWAT pour Windows et son manuel sont disponibles sur le site de la FAO :

<http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html>.

7.4.7 CALIBRAGE ET VALIDATION DES MODÈLES DE CULTURE

Dans l'application des modèles de culture, il existe des outils pour évaluer la vulnérabilité et l'adaptation aux changements climatiques ; la participation des parties prenantes est essentielle. Une première étape obligatoire est que les parties prenantes recueillent des données agricoles sur le terrain pour le calibrage et la validation des modèles de culture. Puis, les parties prenantes régionales évaluent la représentativité des résultats du modèle agricole pour faciliter la mise à l'échelle spatiale des résultats.

Dans tous les modèles numériques, y compris les modèles agricoles, la procédure comprend l'ajustement des coefficients qui décrivent les caractéristiques des cultures et

les réponses aux conditions environnementales. Le **Tableau 7-4** résume les étapes comprises dans le calibrage et la validation des modèles agricoles, avec des références spécifiques pertinentes aux modèles DSSAT, à titre d'exemple. Dans les modèles du DSSAT, les coefficients à ajuster sont compris dans un fichier de « coefficients génétiques » qui représentent de façon conceptuelle chaque variété de culture. Un fichier de coefficients génétiques pour chaque culture, pour les variétés les plus couramment utilisées, dont l'ajustement est basé sur de nombreuses expériences précédentes référencées et menées sur le terrain, est inclus dans le logiciel. Ces coefficients sont seulement un point de départ et devront être ensuite ajustés dans le processus de calibrage pour représenter la croissance de la culture et le développement de la variété sélectionnée selon les conditions climatiques et de gestion de la zone particulière. Les rares coefficients génétiques qui décrivent chaque variété tentent de représenter seulement la phénologie ou les phases de développement (p. ex. stade juvénile, floraison, maturité physiologique) et l'accumulation de matière sèche dans les différents organes (p. ex. racines, parties végétatives et grains) Ces coefficients ne représentent pas le très grand nombre de caractéristiques de chaque variété de culture, telles que la réponse aux organismes nuisibles et aux maladies.

Tableau 7-4 : Sommaire des étapes du calibrage et de validation des modèles de culture

Étape	Concept/procédure	Exemple
1. Calibrer la phénologie des cultures	<p>L'étape de développement des cultures détermine comment s'accumule la biomasse et vers quel organe de la plante la croissance est dirigée.</p> <p>Ajuste les dates de simulation sur la floraison et la maturité physiologique aux données sur le terrain.</p>	<p>Dans le modèle CERES-Maize, ceci est décrit par le coefficient P1 (temps thermal à partir de l'émergence de plantules jusqu'à la fin de la phase juvénile) ; P2 (mesure par laquelle le développement est retardé pour chaque heure de croissance pendant la photopériode ; et P5 (temps thermal à partir de l'apparition des soies du maïs jusqu'à la maturité physiologique).</p> <p>En ajustant ces coefficients, le développement de la culture peut être ajusté au développement sur le terrain</p>
2. Calibrer la production céréalière	<p>Le taux adéquat et la quantité d'accumulation de biomasse déterminent la productivité finale de la céréale.</p> <p>Ajuster le rendement simulé des céréales aux données sur le terrain</p>	<p>Dans le modèle CERES-Maize, ceci est décrit par le coefficient G2 (nombre maximal possible de grains par plante) et G3 (taux de remplissage des grains pendant l'étape linéaire de remplissage des grains et dans des conditions optimales)</p>

3. Valider le modèle calibré	<p>S'assurer que l'ajustement des résultats du modèle des cultures avec un ensemble de données expérimentales sur le terrain représente une zone agricole plus large.</p> <p>Tester si la floraison simulée des céréales, les dates de maturité et le rendement des céréales représentent les résultats des agriculteurs</p>	<p>Les modèles bien calibrés devraient toujours simuler correctement les dates de maturité des cultures. Il se peut que les rendements simulés soient plus élevés que ceux observés chez les agriculteurs, mais ils doivent représenter la variation géographique des rendements agricoles provenant de différents sol et différentes conditions de gestion.</p>
-------------------------------------	--	--

7.4.8 LIER LES MODELES DE CULTURE ET LES MODELES STATISTIQUES DE LA REPOSE DE RENDEMENT

Les modèles de culture basés sur les processus fournissent les moyens d'obtenir des informations concernant la réponse des cultures au climat et à la gestion lorsque les données expérimentales ne sont pas disponibles (Lobell et Burke, 2010 ; Iglesias et coll., 2000 ; Porter et Semenov, 2005 ; Steduto et coll., 2009 ; Hansen et Jones, 2000). Cependant, les modèles de culture basés sur les processus sont gourmands en données, notamment les données quotidiennes concernant le climat, les caractéristiques du sol et la définition de la gestion des cultures. Généralement, les contraintes de données limitent l'utilisation des modèles aux sites où les informations nécessaires au calibrage sont disponibles. Les modèles ne conviennent pas non plus à l'évaluation des impacts des événements extrêmes (notamment les sécheresses, les inondations, les organismes nuisibles et les maladies).

Une autre méthodologie pour relier les outils agricoles et les scénarios des changements climatiques est de sélectionner des sites représentatifs pour simuler les réponses des cultures basées sur les processus par rapport au climat et à la gestion (par exemple en utilisant les modèles de culture du DSSAT). Le résultat peut être alors utilisé pour définir les modèles statistiques des réponses en rendement pour chaque site. Cette approche s'est avérée utile pour l'analyse en Chine (Rosenzweig et coll., 1999), en Espagne (Iglesias et coll., 2000 ; Iglesias et Quiroga, 2007 ; Quiroga et Iglesias, 2009) et mondialement (Lobel et Burke, 2010 ; Parry et coll., 2004 ; Rosenzweig et coll., 2004). Les variables qui expliquent une proportion significative de divergence en matière de rendement simulé sont : l'eau des cultures (somme des précipitations et des irrigations) et la température pendant la période de croissance. Les formes fonctionnelles pour chaque région représentent les conditions réalistes et potentielles concernant l'insuffisance en eau pour la gestion des différentes cultures et une adaptation endogène possible au climat dans chaque zone. Cette méthodologie étend les résultats du modèle de culture basé sur les processus concernant de larges zones et par conséquent remédie à la limitation des données ; elle inclut des conditions qui sont en dehors des observations historiques des données de rendement des cultures ; elle inclut des



simulations de gestion optimale et fournit une estimation des réponses agricoles aux changements climatiques régionaux. Une application actuelle de cette méthodologie est le modèle ClimateCrop (Iglesias et coll., 2011(b) qui a été développé pour une évaluation de l'impact mondial des changements climatiques. Figure 7-3 et Figure 7-4 montrent la productivité des cultures et les changements concernant les besoins en eau prévus pour ce modèle en utilisant la nouvelle génération de scénarios dans Moss et coll. (2010), A1B et E1. (voir chapitre 4)

Figure 7-3 : Changements agrégés concernant la productivité des terres dans le scénario A1B (modèles DMIEH5-4 et HADGEM-1) pour les années 2050

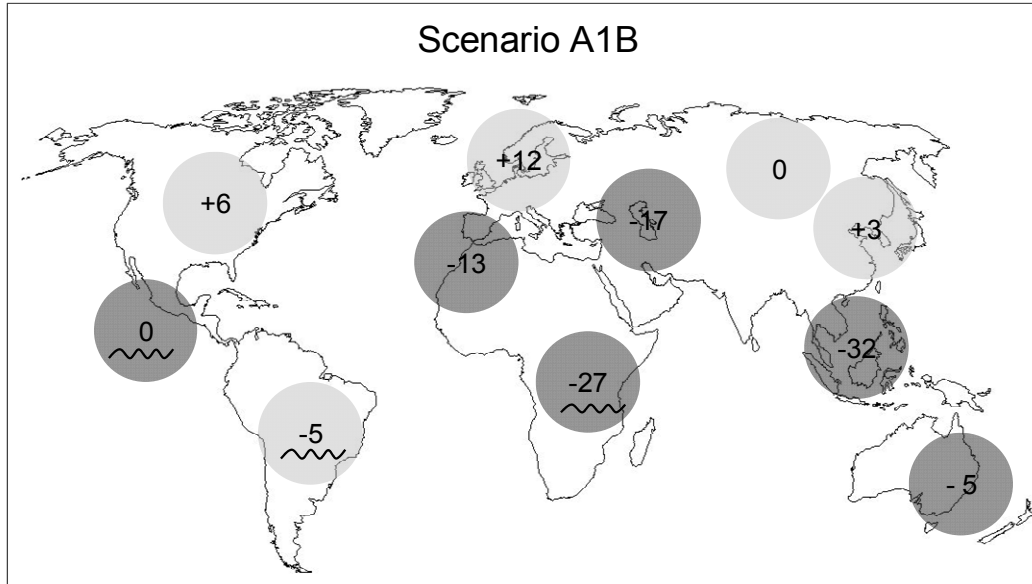
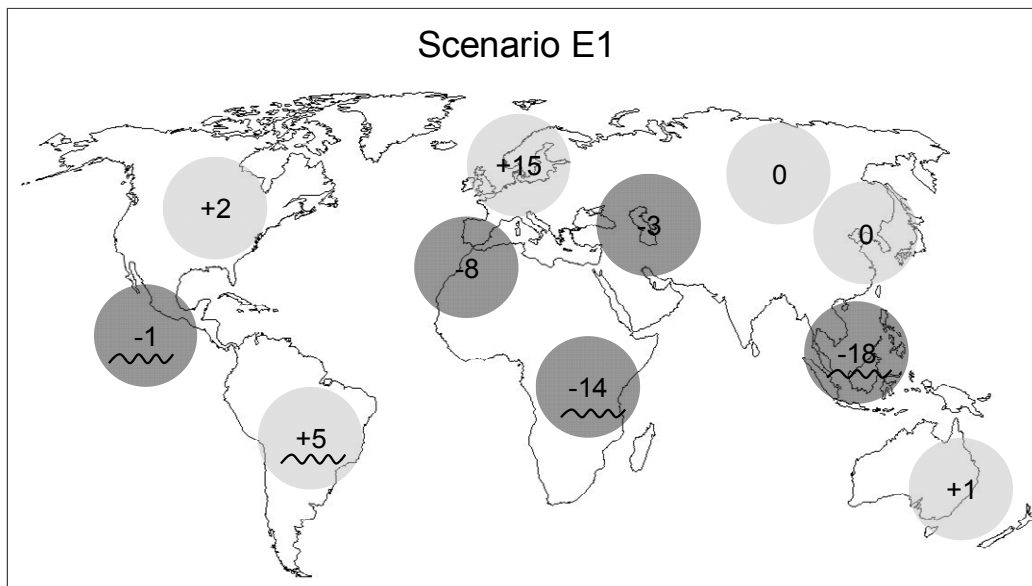


Figure 7-4 : Changements agrégés concernant la productivité des terres dans le scénario E1 (E1DMICM3-1 ; E1 : DMICM3-2 ; E1: HADGEM2-1) pour les années 2050



7.4.9 OUTILS ECONOMIQUES

Les modèles économiques sont conçus pour évaluer les impacts éventuels des changements climatiques sur la production, la consommation, le revenu, le PIB, l'emploi et la valeur agricole. Cependant, ces modèles peuvent être seulement des indicateurs partiels du bien-être social. Les systèmes sociaux, les ménages et les particuliers (par exemple, les petits agriculteurs) ne peuvent pas tous être représentés de la manière appropriée dans les modèles basés sur la théorie du producteur et du consommateur. Actuellement, les nombreux modèles économiques utilisés dans les analyses des impacts ne prennent pas en compte les altérations induites par le climat dans la disponibilité des terres et de l'eau pour l'irrigation, bien que ces considérations importantes puissent être incluses. Des études et modèles basés sur les économies de marché adoptent le profit et le comportement de la maximisation de l'utilité.

Plusieurs types d'approches économiques ont été utilisés pour évaluer l'impact sur l'agriculture. Les plus utiles sont de simples approches de prévisions économiques (p. ex. Benioff et Warren, 1996) qui sont des prévisions fondées sur un cadre structuré de l'information économique (production, consommation et politiques générales) et agricole (techniques de production et cultures alternatives) disponible. Ce sont généralement des techniques simples qui peuvent être utilisées dans la plupart des études sur l'impact du climat.

Les approches suivantes peuvent être également utilisées, même si elles sont relativement complexes et peuvent être difficiles, longues ou coûteuses à appliquer.

Modèles économiques transversaux. Une forme d'analyse économique est l'utilisation des analogies spatiales, c'est-à-dire des modèles de culture dans des zones agricoles où le climat est similaire à ce qui peut arriver sous les changements climatiques. Cette approche ricardienne a été utilisée pour un certain nombre d'applications, par ex. Mendelsohn et coll., 1994 et 1999. Les modèles économiques peuvent être basés sur des rapports statistiques entre les variables climatiques et les indicateurs économiques. Un avantage de cette approche est que l'adaptation des agriculteurs aux conditions climatiques locales est implicitement considérée. Les inconvénients sont que les prix alimentaires et le résultat de l'agriculture nationale sont considérés comme étant constants, et que les principaux facteurs qui déterminent la production agricole, tels que la disponibilité de l'eau et la fertilisation par le carbone, ne sont généralement pas pris en compte.

Modèles microéconomiques (niveau des exploitations agricoles). Les modèles microéconomiques sont basés sur l'objectif de maximisation des retombées économiques à partir des entrées. Ils sont conçus pour simuler le processus de prise de décision d'un agriculteur représentatif concernant les méthodes de production, la répartition des terres, le travail, l'infrastructure existante et un nouveau capital. Ces modèles agricoles ont été le plus souvent développés comme des outils pour la planification rurale et la vulgarisation agricole en simulant les effets des changements dans les entrées (p. ex. les engrais, l'irrigation, le crédit, les compétences de gestion)



concernant la stratégie agricole (p. ex. le mélange de cultures, l'emploi). Ils tendent à optimiser des modèles économiques à l'aide de la programmation linéaire et requièrent des données spécifiques et des compétences analytiques avancées. Beaucoup d'entre eux ont sélectionné une série de types d'exploitation agricole représentant celles existant dans une région et chaque type simule le mélange de cultures et les données qui maximiseraient les revenus agricoles sous certaines conditions. Ces conditions peuvent être changées (variation des conditions météorologiques, prix des cultures et des engrais) et la réponse appropriée de l'exploitation peut être modélisée. Les changements climatiques, et non les variations saisonnières, peuvent être entrés et la réponse au niveau des exploitations concernant le résultat ainsi que les revenus sont ensuite simulés.

Modèles domestiques et de villages. Dans les économies semi-commerciales, il peut être plus approprié de se concentrer sur un ménage ou un village comme unité de réponse. Ici, l'objectif peut être d'assurer un niveau minimum de revenu plutôt que de le maximiser. Dans ce cas, l'objectif de l'analyse devrait être mis sur les stratégies mises au point pour réduire les effets négatifs des changements de rendement des cultures plutôt que d'augmenter les effets positifs. Fréquemment désignées comme « stratégies de prise en charge », ces dernières ont été analysées en détail dans le contexte des risques de famine (souvent liés à la sécheresse). Comme pour les modèles agricoles, ces évaluations d'impact climatique qui ont inclus des analyses réussies de réponses au niveau des ménages et villages, ont eu tendance à emprunter des études existantes pour les adapter aux changements climatiques plutôt qu'aux variations saisonnières. Pour des exemples précis de leur utilisation dans l'évaluation de l'impact climatique au Kenya et en Inde, voir Akong'a et coll. cités dans Parry et Carter (1998) et Jodha cité dans Gadgil et coll. (1988). Pour une discussion plus générale, voir Downing (1991).

Modèles macroéconomiques. Les modèles macroéconomiques peuvent s'adapter à une économie agricole régionale, nationale ou mondiale. Pour des raisons de changements climatiques, les modèles impliquent la consommation nationale et extérieure, ainsi que la production régionale, selon les perturbations existantes de la production agricole, de l'alimentation en eau et de la demande d'irrigation qui sont dérivées de techniques biophysiques. L'augmentation de la population et les améliorations technologiques sont définies de manière exogène. Ces modèles mesurent l'ampleur éventuelle des impacts des changements climatiques sur la prospérité économique aussi bien des producteurs que des consommateurs de produits agricoles. Les changements prévus dans la production et les prix par les modèles du secteur agricole peuvent être utilisés dans des modèles d'équilibre général économique à plus grande échelle. Adams et coll. (1990) et Fischer et coll. (2002) donnent des exemples clés d'utilisation de modèles macroéconomiques.

Modèles d'équilibre généraux. Les modèles d'équilibre général (GCE/MEG) représentent le fonctionnement de l'ensemble de l'économie en suivant une approche basée sur le marché. Les prix jouent un rôle clé car ils sont le principal mécanisme par lequel l'économie s'ajuste à un choc externe, tel que les changements climatiques. L'offre et la demande dans tous les marchés sont égalisées avec les changements de prix pour atteindre ce qu'on appelle un équilibre général de l'économie. Dans le même



temps, les contraintes budgétaires des agents économiques (p. ex. le revenu des ménages) est équilibré. Les modèles MEG mondiaux considèrent que le commerce international existe entre les pays. L'approche de l'équilibre général a été utile pour comprendre les conséquences économiques des changements climatiques dans l'agriculture (Hertel, 1997 ; Stern, 2006 ; Quiroga et Iglesias, 2008 ; Iglesias et al, 2011 (a)).

Les changements de la productivité des cultures comme conséquence des changements climatiques ont un impact sur l'ensemble de l'économie à travers une série de mécanismes. Tout d'abord, la réduction de la productivité des terres dans le secteur agricole implique que moins de résultats sont produits avec les mêmes éléments (p. ex. la main-d'œuvre). Cela conduirait à une augmentation des prix des produits agricoles, provoquant la hausse des coûts dans le secteur et affecterait ensuite les intrants du marché. Cette répartition des ressources affectera alors le reste des secteurs de l'économie, par exemple à cause de salaires plus élevés. Par ailleurs, les changements dans les prix des produits agricoles auront une incidence sur les décisions des ménages en matière de consommation.

Encadré 7-4 : Description de CROPWAT

Le Projet d'analyse du commerce mondial (GTAP – Global Trade Analysis Project) est un réseau mondial de chercheurs et de décideurs politiques qui effectuent des analyses quantitatives sur les questions de politique internationale. Le système de modèle d'équilibre général mondial du GTAP (Hertel, 1997 ; Brockmeier, 2000) est coordonné par le Centre d'analyse du commerce mondial au département d'économie agricole de l'Université de Purdue. La dernière version du modèle a été calibrée pour les années 2004 et 2007 (base de données GTAP 8), avec une base de données mondiale qui représente l'économie mondiale pour 2004 et 2007. Le GTAP est un modèle multirégional d'économie ouverte incluant 128 régions et 57 secteurs.

L'avantage d'utiliser des modèles GTAP dans l'évaluation agricole est que les liens entre les variables socioéconomiques (croissance démographique, progrès technologiques) et les indicateurs de sécurité alimentaire (production agricole, approvisionnement alimentaire mondial) peuvent être étudiés (Hertel, 1997 ; Conrad, 2001 ; Quiroga et Iglesias, 2008). Le modèle comprend des variables, telles que l'exportation et l'importation des cultures et d'autres produits agricoles, le PIB agricole ou les prix des cultures. L'outil permet aux utilisateurs d'évaluer la réponse du système de marché par rapport aux chocs extérieurs, tels que les impacts des changements climatiques, y compris les effets indirects intersectoriels.



Le GTAP et son manuel sont disponibles sur :

<<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>>

7.4.10 INFORMATION SUR LES ENSEMBLES DES DONNEES

Les données disponibles ou non affectent le type d'évaluation de l'impact climatique qui est réalisé, particulièrement si le temps et les fonds sont limités. Les études sur les impacts des changements climatiques en matière d'agriculture exigent une description quantitative de l'unité d'exposition et des conditions agricoles actuelles (références) dans



la zone étudiée. Les données sont également nécessaires pour projeter les conditions futures (scénario de référence) en l'absence de changements climatiques (p. ex. augmentations prévues de l'utilisation de technologies agricoles ou d'engrais). Bien que les exigences de données spécifiques changent en fonction de la zone étudiée et de la méthode choisie (nous y reviendrons en détail plus tard), les groupes de données généralement nécessaires et les sources de données possibles sont décrits dans le ADAPTATION .

Tableau 7-5: Sommaire des ensembles de données nécessaires et des sources possibles

Ensemble de données	Sources possibles	Commentaires
Phénologie expérimentale et rendement des cultures	Au niveau local, l'agriculture expérimentale et les services de vulgarisation agricole de la plupart des universités agricoles ou des ministères de l'agriculture	Nécessaires pour calibrer les modèles agricoles, deux ans de données est acceptable, des données associées à la gestion des cultures sont nécessaires
Rendements des cultures à étudier	Au niveau local, services de vulgarisation agricole de la plupart des ministères de l'agriculture	Des séries chronologiques sont nécessaires pour évaluer la variabilité naturelle du rendement
Données sur le climat	Instituts météorologiques, organismes internationaux (p. ex. FAO, NOAA, Administration océanique et atmosphérique nationale)	Des séries chronologiques sont nécessaires pour évaluer la variabilité naturelle du climat et pour développer des scénarios
Caractéristiques du sol	Ministère de l'agriculture, organismes internationaux (p. ex. FAO)	Comprennent la texture et la profondeur du sol pour évaluer les capacités de rétention de l'eau du sol
Production (statistiques régionales et nationales)	Au niveau régional, les annuaires statistiques annuels du ministère de l'Agriculture, les organismes internationaux	Des séries chronologiques sont nécessaires pour évaluer la variabilité naturelle de la production
Gestion des cultures	Au niveau local et régional, les services de développement agricole des ministères de l'Agriculture, les organismes internationaux, les consultations des parties prenantes	Comprennent les dates d'ensemencement, les variétés de cultures, le travail, les engrais et les entrées d'irrigation

Utilisation de la terre	Des cartes ou des images numériques des ministères de l'Agriculture ou de l'Environnement, les données satellitaires des organismes internationaux	Des données géographiquement explicites sont nécessaires pour permettre une extrapolation spatiale de sites échantillons dans la zone étudiée
Données générales socioéconomiques	Ministères de l'Agriculture, organismes internationaux, consultations des parties prenantes (incluant les femmes)	Comprend la contribution de la production agricole de sites échantillons pour le résultat total de la zone étudiée, le pourcentage de la population active dans le secteur agricole
Autres	Consultations des parties prenantes (incluant les femmes)	Des données supplémentaires peuvent être nécessaires pour des études spécifiques (p. ex. les besoins en irrigation, le taux de dégradation et d'érosion des sols)

7.5 ÉVALUATIONS INTEGREEES

Une caractéristique commune des différentes approches par rapport à l'évaluation des impacts climatiques est qu'elles ont toutes une dimension géographique. Le climat et ses impacts varient dans l'espace et son modèle de variation changera probablement au fur et à mesure que le climat change. Ces aspects revêtent une importance cruciale pour les décideurs politiques à l'échelle régionale, nationale ou internationale parce que les modèles de changement concernant les ressources peuvent affecter l'équité régionale, avec des conséquences importantes sur la planification. Ainsi, les analyses géographiques des changements climatiques et de leurs impacts, où les résultats sont présentés sous forme de carte, ont reçu une plus grande attention ces dernières années. Cette tendance a été mise en parallèle par le développement rapide du GIS sur ordinateur qui peut être utilisé pour stocker, analyser, fusionner et décrire les informations spatiales. Les ordinateurs s'améliorant, la faisabilité pour conduire des études de modélisation détaillées à une échelle régionale a été améliorée. La contrainte principale se trouve sur la disponibilité de données détaillées concernant de larges zones, cependant, les techniques sophistiquées d'interpolation statistique et l'application de générateurs stochastiques de conditions météorologiques fournissant des données climatologiques artificielles à hautes résolutions temporelles peuvent offrir des solutions partielles. Un exemple d'outil d'évaluation avec le GIS intégré concernant la vulnérabilité agricole et l'évaluation est le modèle FAO AEZ (FAO, 1996 et 2002).

7.6 ADAPTATION

7.6.1 PLANIFICATION

D'un point de vue historique, l'agriculture a montré une incroyable capacité d'adaptation aux changements, qu'il s'agisse d'altérations de la disponibilité des ressources, technologiques ou économiques. De nombreuses adaptations sont faites de manière autonome et sans besoin de réponses conscientes des agriculteurs et planificateurs agricoles. Cependant, il est probable qu'au moins dans certains pays du monde, plus particulièrement dans les pays en voie de développement, le rythme et l'ampleur des changements climatiques dépasseront ceux du changement normal dans le domaine de l'agriculture. Par conséquent, des technologies spécifiques et des styles de gestion devront être adoptés pour éviter les effets les plus graves. Dans la mesure du possible, les ajustements de la réponse doivent être identifiés avec leurs coûts et avantages. Il y a beaucoup à gagner de l'évaluation de la capacité de la technologie actuelle et de la capacité potentielle future.

Bien que la plupart des adaptations aux changements climatiques soient enfin caractérisées par des réponses au niveau de l'exploitation agricole, l'encouragement de réponse par la politique affecte la vitesse et l'ampleur de l'adoption. Le temps nécessaire pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation varie considérablement en fonction de l'échelle, du coût, des ressources et des capacités nécessaires pour mettre en œuvre la mesure et surmonter les obstacles. Deux grands types d'adaptation sont pris en considération ici : l'adaptation basée sur l'exploitation agricole et l'adaptation politique. L'adaptation basée sur l'exploitation agricole comprend les changements des cultures ou de la gestion des cultures. Le **Tableau 7-6** expose des exemples de mesures d'adaptation basées sur l'exploitation agricole qui peuvent être évaluées avec les outils mentionnés dans ce chapitre. Toutes les mesures peuvent contribuer à s'adapter aux changements climatiques, mais dans de nombreux cas, elles peuvent avoir des effets négatifs imprévus (« inadaptés ») qui doivent être soigneusement évalués, comme les mesures d'adaptation qui peuvent être considérées comme efficaces à court terme mais limitent les choix adaptatifs futurs (Barnett et O'Neill, 2009). L'adaptation basée sur la politique peut créer une synergie avec les réponses des agriculteurs, en particulier dans les pays où l'éducation de la population rurale est limitée. Chercher à tester la robustesse des stratégies agricoles alternatives et développer de nouvelles variétés de cultures fait également partie des mesures basées sur la politique qui ont un potentiel d'efficacité.



Tableau 7-6 : Exemple de mesures d'adaptation basées sur l'exploitation agricole, d'actions à mettre en place et de résultats potentiels (Iglesias et coll., 2007(a))

Mesure	Action	Résultat potentiel
Choix de la culture	Utilisation de variétés résistantes à la sécheresse ou à la chaleur	Risque réduit de perte de rendement et de besoins d'irrigation
	Utilisation de variétés résistantes aux organismes nuisibles	Réduction des pertes de cultures lorsque les conditions climatiques sont favorables à l'augmentation des mauvaises herbes et des organismes nuisibles
	Utilisation de variétés arrivant à maturité plus vite (ou moins vite)	Assure la maturation pour des saisons de croissance raccourcies avec une humidité réduite ou des ressources thermales, maximisation des rendements sous des saisons de croissance plus longues
	Modification du mélange de cultures	Réduit la variabilité de la production
Travail du sol et temps d'exploitation	Changer la date de plantation	Correspond aux modèles de précipitations modifiées
	Étagement, cloisonnement	Humidité accrue disponible pour les plantes
	Nivellement de la terre	Écoulement de l'eau et augmentation de l'infiltration
	Travail du sol réduit	Réduction de perte des matières organiques du sol, réduction de l'érosion des sols et réduction de perte des nutriments
	Labour profond	Diminution des couches résistantes ou des zones tassées pour augmenter l'infiltration
	Changer les pratiques de jachère et de paillage	Rétention des matières humides et organiques
	Modifier les cultures	Réduction de l'infestation des mauvaises herbes
	Changer les saisons	Éviter les effets des sécheresses d'été (p. ex. en

	de culture	changeant les cultures de printemps pour des cultures d'hiver)
Cultures	Modifier les rangées et l'espacement des plantes	Améliorer l'extension des racines vers l'eau des sols
	Cultures intercalaires	Réduire la variabilité du rendement, maximiser l'utilisation de l'humidité
Irrigation et récupération de l'eau	Introduire de nouveaux systèmes d'irrigation dans les zones sèches	Éviter les pertes dues à la sécheresse
	Améliorer l'efficacité de l'irrigation	Éviter le stress dû à l'humidité
	Récupération de l'eau	Augmenter la disponibilité de l'humidité
Contribution de l'agrochimie	Variation des quantités d'application des engrais	Augmenter l'azote pour améliorer le rendement s'il y a plus d'eau disponible ou diminuer l'azote pour minimiser les coûts
	Modifier le moment d'application	Faire correspondre les applications, par exemple, avec les modèles de précipitations modifiées
	Variation de la quantité des traitements chimiques	Éviter les organismes nuisibles et les dommages causés par les maladies

Iglesias et autres, 1999) (2011(c), 2007(b)) présentent une évaluation en termes d'avantages potentiels, de faisabilité technique et de coûts éventuels pour un certain nombre d'options d'adaptation potentielles explorées, non seulement pour faire face aux risques des changements climatiques, mais aussi pour permettre l'exploitation des opportunités. Le **Tableau 7-7** fournit une évaluation des options d'adaptation potentielles pour répondre aux risques et opportunités identifiés. Le niveau de mise en œuvre, la catégorie d'options et l'information concernant l'échelle de temps (l'urgence), la difficulté technique, le coût éventuel et les bénéfices potentiels sont signalés pour chaque option potentielle d'adaptation. La discussion du tableau est largement divisée entre les risques, les mesures et les opportunités identifiées : le zonage et la productivité agricole, les inondations, la sécheresse, les pénuries et l'irrigation d'eau, la qualité de l'eau, les glaciers et le permafrost, l'élévation du niveau de la mer, les organismes nuisibles, les maladies et le bétail. Le tableau synthétise les résultats avec un ratio quantitatif simple (échelle moyenne de temps, coût éventuel et difficulté technique) pour bénéficier

(bénéfice potentiel) des différentes mesures d'adaptation pour tous les risques et opportunités identifiés.

Tableau 7-7 : Adaptation des mesures aux risques et opportunités des changements climatiques

LÉGENDE : (1) niveau des exploitations agricoles (EA) : niveau politique (P) – (2) technique (T) : gestion (GE) : infrastructure (I) – (3) court terme (CT), moyen terme (MT) ou long terme (LT) – (4) (5) (6) faible (F), moyen (M) ou élevé (É)

Risque / Mesure	Niveau (1)	Catégorie (2)	Échelle de temps (3)	Difficulté technique 4.	Coût potentiel (5)	Bénéfice s potentiel s (6)
Tous les risques						
Mettre en œuvre des plans d'adaptation régionaux	P	GE	LT	É	M	É
Services de conseil	P	GE	MT	M	M	É
Recherche : technologie et biotechnologie	P	GE	LT	É	É	É
Recherche : utilisation efficace de l'eau	P	GE	MT	M	M	É
Recherche : gestion et planification	P	GE	CT	M	F	É
Assurance	P	GE	MT	M	É	É
1 Perturbation des zones d'urbanisation et diminution de la productivité des récoltes						
Changement des cultures et des modèles de culture	EA	GE	CT	F	M	M
Changement des pratiques de culture	EA	GE	MT	M	M	M
Contribution croissante de	EA	GE	CT	F	M	F

l'agrochimie						
Introduction de nouvelles zones d'irrigation	P	GE	LT	É	É	É
Développement des cultures résistantes aux changements climatiques	P	T	LT	É	É	M
Diversification des moyens de subsistance	P	GE	MT	M	É	M
Délocalisation de l'industrie de transformation agricole	P	GE	LT	É	É	É
2 Risque d'inondation accru						
Créer/restaurer des zones humides	EA	I	LT	É	É	M
Améliorer la gestion des zones inondables	EA	GE	MT	É	É	É
Améliorer les systèmes de drainage	EA	I	LT	M	F	M
Réduire les pressions sur les pâturages pour protéger contre l'érosion du sol	EA	GE	MT	M	É	F
Ajout de matières organiques dans les sols	EA	GE	CT	F	M	F
Encourager les agriculteurs à être les « gardiens » des zones inondables	P	GE	LT	M	É	É
Défenses solides	P	I	LT	É	É	É

Augmenter la capacité d'interception des précipitations (réservoirs)	P	I	MT	M	M	É
--	---	---	----	---	---	---

3 Augmentation du risque de sécheresse et de la pénurie d'eau

4 Augmentation du besoin d'irrigation de supplément

Introduire des cultures résistantes à la sécheresse	EA	GE	LT	É	M	M
Déplacer les récoltes des zones vulnérables	EA	GE	LT	É	É	M
Améliorer la capacité de rétention d'humidité des sols	EA	T	MT	M	M	F
Augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation	EA	T	MT	M	M	É
Réservoirs d'eau à petite échelle sur les terres agricoles	EA	I	MT	M	M	É
Systèmes d'irrigation avancés	EA	T	MT	M	É	É
Améliorer la capacité des réservoirs	P	I	LT	É	É	É
Réutilisation de l'eau	P	I	MT	É	É	É
Améliorer la tarification et le commerce de l'eau	P	GE	LT	É	É	É
Introduire des audits sur l'eau	P	GE	LT	É	F	É
Renégocier des accords de	P	GE	LT	É	É	É

prélèvement de l'eau souterraine						
Définir les priorités d'utilisation de l'eau claire	P	GE	LT	É	F	É
5 Détérioration de la qualité de l'eau						
Améliorer l'efficacité de la fertilisation à l'azote	EA	GE	CT	F	F	F
Matériel d'aération des labours	EA	T	MT	F	M	F
Développer des intrants moins polluants	P	T	LT	M	F	É
6 Détérioration de la qualité des sols et désertification						
Introduire une agriculture de précision	EA	GE	LT	M	É	M
Gestion du carbone du sol et zéro travail du sol	EA	T	MT	M	M	M
7 Perte des glaciers et modification du permafrost						
Capture de l'eau et systèmes de stockage	P	I	LT	M	É	É
Augmenter l'entretien et l'organisation des bâtiments et des infrastructures	P	I	LT	M	É	M
8 Intrusion de la mer dans les zones agricoles côtières due à l'élévation de son niveau						
Cultures de substitution	EA	GE	MT	M	M	F
Améliorer les	EA	I	LT	M	É	É



systèmes de drainage						
Défenses solides	P	I	LT	É	É	É
Gestion de l'intrusion des eaux salées	P	GE	LT	É	É	É
Réserver des terres pour des zones tampons	P	GE	LT	É	É	É
9 Risque accru des organismes, maladies et mauvaises herbes nuisibles à l'agriculture						
Application supplémentaire de pesticides	EA	GE	CT	F	F	F
Introduction de variétés résistantes aux organismes nuisibles	EA	GE	CT	M	É	M
Utilisation de prédateurs naturels	EA	GE	CT	M	M	F
Vacciner le bétail	EA	GE	CT	F	M	F
Améliorer le suivi	P	I	LT	É	M	É
Développer des stratégies de pesticides durables	P	GE	LT	M	M	F
10 Détérioration des conditions de vie du bétail						
Changer pour des espèces/races plus tolérantes à la chaleur	EA	GE	LT	É	M	M
Changer le régime de pâturage	EA	GE	CT	F	F	F
Changer la composition du pâturage	EA	GE	CT	F	F	F

Alimentation complémentaire au pâturage	EA	GE	CT	F	M	F
Changer le moment d'exploitation et d'élevage	EA	GE	MT	É	M	M
Augmenter les abris et la protection contre la chaleur	EA	I	LT	M	É	M
Toutes les opportunités						
Mettre en œuvre des plans d'adaptation régionaux	P	GE	LT	É	M	É
Services de conseil	P	GE	MT	M	M	É
Recherche : technologie et biotechnologie	P	GE	LT	É	É	É
Recherche : utilisation efficace de l'eau	P	GE	MT	M	M	É
Recherche : gestion et planification	P	GE	CT	M	F	É
Changer pour des variétés plus productives	EA	T	MT	M	M	M
Améliorer la diversification des cultures	EA	T	LT	M	M	M
Étendre l'élevage du bétail à de nouvelles zones	EA	T	MT	M	É	M
Augmenter les taux de stockage	EA	GE	CT	F	M	F

Diminuer le chauffage dans les serres	EA	T	CT	F	F	É
Introduire des sources de chaleur souterraines	EA	T	CT	M	M	M

7.6.2 INTEGRATION

Lors de l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le secteur agricole, il est important d'examiner comment les changements dans d'autres secteurs peuvent également contribuer aux impacts dans ce secteur agricole (Tableau 7-7). Par exemple, les impacts côtiers peuvent aussi avoir des effets sur le secteur de l'agriculture dû à l'élévation du niveau de la mer, qui a un effet sur la disponibilité des terres pour l'agriculture ou qui augmente la salinité des terres agricoles

Bien que l'impact et la planification de l'adaptation soient examinés au niveau spécifique du secteur, l'évaluation des interrelations entre les secteurs et leur influence globale sur la priorisation du risque et la planification de l'adaptation est importante. Ce type d'évaluation intersectorielle est désigné par le terme « intégration ». L'objectif de l'intégration est d'appréhender les interrelations entre les risques spécifiques à chaque secteur, afin de définir les priorités en matière d'impact et d'adaptation.

Il est important que les décideurs politiques et les autres parties prenantes comprennent comment un secteur, une communauté, une région ou une nation peut être affecté dans son ensemble par les changements climatiques, ainsi que l'impact économique total pouvant en résulter. Il est également important de savoir comment différents secteurs, régions ou populations se situent les uns par rapport aux autres, en ce qui concerne leur vulnérabilité relative, pour permettre de définir les priorités en matière d'adaptation.

Il existe essentiellement deux approches pour intégrer l'adaptation dans l'agriculture, la sylviculture et la pêche. La première consiste à utiliser des modèles d'évaluation intégrés, tels que ceux décrits dans la section 7.5 qui prennent explicitement une perspective spatiale intégrée. La deuxième approche consiste à chercher à comparer les résultats d'un certain nombre d'évaluations axées sur la géographie ou spécifiques à une culture pour une vision cohérente des priorités et des mesures d'adaptation. Tel que décrit dans la section, la recherche d'une telle approche mixte est souvent la meilleure et une réflexion approfondie doit être faite sur les méthodes qui servent à intégrer les résultats, y compris l'analyse multicritères ou des outils basés sur l'économie.

Le chapitre 9 de ces supports de formation fournit de plus amples renseignements sur l'intégration de l'évaluation de l'impact et des résultats de l'adaptation.

7.6.3 PRISE EN COMPTE

La prise en compte est définie comme le processus d'incorporation des préoccupations climatiques et des réponses d'adaptation dans les politiques, plans, programmes et projets pertinents au niveau national, infranational et local (USAID, 2007). Les mesures d'adaptation sont rarement mises en œuvre uniquement pour répondre aux changements climatiques, car elles offrent habituellement d'autres avantages en termes de développement. Lors de l'achèvement des communications nationales, il est important de prendre en compte la manière dont les résultats seront intégrés dans le pays, afin de permettre la réalisation d'un changement significatif.

Le cadre de travail du PNUD en matière de prise en compte souligne trois composantes majeures d'une prise en compte efficace des changements climatiques :

- trouver les points d'entrée et plaider leur cause ;
- prendre en compte l'adaptation dans des processus politiques ;
- surmonter le défi de la mise en œuvre.

Vous trouverez de plus amples informations sur la prise en compte au chapitre 9 de cette ressource.



7.6.4 SUIVI ET EVALUATION

La question importante lors de la mise en œuvre d'options d'adaptation est de savoir comment l'efficacité de l'adaptation sera suivie et évaluée. Heureusement, de nombreuses organisations, dont le PNUD et la Banque mondiale, travaillent à l'élaboration d'approches pratiques de suivi et d'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques en instaurant des « cadres de travail basés sur des résultats » qui s'inscrivent dans le contexte plus vaste de l'efficacité de l'aide.

Les problèmes à prendre en compte dans la conception du suivi et de l'évaluation de l'adaptation comprennent (Kay et coll., à paraître) :

- orientation des résultats : quel est l'objectif de l'action d'adaptation ?
- pourquoi l'action d'adaptation a-t-elle été choisie – peut-être pour se focaliser sur les priorités immédiates en matière de santé pour réduire la vulnérabilité ou les impacts des changements climatiques à plus long terme – et quels sont les obstacles, les contraintes et les opportunités qui influenceront sur la réussite de cette mise en œuvre ?
- à quel niveau l'action d'adaptation aura-t-elle un impact ?
- quand l'impact d'une action d'adaptation sera-t-il connu ?

Il s'agit de considérations importantes pouvant également aider à la planification globale d'actions d'adaptation pour les zones côtières et offrant un point de mire qui permettra de s'assurer que les actions spécifiques choisies pendant le processus de planification seront les plus efficaces.

On distingue quatre étapes clés dans le suivi et l'évaluation dédiés au rapport sur la mise en œuvre des priorités d'adaptation identifiées dans les communications nationales :

- mettre en place un cadre de référence de suivi et d'évaluation ;
- élaborer un plan d'évaluation ;
- mener une évaluation ;
- communiquer les résultats.

D'autres directives sur le suivi et l'évaluation de l'adaptation sont données au chapitre 9.



7.7 REFERENCES

- Adams RM, Rosenzweig C, Peart RM, Ritchie JT, McCarl BA, Glycer JD, Curry RB, Jones JW, Boote KJ et Allen LH. 1990 Global climate change and US agriculture. *Nature*. 345: pp.219–224.
- Alexandratos N. 2005. Countries with rapid population growth and resources constraints: issues of food, agriculture and development. *Popul. Dev.* 30(31): pp. 237-258.
- Badini O, Stöckle CO et Franz EH. 1997 Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 64: pp. 233–244.
- Barnett J et O'Neill S. 2009. Maladaptation: Éditorial. *Changement environnemental mondial*. 20: pp. 211-213.
- Benioff R et Warren J (éd.). 1996. *Steps in Preparing Climate Change Action Plans: A Handbook*. Washington, D.C. : U.S. Country Studies Program.
- Boogaard HL, van Diepen CA, Rötter RP, Cabrera JMCA et van Laar HH. 1998. *User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5*. Technical Document 52. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen.
- Brockmeier M. 2000. *Impact of Agenda 2000 on Poland's Integration with the EU Integration Scenarios – Report I*. For PHARE PL 9607-01-24, Development of Analytical Capacity in the Area of Agri-Food Product Markets (Component B), Warsaw. (article non publié).
- Carter TR. et Saarikko RA. 1996. Estimating regional crop potential in Finland under a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79(4): pp. 301–313.
- Conrad K. 2001. Computable general equilibrium models in environmental and resource economics. In: T Tietenberg et H Folmer (éd.). *The international yearbook of environmental and resource economics*. 2002/2003. pp. 66–114.
- Downing, Thomas E. 1991. "Vulnerability to hunger in Africa: a climate change perspective," *Global Environmental Change*, Vol. 1:5: pp. 365-380
- Easterling WE, Aggarwal PK, Batima P, Brander KM, L. Erda L, Howden SM, Kirilenko A, Morton J, Soussana JF, Schmidhuber J et Tubiello FN. 2007: Food, fibre and forest products. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change*. ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden et CE Hanson (éd.). Cambridge : Cambridge University Press. pp. 273–313.
- FAO. 2011(Food and Agriculture Organization of the United Nations). Framework Programme on Climate Change Adaptation.
- FAO. 2006. *World Agriculture: Towards 2030/2050 – Interim Report: Prospects for Food, Nutrition, Agriculture and Major Commodity Groups*. Rome : FAO. 78 pp.
- FAO. 2004. FAOCLIM, un CD-ROM offrant des données agroclimatiques mondiales. Disponible sur <http://www.fao.org/sd/2001/EN1102_en.htm>.
- FAO. 2002. *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the Twenty-First Century* [CD-ROM]. FAO Land and Water Digital Media Series Number 21. ISBN 9251048525.
- FAO. 1996. Agroecological Zones Guidelines. *FAO Soils Bulletin* 73. Soil Resources, Management and Conservation Service. FAO Land and Water Development Division.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. et Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: pp. 570-574. Fischer G Shah M et van Velthuisen H. 2002. *Climate Change and Agricultural Vulnerability*. Vienne : International Institute of Applied Systems Analysis.
- Gadgil S, Huda AKS, Jodha NS, Singh RP et Virmani SM. 1988. The effects of climatic variations on agriculture in dry tropical regions of India. *In*: ML Parry, TR Carter et NT Konijn (éd.). *Assessments in Semi-Arid Regions*, Volume 2 of *The Impact of Climatic Variations on Agriculture*. Dordrecht, Pays-Bas : Kluwer Academic Publishers. pp. 495–521.
- Hansen JW et Jones JW. 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems*. 65: pp. 43–72.
- Hazell P et Wood S. 2007. Drivers of change in global agriculture. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*. 363(1491): pp. 495–515
- Hertel TW. 1997. *Global Trade Analysis: Modelling and Applications*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Holden, NM. 2001. *Agro-Meteorological Modeling – Principles, Data and Applications*. Dublin : Agmet.
-

- Iglesias A, Garrote L, Quiroga S et Moneo M. 2011a. A regional comparison of the effects of climate change on agriculture in Europe. *Climatic Change*.
- Iglesias A, Mougou R, Moneo M et Quiroga S. 2011b. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*. 11: pp.159–166.
- Iglesias A, Moneo M, Quiroga S et Garrote L. 2011c. Re-thinking adaptation priorities to climate change for agriculture in Europe. *Climatic Change*.
- Iglesias A et Quiroga S. 2007. Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. *Climate Research*. 34: pp. 45–57.
- Iglesias A, Avis K, Benzie M, Fisher P, Harley M, Hodgson N, Horrocks L, Moneo M et Webb J. 2007a. *Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector*. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development.
- Iglesias A, Garrote L, Flores F et Moneo M. 2007b. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management*. 21(5): pp. 227–288.
- Iglesias A, Rosenzweig C et Pereira D. 2000. Agricultural impacts of climate in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change*. 10: pp. 69–80.
- Kay RC, Haines A, Rosenzweig C, Steffen W et Thom B. Forthcoming. Perspectives on Adaptation Effectiveness. In: Jean Palutikof, Martin Parry and Sarah Boulter et al coll. (eds.). *Climate Adaptation Futures*.
- Lobell DB et Burke MB. 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150 (11): pp. 1443–1452.
- Lobell DB, Ortiz-Monasterio JI et Falcon WP. 2007. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data. *Agricultural Systems*, 92: pp. 76–90.
- Lepers E, Lambin EF, Janetos AC, de Fries R, Achard F, Ramankutty N et Scholes RJ. 2004. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. *BioScience*. 55: pp. 115–124.
- Long S, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nösberger J et Ort DR. 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*. 3(12): pp. 1918–1921.

- Mendelsohn R, Nordhaus W et Shaw D. 1994. The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis. *American Economic Review*. 84(4): pp. 753–771.
- Mendelsohn R, Nordhaus W et Shaw D. 1999. The impact of climate variation on US agriculture. In: R Mendelsohn et J Neumann (éd.). *The Impacts of Climate Change on the U.S. Economy*. Cambridge, R-U : Cambridge University Press. pp. 55–93.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP et Wilbanks TJ. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: pp. 747–756.
- Parry M and Carter T. 1998. *Climate Impact and Adaptation Assessment: A Guide to the IPCC Approach*. Londres : Earthscan.
- Parry, M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore et Fischer G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environment Change*, 14: pp. 53-67
- Porter JR et Semenov MA. 2005. Crop responses to climatic variability. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B*. 360(1463): pp. 2021–2035.
- Quiroga S et Iglesias A. 2008. Projections of economic impacts of climate change in agriculture in Europe. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. 7(14): p. 65-82.
- Quiroga S and Iglesias A. 2009. A comparison of the climate risks of cereal, citrus, grapevine and olive production in Spain. *Agricultural Systems*. 101. pp. 91–100.
- Rosenzweig C et Iglesias A (éd.). 1994. *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*. EPA 230-B-94-003. Washington, D.C. : US Environmental Protection Agency.
- Rosenzweig C et Iglesias A. 1998. The use of crop models for international climate change impact assessment. In: GY Rosenzweig, CK Strzepek, D Major, A Iglesias, D Yates, A Holt et D Hillel. 2005. *Understanding Options for Agricultural Production*. Water availability for agriculture under climate change: Five international studies. *Global Environmental Change*.
- Rosenzweig C, Iglesias A, Fischer G, Liu Y, Baethgen W et Jones JW. 1999. Wheat yield functions for analysis of landuse change in China. *Environmental Modeling and Assessment*. 4: pp. 128–132.

- Rosenzweig, C., K.M. Strzepek, D.C. Major, A. Iglesias, D.N. Yates, A. McCluskey et D. Hillel, 2004: Water resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change*, 14: pp. 345-360
- Rotter, R.P., Carter, T.R. Olesen, J.E. et Porter, J.R. .2011. Crop-climate models need an overhaul. *Nature Climate Change* 1: pp. 175–177.
- Sharpley AN et Williams JR. 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator (Calculateur de l'impact de l'érosion sur la productivité). 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D et Fereres E. 2009. AquaCrop–The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. (101). pp. 426–437.
- Stern, N., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S.Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie et D. Zenghelis (2006), Stern Review: The Economics of Climate Change, HM Treasury, London.
- Supit I, Hooijer AA et van Diepen CA (éd.). 1994. *System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS*. Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities.
- USAID (Agence américaine pour le développement international). 2009. *Adapting to Climate Variability and Change: A Guidance Manual for Development Planning*. Disponible sur <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADJ990.pdf >