

SYNTHESE TECHNIQUE

LES PROSPECTIVES SUR L'EAU POUR
L'AGRICULTURE A L'ECHELLE
MONDIALE : ETAT DES LIEUX ET
PISTES DE DEVELOPPEMENT

DOUSSET Emma

emma.dousset@agroparistech.engref.fr

février 2010

AgroParisTech – Engref Montpellier
B.P.44494 – 34093 MONTPELLIER Cedex 5
Tél. (+33) 4 67 04 71 00
Fax (+33) 4 67 04 71 01

Fondation pour l'Agriculture et la
Ruralité dans le Monde
91-93 boulevard Pasteur
75710 Paris cedex 15
Tél. 01 57 72 07 19

RESUME :

Si l'eau est un paramètre clé de la détermination des équilibres entre production agricole et consommation alimentaire, elle est prise en compte à des niveaux de détail variables au sein des prospectives alimentaires réalisées à l'échelle mondiale. La demande en eau agricole (irrigation) est en général évaluée, les demandes des autres secteurs le sont plus rarement. La pression sur la ressource peut être estimée via des indicateurs dédiés, et l'adéquation entre ressource et usages est parfois assurée par l'utilisation de règles d'allocation entre secteurs. L'utilisation de modèles dédiés facilite la prise en compte de l'eau dans les études. Les problèmes connexes liés à l'eau (pollution, dégradation des sols, perte de biodiversité) et leurs effets restent malgré tout à la marge et ne sont pas quantifiés. Enfin des difficultés liées au manque de données, à la méthodologie ou à la prise en compte du changement climatique existent. Certaines études actuelles indiquent qu'il y aura suffisamment d'eau en 2050 pour nourrir la planète. Cependant ces résultats ne peuvent être considérés comme totalement fiables. De nouvelles études prenant en compte le changement climatique, les problèmes connexes liés à l'eau, la résilience des socio-écosystèmes agricoles et accordant une attention particulière au niveau de consommation alimentaire et au maillage géographique seront plus précises.

MOTS CLES :

Prospective, agriculture, alimentation, eau, monde, demande en eau, ressource et usages, irrigation, modèle

ABSTRACT:

As water is a key parameter to estimate the balance between agricultural production and food consumption, it is considered with varying levels of detail in the different world food futures studies. Agricultural water demand (for irrigation) is usually evaluated; water demands for other sectors are less often assessed. The pressure on water resource can be estimated through dedicated indicators, and the equilibrium between uses and resources is sometimes ensured using allocation rules that share out water between the different sectors in case of shortage. The use of dedicated models makes the consideration of water in futures studies easier. Nevertheless, qualitative issues related to water management (pollution, soil degradation, loss of biodiversity...) and their impacts are not evaluated. Finally, futures studies must face up to difficulties due to the lack of data, to methodological problems and to the inclusion of climate change effects. Some studies show that there will be enough water in 2050 to meet global demand for food. However, these results are not entirely reliable. New studies taking into account climate change, the issues related to water management, the resiliency of agricultural socio-ecosystems and carefully considering the levels of food consumption and the geographical grid will be more accurate.

KEY WORDS :

Strategic foresight, futures study, agriculture, food, water, world, water demand, resource and uses, irrigation, model

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>LES POINTS CLES DES ETUDES PROSPECTIVES AGRICULTURE / ALIMENTATION</u> ..	2
o <u>LES TRAVAUX CONSULTES</u>	2
La démarche prospective.....	2
La multiplicité des travaux existants.....	2
o <u>L'OFFRE ET LA DEMANDE EN PRODUITS ALIMENTAIRES</u>	3
Une évaluation commune à toutes les prospectives.....	3
... à quelques différences près.....	3
L'utilisation de modèles quantitatifs.....	4
o <u>UNE PRISE EN COMPTE PLUS OU MOINS DETAILLEE DE L'EAU</u>	4
Prise en compte des besoins en eau : du qualitatif au quantitatif.....	4
Qu'en est-il des ressources en eau ?.....	4
L'adéquation entre besoins et ressources.....	5
La question de l'eau dans les modèles.....	6
Les problèmes qualitatifs liés à l'eau.....	6
o <u>DIFFICULTEES RENCONTREES</u>	7
Manque de données et problèmes de fiabilité.....	7
Différentes méthodes pour évaluer la demande en eau.....	7
Les problèmes liés à la prise en compte du changement climatique.....	7
<u>POUR ALLER PLUS LOIN : ETUDE APPROFONDIE DE CERTAINS TRAVAUX</u>	9
o <u>WORLD AGRICULTURE : TOWARDS 2015/2030 : SIMPLE MAIS EFFICACE</u>	9
Présentation générale.....	9
Méthodologie de la prise en compte de l'eau.....	9
Résultats.....	9
Limites.....	10
o <u>WORLD WATER AND FOOD TO 2025 : SCENARIOS PROSPECTIFS ET ANALYSE D'INTERACTIONS PARTICULIERES</u>	10
Présentation générale.....	10
Résultats.....	10
Points forts et limites de cette étude.....	11
o <u>WATER FOR FOOD WATER FOR LIFE : DIFFERENTES PISTES POUR REpondre AUX BESOINS ALIMENTAIRES</u>	11
Présentation générale.....	11
Résultats.....	11
Points forts et limites de l'étude.....	12
<u>RESULTATS ET DISCUSSION</u>	12
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	14
<u>ANNEXE 1 : différentes données et principaux paramètres pris en compte dans les études</u>	15
<u>ANNEXE 2 : quelques résultats chiffrés de l'étude sur les impacts du changement climatique réalisée par l'IFPRI</u>	16
<u>ANNEXE 3 : Tableau récapitulatif des résultats des trois prospectives analysées plus en détail</u>	17

SYMBOLES ET ACRONYMES

CAWMA	Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture
FAO	Food and Agriculture Organization
GAEZ	Global Agro-Ecological Zones (travail de la FAO et de l'IIASA)
GES	Gaz à Effet de Serre
IFPRI	International Food Policy Research Institute
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IWMI	International Water Management Institute
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
Mha	Million d'hectare
PED	Pays En Développement

INTRODUCTION

Selon les estimations de l'Organisation des Nations Unies, la population mondiale devrait augmenter de 34 % au cours des quarante prochaines années pour atteindre 9,1 milliards d'habitants au milieu du siècle. La quasi-totalité de cet accroissement se produira dans les pays en voie de développement. La tendance à l'urbanisation va par ailleurs s'accroître et près de 70% de la population mondiale sera urbaine d'ici 2050 (contre 49% aujourd'hui). Les niveaux des revenus seront démultipliés par rapport à ce qu'ils sont aujourd'hui. D'après la Food and Agriculture Organization (FAO), afin de nourrir cette population plus importante, plus urbaine et en moyenne plus riche, la production alimentaire (sans compter les produits alimentaires utilisés pour la fabrication de biocarburants liquides) doit augmenter d'environ 70% (World Summit on Food Security, 2009).

En outre, les questions de l'éradication de la faim et de la malnutrition doivent plus que jamais demeurer au cœur du débat. En effet, si la consommation alimentaire moyenne par personne dans les pays en développement est bien en augmentation depuis les années 1960, une part non négligeable de la population mondiale reste à la marge de tout progrès. Pire, si le nombre de personnes souffrant de malnutrition avait bien diminué à la fin du XXème siècle (passant de 816 millions pour 1990-92 à 777 millions en 1997-99 d'après la FAO), la récente crise financière et les augmentations spectaculaires des prix des aliments ont inversé la tendance, et ce en dépit des niveaux records atteints par les récoltes. Ainsi, la FAO estime que le nombre de personnes chroniquement sous-alimentées a dépassé le milliard en 2009 (World Summit on Food Security, 2009).

Dès lors la question se pose de savoir si et dans quelles conditions la production agricole mondiale va pouvoir augmenter suffisamment pour satisfaire les besoins croissants en biens alimentaires et éradiquer la faim dans le monde. La réponse est d'autant plus complexe à apporter que de nombreux paramètres, tels que la demande en biocarburants et le changement climatique, doivent être pris en compte.

Des travaux de prospective sur les équilibres mondiaux entre production et consommation alimentaire ont été menés par différents organismes pour tenter d'éclairer les décideurs sur l'enjeu de la satisfaction des besoins alimentaires de la planète au cours des prochaines décennies. L'eau est un paramètre déterminant de la question, puisqu'elle peut limiter la production agricole. Les études existantes l'intègrent la plupart du temps mais avec un degré de détail variable. L'objectif de la synthèse est dès lors de faire un état des lieux des connaissances disponibles dans les divers travaux, et en particulier dans les prospectives, sur l'équilibre entre ressources et usages de l'eau agricole à l'échelle mondiale, vis-à-vis d'objectifs de satisfaction des besoins alimentaires.

Une première partie, générale, présentera les différents travaux de prospective consultés et leurs démarches concernant l'estimation des équilibres entre production et consommation alimentaire et la prise en compte de la ressource en eau. Les principales difficultés rencontrées lors de la réalisation de ces diverses études seront également évoquées.

Une deuxième partie présentera les trois travaux qui détaillent le plus la prise en compte des équilibres entre ressources et usages en eau agricole.

Enfin une troisième partie présentera les résultats clés des études consultées et identifiera les principaux points de débats et des pistes de développement pour améliorer la qualité des prospectives.

LES POINTS CLES DES ETUDES PROSPECTIVES AGRICULTURE / ALIMENTATION

Cette partie s'attachera à présenter la diversité des travaux existants. Les études varient tout d'abord de par leur nature. Ainsi au sein même des études prospectives, différentes méthodes peuvent être appliquées, d'où la multiplicité des travaux et les divergences de résultats. Un point commun demeure malgré tout d'une étude à l'autre, puisqu'une évaluation de l'offre et de la demande en produits alimentaires est toujours effectuée. L'équilibre entre ressources et usages de l'eau agricole, est en revanche pris en compte à un degré de détail très variable. Nous verrons qu'il en est de même d'autres problèmes liés à la gestion de l'eau agricole. Enfin, toutes les études ont du faire face à des difficultés, celles-ci seront explicitées. Une attention toute particulière sera donnée à celle de la prise en compte du changement climatique.

o LES TRAVAUX CONSULTES

La synthèse porte principalement sur la prise en compte de l'équilibre entre ressources et usages de l'eau agricole dans les prospectives. Une définition de ce qu'est la démarche prospective est donc nécessaire.

La démarche prospective (à partir de (Jouvenel De, 1999)):

Contrairement à la prévision qui est centrée sur une approche sectorielle, la prospective aborde le problème de manière globale et multidisciplinaire. Elle prend en compte tous les facteurs qui entrent en jeu dans le problème et les interactions qui peuvent (ou pourront) exister entre eux. Par ailleurs, la prospective privilégie en général le long terme, sur lequel il est encore possible d'agir, et envisage des ruptures dans l'évolution des facteurs alors que la prévision s'appuie sur le principe de continuité. Enfin, la prospective marie quantitatif et qualitatif dans sa démarche alors que le quantitatif prédomine dans la démarche prévisionnelle.

La démarche prospective se décompose en différentes étapes. Il s'agit tout d'abord de définir le problème et l'horizon temporel, puis d'identifier toutes les variables, tous les acteurs et jeux d'acteurs, ainsi que les relations entre ces éléments. Vient ensuite l'étape de recherche de données sur ces éléments qui doit permettre, à partir des évolutions passées, de définir une évolution tendancielle et d'identifier d'éventuelles ruptures de tendances. Ce travail permet de faire des hypothèses sur l'évolution des variables et jeux d'acteurs.

Différentes méthodes peuvent ensuite être utilisées pour estimer les évolutions envisageables. L'une repose sur des modèles. Elle donne des résultats précis et chiffrés mais le risque de ne pas prendre les bonnes hypothèses en entrée et donc d'obtenir des résultats erronés est grand. A l'inverse la méthode des scénarios donne des résultats plus vagues (grande tendance) mais souvent plus fiables. Pour chaque scénario, on définit une base, un cheminement et une image finale à l'horizon donné. Ces scénarios peuvent être exploratoires (on fait évoluer les variables et on voit où cela nous mène) ou normatifs (on part d'une image finale qu'on veut atteindre et on regarde par quel cheminement on peut y parvenir). Notons qu'on utilise en général une combinaison des deux méthodes, mêlant donc quantitatif et qualitatif.

Les résultats obtenus par la démarche prospective serviront ensuite comme outil d'aide à la décision.

Le choix qui peut être fait entre la méthode de modélisation et la méthode des scénarios, les choix internes à la méthode des scénarios (scénarios exploratoires ou normatifs, hypothèses...) ou à la modélisation (variables, rétroactions, hypothèses...) et la possibilité de combiner les deux méthodes expliquent les nombreuses différences qui peuvent exister entre des travaux prospectifs traitant du même sujet.

La multiplicité des travaux existants

Au sein même des travaux de prospectives sur l'agriculture et l'alimentation, les démarches et les angles d'attaque adoptés sont variés.

Ainsi, le travail de la FAO (Bruinsman, 2003) est un **exercice d'anticipation** qui présente le futur le plus probable et est centré sur la satisfaction des besoins alimentaires.

Les études Agrimonde (CIRAD et INRA, 2009), World Water and Food to 2025 (Rosegrant et al., 2002) et Water for Food, water for life (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (CAWMA), 2007) sont elles plus proches de la méthode des **scénarios**, même si chacune

s'appuie sur un modèle pour quantifier ses hypothèses. Prenons pour exemple Agrimonde, qui propose deux scénarios différents, l'un repris du Millennium Ecosystem Assessment¹ et l'autre normatif puisque l'on cherche les cheminements à effectuer pour atteindre en 2050 des objectifs de durabilité maximale. Le nombre de variables influençant le système étant trop important, la méthode des scénarios a dû être modifiée, et l'analyse se restreint à certaines variables clés. Agrimonde s'appuie à la fois sur un modèle quantitatif et sur des réflexions qualitatives qui doivent permettre de s'assurer que les scénarios sont cohérents.

La différence majeure entre les trois travaux précédemment cités provient de l'angle d'attaque choisi. Agrimonde se concentre sur la capacité de chaque région à satisfaire ses besoins alimentaires, World Water and Food to 2025 étudie plus spécifiquement le lien entre disponibilité de l'eau et production agricole alors que l'étude du CAWMA est ciblée sur la gestion de l'eau agricole vis-à-vis d'objectifs de satisfaction des besoins alimentaires en 2050.

D'autres études, ciblées sur une problématique plus précise, peuvent servir de référence aux travaux prospectifs. Citons par exemple l'étude de l'International Food Policy Research Institute (IFPRI) (Nelson, 2009) qui s'intéresse aux effets et aux coûts du changement climatique dans le domaine agricole, et présente des pistes pour la prise en compte du changement climatique dans les prospectives agricoles.

Enfin, des travaux non prospectifs ou centrés sur une région particulière peuvent également permettre de mieux appréhender la thématique et mettre en relief des limites ou de nouvelles pistes.

Malgré toutes ces différences, méthodologiques voire de nature, les travaux consultés ont tous un point commun. Ainsi, dans toutes les études prospectives, l'offre et la demande en biens alimentaires sont estimées.

○ L'OFFRE ET LA DEMANDE EN PRODUITS ALIMENTAIRES

Une évaluation commune à toutes les prospectives...

Cette évaluation se fait à différentes échelles selon les études. Elle commence généralement à une échelle inférieure (pays ou agrégats de pays). La liaison des différents résultats à l'échelle mondiale est ensuite réalisée en prenant en compte les échanges commerciaux mondiaux.

Certaines variables utilisées pour déterminer l'offre et la demande en produits agricoles sont récurrentes d'une étude à l'autre. Ainsi la demande dépend en général de la population, des revenus, et du régime alimentaire (quantité de kilocalories et type d'aliments). L'offre dépend de la surface cultivée et des rendements, eux-mêmes dépendant du prix du travail et du capital, des prix des produits alimentaires, des innovations techniques, du type de sol et de climat etc....

Si l'évaluation de l'offre et de la demande est faite dans toutes les études, des différences demeurent. Elles peuvent être dues à l'utilisation de données différentes, à des hypothèses diverses ou à un niveau de détail variable.

... à quelques différences près

L'Organisation des Nations Unies publie tous les deux ans des révisions de ses prévisions démographiques. Les données sur la population utilisées dans les différentes études, qui ne sont pas parues simultanément, ne sont pas toutes les mêmes (elles varient de 8,9 à 9,3 milliards d'humains à l'horizon 2050). De même les données utilisées pour évaluer le revenu national sont variables. La plupart des études s'appuient sur les rapports de la Banque Mondiale, mais certains choisissent de se référer aux résultats d'autres travaux, tels que les estimations du Millennium Ecosystem Assessment. Les hypothèses sur le régime alimentaire changent aussi d'une prospective à l'autre. En général les évolutions prévues dans chaque pays dépendent du niveau de vie (donc du revenu) et des coutumes locales. Cependant dans certains scénarios une autre hypothèse est retenue, telle que l'égalité des consommations caloriques à travers le monde dans le scénario normatif d'Agrimonde (CIRAD et INRA, 2009).

¹ Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC, Island Press, 155 p.

Enfin, le niveau de détail choisi n'est pas le même pour toutes les études, tant du point de vue du découpage géographique (pays/agrégats de pays) que du point de vue des produits agricoles considérés.

En annexe 1, un tableau récapitule des différentes données utilisées dans chaque étude.

L'utilisation de modèles quantitatifs

L'évaluation quantitative de l'offre et de la demande en produits agricoles est en général réalisée grâce à des modèles. Si certains se ressemblent beaucoup, d'autres fonctionnent sur un mode complètement différent.

IMPACT est un modèle réalisé par l'IFPRI dans les années 1990 (Rosegrant et al., 2008). Le degré de détail atteint est intéressant. La demande et l'offre dépendent de nombreuses variables, dont le prix. La recherche de l'équilibre commercial à l'échelle mondiale permet de déterminer la demande, l'offre, le prix des produits agricoles et les volumes échangés au niveau régional puis mondial. IMPACT a été perfectionné en IMPACT WATER pour intégrer la question de l'eau. Ce dernier modèle est utilisé dans World Water and Food to 2025 (Rosegrant et al., 2002).

Le modèle WATERSIM (Fraiture De, 2005), utilisé dans l'étude Water for Food, Water for Life (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007) a été mis au point par l'International Water Management Institute (IWMI). Son module alimentaire s'appuie sur le modèle IMPACT et en est très proche.

Le modèle AGRIBIOM, développé dans le cadre du projet Agrimonde (CIRAD et INRA, 2009) est différent. Il effectue un bilan comptable des emplois et des ressources des produits agricoles qui sont répartis en cinq grands compartiments. L'unité retenue est la calorie alimentaire. Des fonctions de conversion de la calorie végétale en calorie animale ont été évaluées et incorporées au modèle. Les bilans sont réalisés pour chaque grande région, puis le bilan au niveau mondial permet d'ajuster les hypothèses faites sur les variables afin d'atteindre l'équilibre. Ce modèle facilite les allers-retours entre réflexion qualitative et estimation quantitative.

o UNE PRISE EN COMPTE PLUS OU MOINS DETAILLEE DE L'EAU

Prise en compte des besoins en eau : du qualitatif au quantitatif

Dans l'étude Agrimonde, la question de l'eau n'est prise en compte que qualitativement. Dans le scénario normatif créé, l'eau n'a pas été jugée comme étant le facteur qui limitait l'augmentation de production agricole nécessaire dans la plupart des régions. Les chiffres sur l'extension de la surface irriguée ne sont donnés qu'à titre indicatif et sont issus d'une rapide analyse qualitative.

En revanche, dans les autres études, les besoins en eau d'irrigation sont quantifiés avec un niveau de détail variable. Ainsi l'unité géographique de base peut être le pays ou le bassin versant. Le degré de couverture change également d'une étude à l'autre, la FAO s'étant limitée à 93 pays en développement alors que les autres considèrent la quasi-totalité de la planète.

L'évaluation des besoins en eau agricole se fait à chaque fois à partir des mêmes variables clés, à savoir la surface irriguée, l'évapotranspiration réelle, la pluie efficace et l'efficacité des infrastructures d'irrigation. Les données, les maillages géographiques, les méthodes de calcul de l'évapotranspiration utilisées, tout comme les hypothèses sur les surfaces irriguées et l'efficacité des systèmes d'irrigation peuvent ensuite varier. Il y a donc des différences significatives dans les estimations des prélèvements pour l'irrigation. Ainsi les prélèvements pour satisfaire les besoins mondiaux en irrigation d'ici à 2050 varient de 2760 km³/an à 4120 km³/an (contre 2630 km³/an en 2000) selon les différentes hypothèses des scénarios de l'étude du CAWMA.

Les besoins en eau non agricole ne sont pas évalués dans l'étude de la FAO. Ils le sont dans les études de Rosegrant et du CAWMA. Quelques différences existent entre les deux modes de calcul mais retenons que la demande en eau industrielle dépend principalement du Produit Intérieur Brut et que la demande en eau domestique dépend de la croissance démographique, des revenus et du prix de l'eau.

Qu'en est-il des ressources en eau ?

Si les méthodes d'estimation des besoins en eau d'une étude à l'autre se ressemblent, il y a plus de différences entre les évaluations des ressources en eau. Ainsi l'étude de la FAO estime simplement les ressources en eau renouvelables pour chacun des 93 pays étudiés. D'autres études (CAWMA,

Rosegrant) vont plus loin en différenciant l'eau qui recharge les nappes souterraines, le ruissellement généré sur le bassin versant, les eaux issues de transferts interbassins, les eaux s'écoulant depuis des bassins situés à l'amont et les autres sources.

De ce niveau de détail très variable dans l'évaluation des ressources en eau découlent des estimations de l'adéquation entre besoin et ressource très différentes. Ce point sera abordé dans le prochain paragraphe, après un bref récapitulatif de la situation pour les décennies à venir.

L'adéquation entre besoins et ressources

Sans amélioration de la productivité de l'eau et sans aucun changement majeur des schémas de production agricole, il faudra entre 12 000 et 13 000 km³ d'eau par an pour nourrir la planète en 2050 (contre 7 100 – 8 300 km³/an actuellement) (Marsily De, 2006). Cette estimation est du même ordre de grandeur que le volume de ressources en eau renouvelable (estimée à 10 000 – 12 000 km³/an à l'échelle mondiale). Dès lors, comment satisfaire ces futurs besoins en eau ? Différents types de solutions peuvent être envisagés (Marsily De, 2006), ils concernent :

- L'irrigation (extension de la surface irriguée et/ou amélioration de la productivité de l'eau) ;
- Le dessalement de l'eau de mer. Cependant le coût énergétique élevé de cette technologie interdit actuellement sa généralisation.
- L'augmentation de rendement des productions agricoles (et donc la productivité de l'eau) par amélioration génétique. Toutefois les possibilités physiques de progrès restent limitées.
- L'agriculture pluviale, secteur prometteur. L'augmentation de la production pluviale peut venir de l'extension de la surface cultivée, de l'augmentation de l'intensité de culture (période de jachères plus courte, multiplication des récoltes) ou d'une croissance du rendement. Les parts respectives de ces différentes pistes seraient de 20%, 10% et 70% (Bruinsman, 2003).
- Le commerce mondial : en tenant compte des avantages comparatifs des différentes régions et en favorisant les échanges internationaux, le volume d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins alimentaires de la planète peut être minimisé. Cependant les risques environnementaux, sociaux (sécurité alimentaire) ou géopolitiques sont importants.

Aucune solution ne peut être envisagée seule. Celles qui jouent sur la productivité de l'eau et qui réduisent donc le volume d'eau nécessaire sont indispensables (Marsily De, 2006). Par ailleurs, la protection des écosystèmes suppose une extension raisonnée des surfaces agricoles : un tiers des surfaces potentiellement cultivables est déjà cultivé et le reste est majoritairement boisé (Bruinsman, 2003).

Certaines études prospectives abordent la question de l'adéquation entre besoins et ressources en eau. Toutefois l'angle d'attaque est très variable et des solutions pour équilibrer le bilan ne sont pas toujours explorées. Ainsi dans l'étude de la FAO, le but de l'évaluation des besoins en eau d'irrigation est seulement de quantifier la pression de l'irrigation sur la ressource en eau. Un indice est utilisé pour évaluer le nombre de pays où la gestion quantitative de la ressource en eau est préoccupante ou critique. Cependant les problèmes de conflits d'usage ou de rareté de la ressource causés par les usages non-agricoles de l'eau ne sont pas pris en compte.

Dans les études du CAWMA et de Rosegrant, l'échelle choisie pour estimer les besoins en eau bleue des différents secteurs et les ressources en eau disponibles est celle du bassin. En cas de pénurie d'eau à cette échelle, un système d'allocation entre les différents secteurs puis entre les différentes productions agricoles existe. Ce système privilégie en général les besoins environnementaux sur les besoins domestiques et industriels, les besoins en eau agricole passant en dernier. Le choix de la règle d'allocation, qui assure l'adéquation entre emploi et ressource, est très important en termes de gestion de la ressource.

Dans World Water and Food to 2025, l'analyse de scénarios centrés sur des choix politiques particuliers (concernant les débits réservés, l'investissement et la recherche dans l'irrigation...) permet de mieux cerner leurs impacts sur l'équilibre entre emploi et ressource en eau et sur la production agricole. Dans l'étude Water for Food Water for Life, différents scénarios sont envisagés pour réussir à satisfaire les besoins alimentaires mondiaux d'ici 2050. Ils reprennent en partie les solutions énumérées précédemment. Par ailleurs, l'analyse qualitative liée aux scénarios est poussée. Les choix techniques, politiques et sociaux qui doivent être faits dans chacun des scénarios sont en particulier abordés.

Rosegrant utilise des indices comparant demande en eau et eau réellement disponible pour chaque secteur. Ils permettent de mieux palper la pression existant sur la ressource en eau et de mieux cerner l'impact des règles d'allocation. Ce point n'est pas développé par le CAWMA.

La question de l'eau dans les modèles

L'utilisation d'un modèle peut aider à intégrer la question de la gestion quantitative de l'eau agricole plus facilement et de façon plus complète dans des travaux prospectifs. Différents modèles existent à l'heure actuelle. Leurs angles d'attaque et donc leurs degrés de précision sont variés.

Le modèle PODIUM (IWMI, 2004), développé par l'International Water Management Institute (IWMI), repose sur une approche comptable. Il détermine les demandes actuelles et futures (2025) en eau et en produits alimentaires. L'utilisateur définit la croissance démographique, les changements de régime alimentaire et les améliorations de productivité agricole et/ou de productivité de l'eau pour la période étudiée. Le modèle détermine ensuite, à l'échelle nationale, les demandes en eau des différents secteurs (agriculture, industrie, eau domestique, besoins environnementaux).

Le modèle IMPACT WATER (Rosegrant et al., 2008) est une version ultérieure du modèle IMPACT, développée pour prendre en compte l'équilibre entre ressource en eau et les usages de différents secteurs, à l'échelle régionale (281 unités) et mondiale. Un module eau, assimilant les bassins versants à des réservoirs, a été ajouté au module IMPACT. Il permet de déterminer s'il y a pénurie et peut, si nécessaire, répartir les ressources entre les secteurs, et entre les productions agricoles grâce à des règles d'allocations. Le module évalue ainsi l'eau disponible pour chaque culture (en agriculture pluviale ou irriguée) et dans chaque unité géographique, sur toute la période étudiée. Ces résultats sont ensuite utilisés dans le module alimentaire, où la surface cultivée et les rendements dépendent du type d'agriculture et des ressources en eau disponible. Ce modèle offre la possibilité à l'utilisateur d'entrer lui-même les données pluviométriques. Il est donc possible de faire intervenir le changement climatique. Il n'y a par contre aucune rétroaction du module alimentaire dans le module eau.

Le modèle WATERSIM (Fraiture De, 2005), développé par l'IWMI, contient un module alimentaire et un module eau. Ce dernier s'inspire à la fois de l'approche comptable de PODIUM et de la modélisation en bassins-réservoirs d'IMPACT WATER. Le modèle obtenu est très complet. La définition de règles d'allocation assure là encore la répartition des ressources entre secteurs et entre cultures en cas de pénurie. De même, comme dans IMPACT WATER, la surface cultivée et le rendement agricole du module alimentaire dépendent de la ressource en eau disponible. Cependant le lien entre les deux modules est plus étroit puisque certaines variables leur sont communes. Le mode de fonctionnement du modèle, qui est itéré jusqu'à ce qu'un équilibre entre les modules soit atteint, permet d'intégrer les impacts quantitatifs de l'agriculture sur les ressources en eau.

Si les modèles aident à intégrer la question de la gestion de la ressource en eau dans les prospectives, il ne faut pas oublier qu'ils ont des limites. On le perçoit bien dans le modèle WATERGAP, un des modèles les plus perfectionnés à l'heure actuelle, qui est utilisé dans le projet de recherche européen SCENES (Finnish Environment Institute, 2009). Ce modèle utilise une grille très fine, prend en compte les caractéristiques des bassins versants, les débits réservés et contient même un volet qualitatif. Si le passage à une échelle plus fine était nécessaire pour gagner en précision, il est source de difficultés supplémentaires. En effet les données nécessaires pour faire tourner le modèle sont plus nombreuses et donc plus dures à réunir. De plus, des phénomènes tels que les règles de gestion des barrages, qui pouvaient être ignorés pour un maillage plus large deviennent ici importants mais ne sont actuellement pas pris en compte (Rieu, 2010).

Les problèmes qualitatifs liés à l'eau

Outre la gestion quantitative de la ressource en eau, la question de la gestion qualitative est en général abordée, dans les différentes prospectives. Différents points peuvent être présentés :

- les problèmes de pollution de l'eau (par les engrais, les pesticides ou les déjections animales). Ils sont en général abordés de manière qualitative. Des pistes pour ne pas aggraver voire améliorer la situation sont données dans les études de la FAO et du CAWMA.
- La perte de biodiversité, qui peut être causée soit par une mauvaise qualité de l'eau ou de l'habitat, soit par un manque d'eau lié à une surexploitation humaine. Seul ce second aspect est parfois pris en compte quantitativement (via les débits réservés pour l'environnement).
- Les problèmes de dégradation des sols liés à une mauvaise gestion de l'eau, en particulier la salinisation et l'engorgement. Ces derniers sont évoqués dans toutes les études. La FAO va plus loin en estimant l'expansion nette des terres agricoles irriguées, c'est-à-dire en comptant

les pertes de terres irriguées liées à ces problèmes ou à la rareté de la ressource en eau. Elle estime que tous les ans 2,5% de la surface irriguée doivent être réhabilités ou remplacés.

Ainsi, d'une étude à l'autre, la prise en compte de l'eau est réalisée à un niveau de détail très variable. Les besoins en eau agricole peuvent ou non être quantifiés, les ressources disponibles sont parfois estimées, la question de l'adéquation entre besoins et ressource n'est pas toujours soulevée... L'utilisation d'un modèle permet en général de quantifier plus facilement emplois et usages, et dans certains cas d'assurer l'adéquation entre les deux. Enfin, les questions connexes liées à la gestion de l'eau (pollution, dégradation des sols, perte de biodiversité) et les conséquences des choix politiques et d'investissements sont plus ou moins détaillées selon les études.

o DIFFICULTÉES RENCONTRÉES

Dans la plupart des travaux, il est fait état des problèmes qui ont été rencontrés au cours de la réalisation de l'étude. Les difficultés les plus souvent rencontrées sont présentées ci-dessous.

Manque de données et problèmes de fiabilité

Les plus gros problèmes de données sont liés à l'**irrigation** (surface irriguée pour les différentes productions, efficacité des procédés d'irrigation, rendements des productions irriguées, part de l'eau de surface et de l'eau souterraine...). Les études se réfèrent en général à la base de données AQUASTAT de la FAO. Elle est renseignée directement par les différents pays. Cependant beaucoup de pays en développement n'ont pas les moyens de tenir ces données à jour. Beaucoup de valeurs sont donc manquantes ou dépassées. Il en résulte de fortes différences dans les estimations des surfaces irriguées : selon la FAO, la surface irriguée mondiale en 1999 avoisinait les 265 millions d'hectare (Mha) alors qu'une étude de l'IMWI (réalisée par télédétection et comptant les doubles cultures irriguées) donne pour la même année une surface de 480Mha (Thenkabail et al., 2006; cité dans (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007)). On ne peut donc certifier la robustesse des estimations des besoins en eau d'irrigation. Par ailleurs, les données déjà peu nombreuses sur l'efficacité des procédés d'irrigation et les rendements agricoles des différentes cultures irriguées et pluviales ne sont pas réunies dans une même base de données. Ceci complexifie le travail de collecte des informations, et les estimations de l'évolution de ces paramètres dans les décennies à venir n'en sont que plus difficiles.

Des études supplémentaires sur les pertes de surface irriguée par salinisation ou engorgement des sols seraient les bienvenues (Bruinsman, 2003). Il en est de même d'études sur l'interaction entre eau et élevage et sur l'interaction entre irrigation et aquaculture (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007).

Différentes méthodes pour évaluer la demande en eau

D'autres problèmes, plus liés à la méthodologie, existent également. Il faut tout d'abord bien définir la demande en eau : selon les auteurs ce terme désigne soit l'eau prélevée, soit l'eau effectivement consommée. Ensuite, des différences importantes existent selon le partage entre volume d'eau réutilisée et volume d'eau retournant effectivement au milieu naturel qui est choisi. L'estimation de ce paramètre est très complexe car de nombreux liens existent entre les différents éléments du système, et que certains sont encore mal connus. Il est par exemple difficile d'évaluer l'impact de l'agriculture pluviale et des ouvrages de collecte d'eau de pluie sur le milieu aval : une partie de l'eau va en effet être consommée et ne pourra donc pas s'infiltrer ou ruisseler jusqu'à un cours d'eau.

Outre ces problèmes de données et de méthodologie, un autre obstacle aux prospectives existe. Il s'agit de la prise en compte du changement climatique.

Les problèmes liés à la prise en compte du changement climatique

Les relations entre agriculture et changement climatique sont très étroites (Bruinsman, 2003). L'agriculture, émettrice de gaz à effet de serre (GES) et possible piège à carbone, est un secteur très sensible au changement climatique (événements extrêmes, augmentation des températures, changements de pluviométrie...). Si certaines estimations chiffrées des impacts du changement

climatique sur l'agriculture existent, beaucoup de travaux prospectifs ne le prennent en compte que qualitativement car des difficultés apparaissent lorsqu'il s'agit de passer au quantitatif.

L'une des difficultés principales réside dans l'imprécision des estimations de **pluviométrie**. Une étude comparant dix neuf modèles climatiques pour une même hypothèse de hausse de la concentration de GES a ainsi montré que si tous les modèles donnent des résultats concordants à l'échelle mondiale, ils ne sont pas assez précis pour localiser exactement les zones de convergence (fortes précipitations) et de subsidences (déserts tropicaux). Une différence de 10° en latitude existe entre certains modèles. Il est ainsi délicat de préciser de façon nette la modulation climatique du devenir des ressources en eau dans certaines régions (Afrique subtropicale en particulier), et donc de spécifier l'impact du changement climatique sur les productions agricoles (Marsily De, 2006).

Le problème de l'évolution de **l'étendue des terres potentiellement cultivables** sous l'effet du changement climatique existe aussi (Treyer, 2009). La plupart des études prospectives utilisent les travaux de la FAO et de l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) sur les zones agro-écologiques² (GAEZ) comme base de leurs estimations d'expansion des terres cultivées. Cependant ce travail ne prend actuellement pas en compte les effets du changement climatique.

Les difficultés citées précédemment empêchent en général toute prise en compte quantitative directe des effets du changement climatique dans les travaux de prospective agricole et alimentaire. Cependant certains exercices ciblés sur ce point commencent à paraître. Ils présentent de **nouvelles pistes** pour intégrer cette problématique dans les futures prospectives agricoles. L'IFPRI a ainsi publié en 2009 le résultat d'un exercice dont le but était d'estimer les effets du changement climatique sur la production, la consommation et les échanges commerciaux des produits agricoles et sur la sécurité alimentaire. Il utilise un modèle de projection de l'offre et de la demande agricole (IMPACT WATER) et un modèle biophysique de croissance des cultures selon le climat et isole les effets du changement climatique des effets dus aux autres paramètres. Pour une hypothèse de concentration de GES, deux modèles numériques différents de simulation du climat futur sont utilisés. **L'utilisation de plusieurs modèles** est intéressante, elle permet de mieux mettre en évidence l'incertitude liée à leur usage. Les impacts sur les rendements agricoles (agriculture pluviale et irriguée), sur la ressource en eau renouvelable et sur les besoins en eau des cultures sont entre autres estimés. Les résultats de l'étude sur ces derniers points sont présentés en Annexe 2. Ces évaluations sont intéressantes pour les travaux de prospective sur l'agriculture et l'alimentation. Cette méthode pourrait donc être reprise dans de futurs exercices.

Cette partie présentait les différents points clés relatifs aux études prospectives sur l'agriculture et l'alimentation. Après un point sur les différences méthodologiques qui existent entre les études, la question de l'évaluation de l'équilibre entre offre et demande en biens alimentaires dans les travaux a été abordée. Si cette évaluation est toujours faite, nous avons pu voir qu'il n'en était pas de même de l'estimation de l'équilibre entre ressources et usages en eau agricole, et encore moins des problèmes connexes liés à la gestion de l'eau (pollution, dégradation des sols irrigués...). Enfin, les difficultés rencontrées dans les différentes études ont été exposées.

Dans la partie suivante, trois études seront présentées plus en détail. Le choix s'est porté sur l'étude Water for Food Water for Life, sur World water and food to 2025 et sur l'exercice d'anticipation de la FAO. En effet c'est dans ces études que la question de l'eau est la plus détaillée.

² GAEZ (Global Agro-Ecological Zones). Ce travail prend en compte le climat, la topographie et les techniques de culture actuelles pour déterminer le potentiel d'une terre pour l'agriculture (rendement potentiel atteignable). Le résultat est un classement en cinq catégories, des terres très aptes à être cultivées aux terres inadaptées.

POUR ALLER PLUS LOIN : ETUDE APPROFONDIE DE CERTAINS TRAVAUX

Dans cette partie, trois différentes études prospectives seront présentées plus en détail. L'accent sera mis sur la prise en compte de l'eau dans ces travaux et l'évaluation de l'offre et de la demande en biens alimentaires sera laissée de côté. Les différences entre ces études et les points forts et faibles de chacune seront mis en évidence.

o WORLD AGRICULTURE : TOWARDS 2015/2030 : SIMPLE MAIS EFFICACE

Présentation générale

Cette étude est un exercice d'anticipation. Il ne présente qu'un seul scénario: celui du futur le plus probable (qui intègre des ruptures de tendance). L'analyse est ciblée sur la question de la satisfaction des besoins alimentaires à l'échelle mondiale d'ici 2030 et sur l'impact sur les ressources naturelles de la nécessaire augmentation de la production agricole.

L'année 1997-99 (valeurs de chaque paramètre moyennées sur trois ans) est prise comme base et 2030 comme horizon. L'étude porte sur 140 pays (étudiés un à un) et 32 biens alimentaires.

Le niveau moyen de consommation alimentaire atteint en 2030 est de 2980 kcal/jour/per. Cependant des disparités demeurent : 6% de la population mondiale (443 millions) souffre encore de malnutrition.

Méthodologie de la prise en compte de l'eau

Les trois quarts de la surface irriguée étant situés dans les pays en développement (PED), la FAO a choisi se concentrer sur cette partie du monde, en approfondissant la thématique eau sur 93 PED.

Sur ce territoire, l'expansion de la surface irriguée est estimée à partir des plans d'expansion d'irrigation connus, du potentiel d'expansion des surfaces irriguées et des besoins d'augmentation de production pour chaque culture. Les besoins en eau d'irrigation sont ensuite évalués pays par pays pour 2030. Les hypothèses d'évolution de l'efficacité des systèmes d'irrigation (eau consommée/eau prélevée) formulées permettent d'estimer les prélèvements d'eau pour l'irrigation en 2030.

La pression sur les ressources en eau est évaluée via le ratio des prélèvements sur les ressources renouvelables. La situation est préoccupante quand il dépasse 20% et critique quand il dépasse 40%.

Résultats (pour les 93 PED)

L'étude prédit une expansion de la surface irriguée (Tableau 1), particulièrement marquée dans les régions où les terres agricoles se font rares. Il s'agit d'expansion nette (les pertes de surfaces irriguées liées à la dégradation des sols ou au manque d'eau sont prises en compte). L'aménagement total en irrigation sur la période étudiée concerne en réalité 200 Mha, et non 40 Mha, la différence correspondant à des travaux de réhabilitation ou de substitution. De plus, la culture irriguée s'intensifie (multiplication des récoltes, jachères courtes) comme le montre l'expansion de terres récoltées.

Les prélèvements d'eau augmentent lentement par rapport à la croissance de surface irriguée récoltée observée. Ceci est en partie dû à l'amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation, qui est plus marquée dans les pays où l'eau est rare.

Le nombre de pays (parmi les 93 pays étudiés) gérant l'eau de façon préoccupante ou critique passe de 18 en 1997-99 à 20 en 2030. Cependant certaines difficultés régionales se sont accentuées.

	1997/99	2030
Surface irriguée (cultivée/récoltée)	202 Mha / 257 Mha	242 Mha (+20%) / 341 Mha (+33%)
Part de la surface cultivée totale	21 %	22%
Contribution de l'irrigation à la production totale	40%	47%
Prélèvements d'eau pour l'irrigation	2128 km ³ /an	2420 km ³ /an (+14%)
Efficacité des systèmes d'irrigation (%)	38% (De 25% en Amérique Latine à 44% en Asie du Sud Est)	42% (De 25% en Amérique Latine à 53% en Afrique du Nord)

Tableau 1: évolution de l'irrigation et des besoins en eau agricole dans la perspective de la FAO (93 PED)

Limites

L'étude de la thématique eau se limite à 93 PED et la réflexion est menée à l'échelle du pays et non à l'échelle du bassin, plus adaptée à une étude de la ressource. Par ailleurs, de nombreux points ne sont pas chiffrés (problèmes de pollution et de surexploitation des aquifères et leurs impacts sur la production alimentaire, besoins en eau non-agricoles...) et le changement climatique n'est pas pris en compte dans le scénario présenté. Cependant un chapitre entier (ch13), comprenant quelques évaluations chiffrées, est dédié à ce sujet. Il indique que si les impacts sur la production agricole mondiale devraient rester limités d'ici 2030, des différences importantes sont à prévoir entre les différentes régions. Ainsi l'évolution des rendements céréaliers d'ici 2020 serait de -0,5% en moyenne sur la planète, mais pourrait atteindre plus ou moins 2,5% selon les régions.

o WORLD WATER AND FOOD TO 2025 : SCENARIOS PROSPECTIFS ET ANALYSE D'INTERACTIONS PARTICULIERES

Présentation générale

Cette étude prospective analyse plus spécifiquement le lien entre disponibilité de l'eau et production agricole. Elle est à mi-chemin entre la méthode des scénarios et celle du modèle. En effet pour chaque scénario, l'analyse qualitative effectuée dans un premier temps permet d'évaluer les valeurs de certaines variables. Elles sont entrées dans le modèle Impact Water qui quantifie les hypothèses. L'étude porte sur la période 1995-2025 et est réalisée à l'échelle mondiale sur 16 biens alimentaires.

Trois scénarios illustrant des futurs possibles sont présentés. Business As Usual (BAU) est un scénario tendanciel. Water Crisis (CRI), sa variante pessimiste, présente le cas où les politiques concernant l'eau et l'alimentation empireraient. Sustainable Water Use (SUS) présente un futur plus positif (gros débits réservés, accès à l'eau pour tous, production agricole équivalente à BAU).

Une dizaine d'autres scénarios examinent les effets de choix politiques particuliers (prix de l'eau, investissement dans l'irrigation, politique pro-environnementale) sur la production agricole et sur l'équilibre entre besoins en eau humains et environnementaux.

Résultats (Tableau 2)

L'accent est mis sur l'étude de l'impact de la disponibilité de l'eau sur la production alimentaire pour différents choix de politiques et d'investissements. Les indicateurs suivant ont été développés :

- L'indice de fiabilité de l'offre en eau d'irrigation (IFOI), qui compare les consommations réelles et potentielles (volume nécessaire pour satisfaire les besoins des plantes) en eau d'irrigation.
- Le ratio de criticité : ratio des prélèvements sur les ressources renouvelables.

Dans le scénario BAU, les demandes en eau pour tous les usages augmentent. Cependant la ressource se fait rare et la demande globale en eau d'irrigation peut de moins en moins être satisfaite (déclin des IFOI), d'où un ralentissement de croissance des rendements.

Le commerce devient nécessaire pour approvisionner de nombreux PED en biens alimentaires (surtout en Asie). Il permet de plus d'économiser de l'eau et des terres. Cette situation aggrave pourtant les problèmes de sécurité alimentaire de nombreux pays (surtout en Afrique subsaharienne) puisque le niveau de croissance économique est souvent insuffisant pour financer les imports.

	1995	BAU	CRI	SUS
Prélèvements totaux (km ³)	3096	4772 (+22%/95)	5231 (+10%/BAU)	3743 (- 22% /BAU)
Consommation pour l'irrigation (km ³)	1436	1492 (+3,9%)	1745	1196
Surface céréalière irriguée (Mha)	213	238	221	231
Surface céréalière pluviale (Mha)	474	514	504	506
Production de céréales: irriguée		Base	-11%	-5%
Pluviale			-9%	+5%
Totale			-10%	+1%
IFOI: Monde		0,78	0,67	0,69
Pays en développement		0,75	0,65	0,73

Tableau 2: Principaux résultats des scénarios BAU, CRI et SUS de World Water and Food to 2025

Dans CRI, la forte augmentation des prélèvements ne contrebalance pas la chute d'efficacité des divers usages de l'eau. Les IFOI diminuent donc. A l'inverse dans SUS, l'augmentation des prix de l'eau limite les prélèvements dans tous les secteurs et pousse à améliorer l'efficacité de bassin. Ceci compense en partie la chute de la consommation en eau d'irrigation et limite la décroissance des IFOI.

Dans CRI, la production de céréales décroît de 10% à l'échelle mondiale (chute des surfaces récoltées et des rendements), alors que dans SUS la hausse de production pluviale contrebalance la chute de production irriguée. Les prix agricoles augmentent dramatiquement dans CRI. On observe donc un regain des problèmes de sécurité alimentaire (la consommation alimentaire par personne passe sous les niveaux de 1995). De plus, la part de la population ayant accès à l'eau diminue. Les problèmes sanitaires risquent donc de se multiplier. Dans SUS, les prix agricoles et la consommation alimentaire sont proches des niveaux de BAU.

Points forts et limites de cette étude

Cette étude est une des premières à quantifier plus précisément les demandes en eau agricole en prenant en compte les effets de la rareté de la ressource en eau sur les surfaces et les rendements agricoles. La ressource disponible pour l'irrigation est également mieux évaluée puisque les besoins des autres secteurs d'activité humaine et les besoins environnementaux sont introduits. Ce degré de précision permet d'étudier les impacts de choix politiques et de choix d'investissements particuliers sur la préservation de la ressource en eau et sur la production alimentaire.

En revanche, les problèmes qualitatifs liés à la gestion de l'eau sont à peine abordés. Par ailleurs, si le programme permet de travailler sur n'importe quelle série climatique, le changement climatique n'a pas été pris en compte dans l'étude. Enfin, les scénarios développés ne tentent pas de répondre à la demande alimentaire mondiale pour assurer la sécurité alimentaire de tous.

o WATER FOR FOOD WATER FOR LIFE : DIFFERENTES PISTES POUR REPONDRE AUX BESOINS ALIMENTAIRES

Présentation générale

Cette étude est ciblée sur la gestion de l'eau agricole vis-à-vis d'objectifs de satisfaction des besoins alimentaires en 2050. La démarche adoptée mêle l'utilisation du modèle WATERSIM à des réflexions qualitatives qui assurent la prise en compte des dimensions environnementales et sociales (pauvreté, équité, etc.). L'étude couvre la période 2000 - 2050, s'intéresse à 32 biens alimentaires et considère la planète entière, divisée en bassins.

Quatre scénarios, permettant de répondre aux besoins alimentaires de la planète en 2050 (le niveau de consommation alimentaire moyen retenu est de 2970kcal/jr/hab), et reposants sur différents choix de politique et d'investissements sont développés.

- L'un joue sur l'amélioration de la productivité de l'agriculture pluviale (P). Deux variantes reposant sur différentes hypothèses de hausse de productivité sont présentées (une pessimiste (PPes) et une optimiste (POpt)).
- Un autre joue sur l'augmentation de la production de la surface irriguée (Irr). Selon les variantes, cette augmentation est due à la croissance de la surface irriguée (SIrr) ou à une amélioration des performances des systèmes d'irrigation (PIrr).
- Un scénario imagine une hausse des échanges commerciaux (COM) pour satisfaire les besoins alimentaires en limitant les prélèvements d'eau à usage agricole. Il s'agit de minimiser l'eau virtuelle à l'échelle mondiale.
- Enfin, le scénario du Comprehensive Assessment (CA) combine ces différentes stratégies en prenant en compte les forces et les faiblesses des différentes régions.

Résultats

Les effets de chaque scénario sur les volumes prélevés et l'expansion des surfaces irriguées sont très différents (Tableau 3). Dans tous les cas les volumes prélevés pour l'irrigation augmentent mais cette hausse peut varier de 5% (dans COM) à 57% (dans SIrr).

	2000	Agriculture pluviale		Agriculture irriguée		COM	CA
		POpt	PPes	SIrr	PIrr		
Surface irriguée (Mha)	340	340	340	450	370	340	394
Surface pluviale (Mha)	860	920	1320	1100	1140	1040	920
Productivité de l'eau en irrigation (kg/m ³)	0.68	0.84	0.83	0.83	0.97	0.83	0.93
Croissance (%)		24	22	22	43	22	38
Productivité de l'eau en pluviale (kg/m ³)	0.49	0.66	0.54	0.54	0.55	0.62	0.64
Croissance (%)		35	10	10	11	33	31
Prélèvement pr irrigation (km ³)	2630	3155	3160	4120	3460	2760	2975
Croissance (%)		40	40	57	32	5	13
Consommation d'eau de pluie des plantes (km ³)	5560	7415	9040	8080	7880	7260	6570

Tableau 3: principaux résultats des différents scénarios de l'étude Water for Food Water for Life

Points forts et limites de l'étude

Cette étude est la seule étude sur la gestion de l'eau agricole vis-à-vis d'objectif de satisfaction des besoins alimentaires mondiaux existant à l'heure actuelle. Elle est utilisée comme référence par certains programmes d'action tels que le Challenge Program on Water and Food, qui s'en sert à la fois comme guide stratégique pour voir quelles actions peuvent être entreprises et pour l'évaluation de ses actions en comparant ses résultats aux projections des différents scénarios.

Cependant certaines limites demeurent (Vidal, 2009). Ainsi l'étude porte principalement sur les cultures alors que des actions peuvent être menées dans les domaines de l'élevage et de la pisciculture (systèmes mixtes culture élevage ou culture pisciculture). De même, les effets du changement climatique ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Trois études et leurs principaux résultats ont été présentés dans cette partie. Les limites et les possibilités offertes par chacun de ces travaux ont été développées. Dans la partie suivante, les résultats clés seront mis en évidence. Nous chercherons en particulier à savoir s'il y aura assez d'eau dans le futur pour nourrir la planète, de quelle manière ces besoins sont satisfaits et quel niveau de consommation alimentaire est atteint. Les points de débats existant entre les différentes perspectives seront listés, et certaines pistes de réflexion pour des travaux à venir seront proposées.

RESULTATS ET DISCUSSION

La première partie a mis en évidence les différences concernant la démarche choisie, les données utilisées et les objectifs visés qui existent entre les études. La principale différence que nous pouvons retenir concerne la satisfaction des besoins alimentaires à l'horizon temporel de l'étude considérée. Seule l'étude du CAWMA la garantit. Dans les études de la FAO et de Rosegrant, elle ne figure pas à la liste des objectifs et n'est pas forcément assurée. Notons également que l'horizon temporel retenu n'est pas le même d'une étude à l'autre.

Les résultats des trois études détaillées dans la partie précédente sont rassemblés en annexe 3. Les différences entre les perspectives interdisent toute comparaison poussée des résultats. Certains résultats clés doivent tout de même être rappelés. Ainsi, selon Water for Food Water for Life, il est possible de satisfaire les besoins alimentaires mondiaux en 2050. Des pistes variées sont proposées pour y parvenir. Celles qui sont retenues dans le scénario CA sont intéressantes. En effet ce scénario privilégie l'augmentation de la productivité de l'eau pour l'agriculture pluviale et irriguée, ce qui permet de limiter la croissance de la surface cultivée et la mobilisation d'eau agricole (verte comme bleue). Cependant, la satisfaction des besoins alimentaires ne sera pas simple. L'étude World Water and Food to 2025 montre ainsi que de mauvais choix politiques dans les domaines de l'eau et de l'agriculture peuvent aboutir à une pression accrue sur les ressources en eau et à un regain des problèmes de sécurité alimentaire (scénario CRI).

Toutefois tous ces résultats sont teintés d'incertitude. En effet, certaines hypothèses font débat et on peut relever certaines limites qui devront être prises en compte dans les prochaines perspectives.

Le premier point de débat concerne le **niveau de consommation alimentaire** retenu. Celui-ci peut être un objectif (CAWMA, Agrimonde) ou le résultat de l'évolution d'autres paramètres (FAO, Rosegrant). Si les niveaux moyens atteints sont du même ordre de grandeur (autour de 3000 kcal/jr/per en 2050), les valeurs par pays et le nombre de personnes malnutries varient beaucoup. Le choix de ce paramètre influence fortement les scénarios. Il faut donc imaginer quels progrès peuvent être faits dans ce domaine et comment ils peuvent être induits afin de choisir une valeur plausible.

Le choix de l'**échelle d'analyse et de modélisation** est également crucial dans des études prospectives réalisées pour de grands ensembles géographiques. Une des critiques récurrentes du travail de Rosegrant rappelle ainsi que cette étude analyse les effets de décisions politiques prises dans le domaine de l'eau à l'échelle mondiale, souvent au détriment d'observations locales qui sont pourtant clé pour des régions entières (Vidal, 2009). Ainsi la hausse des prix de l'eau risque de conduire à l'arrêt des cultures pour les agriculteurs les plus pauvres, mais ce point n'est que peu développé. De même le choix de l'échelle restreint le choix des paramètres influençant le système : des facteurs clés tels que le type de gouvernance nationale (qui joue beaucoup dans certains pays en développement) et les valeurs portées par les sociétés ont par exemple été écartés par Rosegrant (Borron et al., 2008).

Le projet paneuropéen SCENES, qui doit établir des scénarios prospectifs sur la gestion des ressources en eau continentale, teste actuellement une approche novatrice qui consiste à mener en parallèle des réflexions à différentes échelles. A l'échelle paneuropéenne, quatre scénarios qualitatifs sont définis puis quantifiés. L'Europe et les pays voisins sont par ailleurs divisés en quatre grandes régions. Pour chacune, des bassins versants jugés représentatifs sont analysés en détail. Un travail est réalisé avec les acteurs locaux pour définir et approfondir le scénario qui leur semble le plus parlant pour leur territoire. L'idée est de développer une vision locale, afin que chacun puisse se retrouver dans les scénarios qui seront finalement présentés. Cependant le lien entre les deux échelles de travail est dur à réaliser (Rieu, 2010). La question primordiale est de savoir si l'on peut réellement considérer qu'une somme de bassins versants est représentative d'une région. Viennent ensuite les difficultés liées aux différences entre bassins ou régions : certains sont principalement confrontés à des problèmes d'étiage et d'autres à des inondations, certains privilégient le bon état écologique et d'autres les solutions aux problèmes quantitatifs, même les processus biophysiques qui entrent en jeu varient d'un bassin à l'autre. Dès lors, comment construire un modèle valable à l'échelle de l'Europe entière? Comment rédiger des scénarios intéressants pour tous? Ces enjeux se retrouvent bien entendu dans toutes les prospectives réalisées à l'échelle mondiale.

On voit ainsi que le choix de l'échelle de travail est difficile à faire. Une attention particulière doit cependant lui être accordée car il a des effets non négligeables sur les résultats obtenus. La solution qui sera finalement retenue pour faire le lien entre les différentes échelles de travail dans le cadre de SCENES méritera d'être analysée. Il pourra en effet s'agir d'une piste pour aider au choix de l'échelle de travail dans de futures prospectives mondiales.

Par ailleurs, les effets du **changement climatique** sur l'agriculture et les ressources en eau doivent être pris en compte. Compte tenu de l'imprécision des modèles climatiques actuels, il est intéressant d'en utiliser plusieurs (comme dans (Nelson, 2009)) pour obtenir une fourchette de résultats, plus significative qu'un résultat unique. De même, de nouveaux GAEZ tenant compte du changement climatique devraient paraître. Ils fourniront une meilleure base de travail que les anciens.

De plus, il est nécessaire de tenir compte de la **résilience des socio-écosystèmes** aux changements climatique, économique et politique, et en particulier de la résilience des populations les plus pauvres. En effet, les trois quarts du milliard de personnes souffrant aujourd'hui de la faim dans le monde vivent en zone rurale et dépendent de l'agriculture. Leur résilience au changement (prix agricoles, prix de l'eau...) est très faible et les départs à la ville sont nombreux. Des études sur les pistes qui peuvent exister pour augmenter la résilience des communautés produisant les biens alimentaires et la résilience des écosystèmes qui les supportent doivent être menées.

Enfin, les **problèmes qualitatifs** (qu'ils concernent les masses d'eau ou les terres) doivent également être chiffrés. Ils ont en effet des impacts non négligeables sur les rendements agricoles et sur la santé des populations. On pourra s'appuyer sur le modèle WATERGAP utilisé dans SCENES au sein duquel volet qualitatif est actuellement en cours de développement (Rieu, 2010).

BIBLIOGRAPHIE

- Borron L., Hajri M. et Labbouz B., 2008. *Bilan des travaux de prospective sur l'eau et ses usages en Afrique de l'Ouest*. Mémoire de Travaux par Groupe d'Elèves, AgroParisTech ENGREF, Paris ; CEDEAO (Communauté Économique Des États d'Afrique de l'Ouest), Abuja (Nigeria), 126 p.
- Bruinsman J. (Ed.), 2003. *World Agriculture: towards 2015/2030 - An FAO perspective*. London, Earthscan Publications Ltd, 432 p.
- CIRAD et INRA (Ed.), 2009. *Agrimonde Agricultures et alimentations du monde en 2050: scénarios et défis pour un développement durable - Note de Synthèse*. Paris, CIRAD, INRA, 32 p. Disponible sur internet : <http://www.cirad.fr/en/actualite/communiqu.php?id=1102>, [consulté le 18/10/2009].
- Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (Ed.), 2007. *Water for food, Water for life: A Comprehensive Assessment for Water Management in Agriculture*. Colombo, IWMI (International Water Management Institute) ; London, Earthscan Publications Ltd, 645 p.
- Finnish Environment Institute, [mis à jour le 12/04/2009]. *SCENES : Water Scenarios for Europe and for Neighbouring States*. Helsinki, Finnish Environment Institute. Disponible sur Internet : <http://www.environment.fi/default.asp?contentid=342422&lan=EN>, [consulté le 14/12/2009].
- Fraiture C. De, 2005. *WATERSIM*. Colombo, IWMI, 26 p. Disponible sur internet : http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files_new/research_projects/ICID_WATERSIM.pdf, [consulté le 14/11/2009].
- IWMI, 2004. *The Global PODIUM - Interactive water & food security planning scenario tool*. Colombo, IWMI. Disponible sur internet : <http://podium.iwmi.org/podium/>, [consulté le 15/11/2009].
- Jouvenel H. De, 1999. *La Démarche Prospective - Un bref guide méthodologique*. Paris, Futuribles. Disponible sur internet : http://www.podepro.prd.uth.gr/programme/materiel/concept/La_demarche_prospective.pdf, [consulté le 15/11/2009].
- Marsily G. De, 2006. *Les Eaux Continentales*. Paris, Edp Sciences, 328 p.
- Nelson G.C., 2009. *Food Policy Report: Climate Change- Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*. Washington D.C., International Food Policy Research Institute, 19 p.
- Rieu T., 2010. UMR G-EAU (Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages), AgroParisTech. Montpellier. Entretien le 12/01/2010.
- Rosegrant M.W., Cai X. et Cline S.A., 2002. *World water and food to 2025 - Dealing with scarcity*. Washington D.C., International Food Policy Research Institute, 322 p.
- Rosegrant M.W., Ringler C. et Msangi S., 2008. *International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model Description*. Washington D.C., IFPRI (International Food Policy Research Institute), 42 p. Disponible sur internet : <http://www.ifpri.org/sites/default/files/IMPACTwater.pdf>, [consulté le 14/11/2009].
- Treyer S., 2009. Coordonateur de l'étude Agrimonde, AgroParisTech Engref. Paris. Entretien le 27/10/2009.
- Vidal A., 2009. Directeur du Challenge Program on Water and Food. Colombo. Entretien le 30/11/2009.
- World Summit on Food Security, 2009. *Sommet mondial sur la sécurité alimentaire - Nourrir le monde, éliminer la faim*. Rome, FAO, 21 p. Disponible sur internet : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/Meeting/018/k6077f.pdf>, [consulté le 14/12/2009].

ANNEXE 1 : différentes données et principaux paramètres pris en compte dans les études

	World Water and Food to 2025 (Rosegrant et al. 2002)	FAO (Bruinsman, 2003)	Water for food water for life (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007)	Agrimonde (CIRAD et INRA, 2009)
Données démographiques	UN 1999 (the 1998 revision) Medium variant 2025 : 7,9 milliards 2050 : 8,9 milliards	UN 2001 (the 2000 revision), Medium variant 2030 : 8,3 milliards 2050 : 9,3 milliards	UN 2003 (the 2002 revision) Medium variant 2030: 8,1 milliards 2050 : 8,9 milliards	UN 2007 (the 2006 revision), Medium variant 2030 : 8,3 milliards 2050 : 9,2 milliards
Revenu	Estimation propre pour 2025 : PIB/hab Max : 76460\$ au Japon Min : 140\$ en Afrique Sub-saharienne. (croissance la plus faible : 0,8%)	World Bank 2001 Croissance du PIB/hab de 1997-99 à 2030 : 2,6% (entre 2,0% pour l'Afrique Sub-Saharienne et 5,5% pour l'Asie du Sud Est)	Prédiction de revenu du MEA, scenario techno garden pour 2050 (PIB/hab) Moyenne de 18000\$. De 3000\$ en Afrique à 74000\$ pour l'OCDE.	Paramètre non utilisé.
Consommation alimentaire	Estimé par le modèle : Consommation de céréales/hab en kg/an : 1995 : 314 (de 47 Amérique latine à 549 OCDE) 2005 pour BAU: 330 (de 58 Amérique Lat. à 623 OCDE)	Estimation propre pour 2030: Moyenne : 3050 kcal/per/jour Min : 2540 en Afrique Sub-saharienne Max : 3500 dans les pays industrialisés	Estimé par le modèle pour 2050: Moyenne mondiale de 2970 kcal/per/jr. Autres valeurs non renseignées.	Scénario agrimonde GO : utilise les chiffres du scénario GO du MEA. (moyenne mondiale de 3590kcal/jr/pers en 2050) Scénario Agrimonde 1 : consommation universelle de 3000kcal/jr/pers en 2050
Usage de l'eau : Eau d'irrigation (prélèvement) Autres usages de l'eau	Quantifié 4772 km ³ (2025) Quantifiés	Quantifié pour les PED 2420 km ³ (2030, PED) Non quantifiés	Quantifié 2975km ³ (2050,scenario CA) Quantifié mais non renseigné	Non quantifié
Adéquation ressource/usage	Assurée par les règles de répartition. Indicateurs globaux et par secteurs.	Ratio de criticité pour 93 PED	Assurée par les règles de répartition. Pas d'indicateurs	Pas pris en compte
Prise en compte du changement climatique	NON mais le modèle le permettrait	Pas dans le scénario mais chapitre dédié	NON	OUI

ANNEXE 2 : quelques résultats chiffrés de l'étude sur les impacts du changement climatique réalisée par l'IFPRI (Nelson, 2009)

	Sans CC	Scénario basé sur le modèle NCAR		Scénario basé sur le modèle CSIRO	
		Avec	Sans	Avec	Sans
Effet fertilisant du CO ₂					
Effet du CC sur les rendements agricoles : (en % par rapport aux prévisions sans CC)					
Maïs irrigué (PED/ Pays développés)		-2,1 / -8,6	-2,8 / -8,7	2,4 / 10,5	-2,0 / -1,2
Maïs pluvial		-0,4 / 2,5	-2,0 / -5,7	6,6 / 23,9	1,4 / 0,6
Blé irrigué		- 27,2 / 0,0	-34,3 / -4,9	- 20,8 / -1,3	-28,3 / -5,7
Blé pluvial		8,6 / 9,5	- 1,1 / 2,4	9,4 / 9,7	-1,4 / 3,1
Eau renouvelable		Hausse sur toute la planète		Hausse moindre et baisse de 4% au Moyen Orient, et en Afrique du Nord et Sub-Saharienne	
Indice de fiabilité de l'offre en eau d'irrigation (IFOI) (eau consommée/ besoin de la plante) (par rapport aux prévisions sans CC)		L'IFOI s'améliore en moyenne dans les PED (la hausse des précipitations compense les besoins hydriques accrus par la hausse de température)		L'IFOI diminue en moyenne dans les PED : la hausse des précipitations n'est pas toujours suffisante.	
Apport Alimentaire journalier (kcal/jr/pers)					
Pays en développement	2886	2632	2410	2571	2432
Pays développés	3645	3263	3190	3295	3215

Notons que l'effet fertilisant du CO₂ a un impact très important sur les résultats : alors que les rendements de quasiment toutes les cultures chutent lorsqu'il n'est pas pris en compte, on observe des chutes moins sévères voire des augmentations de rendement lorsqu'il est pris en compte.

Notons également que si les tendances globales sont les mêmes (les Pays en développement sont plus sévèrement touchés que les Pays développés qui voient même parfois leurs rendements augmenter), des différences importantes dans les estimations des deux scénarios existent. L'utilisation de plusieurs modèles peut permettre d'obtenir une fourchette de résultats, ce qui est plus significatif qu'une valeur seule compte tenu de la précision des modèles actuels.

Les estimations chiffrées du volume d'eau renouvelable disponible pour chaque scénario et de l'indice de fiabilité de l'offre en eau d'irrigation ne sont pas disponibles dans le rapport. Les tendances indiquées, et la capacité du modèle IMPACT WATER à les évaluer, laissent pourtant penser qu'ils ont été calculés.

ANNEXE 3 : Tableau récapitulatif des résultats des trois prospectives analysées plus en détail

	World Water and food to 2025			FAO perspective : 2030	Water for food, water for life : 2050					
	BAU	CRI	SUS		Scénario pluvial		Scénario irrigation		Scénario Commerce	Scénario CAWMA
					optimiste	pessimiste	expansion	rendement		
Démographie (milliard d'habitants)	2025: 7,9 2050: 8,9			2030: 8,3 2050: 9,3	2050: 8,9					
Consommation Alimentaire	330kg cereal /per/year	298kg cereal /per/year	332kg cereal /per/year	3050 kcal/jr/per	2970 kcal/jr/per					
Production de céréales (millions de tonnes/an)	2614 (céréales)	2365 (céréales)	2632 (céréales)	2838 (céréales)	2980 (céréales)					
Eau										
Consommation totale (km^3)	2081	2342	1673	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Prélèvements totaux (km^3)	4772	5231	3743	n.r.	5118	5123	6083	5423	4723	4938
Eau Agricole :										
Pluvial :										
Surface (million ha)	514 (céréales)	504 (céréales)	506 (céréales)	834 (PED, toute culture)	920	1320	1100	1140	1040	920
Consommation (km^3)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	7415	9040	8080	7880	7260	6570
Productivité de l'eau (kg/m^3)	Céréales sauf riz PED: 0,57 PI: 1,52	n.r.	n.r.	n.r.	0,66	0,54	0,54	0,55	0,62	0,64
Irrigation :										
Surface (million ha)	238 (céréales)	221 (céréales)	231 (céréales)	242 (PED)	340	340	450	370	340	394
Consommation (km^3)	1492	1745	1196	1016 (PED)	1870	1870	2420	2255	1650	1945
Prélèvement (km^3)	n.r.	n.r.	n.r.	2420 (PED)	3155	3160	4120	3460	2760	2975
IFOI	0.78	0.67	0.73	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Efficacité de l'irrigation (%)	61 (BE ³)	44 (BE)	70 (BE)	42 (de 25 à 53)	59	59	59	65	60	65
Productivité de l'eau (kg/m^3)	Céréales sauf riz PED : 0,93 PI : 1,33	n.r.	n.r.	n.r.	0,84	0,83	0,83	0,97	0,83	0,93

³ Il s'agit ici de l'efficacité de bassin c'est à dire l'efficacité de l'eau estimée à l'échelle du bassin. Elle diffère du simple rapport consommation sur prélèvement car les éventuelles réutilisations sont prises en compte, d'où les valeurs plus élevées que dans les autres études.

	World Water and food to 2025			FAO perspective : 2030	Water for food, water for life : 2050				
					Scénario pluvial		Scénario irrigation		Scénario Commerce
	BAU	CRI	SUS		optimiste	pessimiste	expansion	rendement	
Autres usages de l'eau				non quantifié					
Industrie (km^3)	240 (Conso)	320 (Conso)	155 (Conso)		617 (prélèvement)				
Domestique (km^3)	290 (Conso)	223 (Conso)	265 (Conso)		681 (prélèvement)				
Fiabilité de la ressource pour ces secteurs	0.98	0.95	1.00		n.r				
Indice de criticité	>0,2 dans 15 régions/ 36			>0,2 dans 20 pays sur 93			2,6 milliards de personne (soit 28% de la population mondiale) vivent dans des zones où l'eau est rare		

n.r. : non renseigné