

Modélisation économique de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau: cas du bassin de Souss-Massa (Maroc)

FOUAD ELAME*, MOHAMMED RACHID DOUKKALI**, AZIZ FADLAOUI***

Jel codes: C61, Q15, Q54

1. Introduction

Les questions reliées à l'aléa climatique et la gestion de l'eau d'irrigation continuent à revêtir une importance majeure compte tenu de leurs impacts sur le milieu rural, en général, et l'allocation des ressources en eau, en particulier. Les statistiques récentes montrent une nette tendance à la baisse des disponibilités globales et par habitant en eau. En plus des sécheresses récurrentes qu'a connues le Maroc au cours des trois dernières décennies, cette tendance s'est accentuée par une demande sans cesse croissante, notamment sous l'effet de la pression démographique et du développement socio-économique.

Au Maroc, les ressources en eau souterraine demeurent surexploitées. La plupart des nappes connaissent une baisse sans précédent, particulièrement dans la région du Souss-Massa qui est marquée par des déficits hydriques aigus, expliqués par le développement de l'agriculture, du tourisme, de la pression démographique, et qui est surtout une des zones les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques.

L'agriculture constitue l'un des secteurs déterminants de l'économie nationale. Elle emploie plus de 40 % de la po-

Résumé

Au cours des vingt dernières années, le Maroc a souffert d'un déficit permanent en eau, dû essentiellement à des conditions climatiques très irrégulières et une demande croissante en eau. Cette faiblesse des disponibilités hydriques, aggravée par les changements climatiques, peut entraver l'essor économique du pays et compromettre les perspectives de croissance de nombreux secteurs de l'économie. Le présent article propose un outil de modélisation et d'aide à la décision et utilise la programmation mathématique positive pour sa calibration. En simulant l'impact des changements climatiques, les résultats montrent que les ressources en eau au niveau d'un bassin sont substituables et toute politique de gestion de l'eau doit intégrer à la fois les ressources en eau de surface et souterraine. En situation de sécheresse, le prix économique de l'eau devient si élevé (15 Dh/m³) que la politique de tarification de l'eau reste insuffisante pour une rationalisation de l'utilisation et une préservation de la ressource à long terme.

Mots-clés: eau, changements climatiques, modèle dynamique économique, impact, agriculture.

Abstract

During the past past twenty years, Morocco has suffered a permanent water deficit, mainly due to very irregular climate conditions and an increasing water demand. This low wWater shortageavailability, worsened compounded by climate change, may hinder the country's economic growth and undermine the growth prospects of many sectors branches of the economy. Consequently, Accordingly, the aim of this present study is to develop aproposes a tool of modeling and decision -making support tool. The proposed approach is based on positive mathematical programming for its calibration. By simulating Usinthe impact of g climate change impact scenarios, the study results of this study show that the basin's water resources are substitutable and that a sound water management policy has cannot ignore this aspect and should to integrate both surface and groundwater resources at the same time. In case of drought conditions, the water marginal value or 'shadow price' increases so much considerably (15dh/m³) such that water pricing policy alone cannot provide for result in a rational and a sustainable durable use of the resource.

Keywords: water, climate change, dynamic economic model, impact, agriculture.

pulation active et assure, à elle seule, 80% de l'emploi de la population rurale. Le secteur agricole représente 10% des exportations globales et participe à la formation d'environ 15% du Produit Intérieur Brut (MAPM 2012)¹. Notons que l'agriculture est connue pour être le secteur le plus touché par les aléas environnementaux en raison de sa dépendance des facteurs climatiques. La vulnérabilité de l'agriculture vis-à-vis de la rareté de l'eau s'explique par sa forte consommation en eau (plus de 80% des ressources mobilisées selon la Banque Mondiale, 2010), d'où la nécessité d'une réflexion sur les outils et instruments d'évaluation les mieux adaptés au contexte actuel et d'orientation des politiques vers une meilleure gestion de l'eau.

Pour mieux évaluer

l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau et sa gestion, plusieurs recherches et études ont été entreprises. On cite, parmi d'autres, l'étude sur l'économie des changements climatiques réalisée par Stern N., en 2007, où il souligne qu'une action internationale immédiate pour stabiliser les émissions de gaz à effet de serre à l'origine des changements du climat aurait des retombées économiques bien supérieures au coût des mesures prises en ce sens. Cependant, et en plus des limites de son choix du seuil de stabilisation des gaz à effet de serre (GES), sa méthodologie était plus concentrée sur l'estimation des coûts environnementaux et n'as pas traité l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau.

(*) Institut national de la recherche agronomique (INRA Agadir, Maroc).

(**) IAV Hassan II Rabat, Maroc.

(***) INRA Mekness, Maroc.

Corresponding author: fouad.elame@yahoo.fr

¹ MAPM: Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime.

D'autres auteurs se sont concentrés sur les méthodes d'estimation du coût de l'adaptation à ces changements (Agrawala et Fankhauser, 2008; Parry *et al.*, 2009) et démontrent les limites des récentes estimations du coût global de l'adaptation aux changements climatiques.

Au niveau du Maroc, plusieurs études ont traité l'impact des changements prévus sur les précipitations et sur les rendements en se basant sur les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Cependant, les travaux de recherche déjà cités ne tiennent pas compte du cycle de l'eau à l'échelle régionale et se basent généralement sur les scénarios d'émission des GES dans la formulation de leur hypothèse de départ, ce qui ne permet pas de fournir de données précises concernant l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau.

Toutefois, il faut noter que l'apport de ces travaux est considérable puisqu'ils ont permis une prise de conscience par les décideurs de la nécessité d'incorporer une composante consacrée aux risques des changements climatiques au niveau de toutes les activités de développement, voire même, au niveau des comptabilités nationales des pays.

En ce qui concerne la modélisation économique des ressources en eau, Burt (1966) a été l'un des premiers à travailler sur les eaux souterraines et les problèmes de gestion économique de ces ressources. Son travail a fourni le cadre général qui a été ensuite approfondi par d'autres auteurs.

D'autres auteurs ont traité la ressource eau dans une approche combinée (*conjunctive water use*) (Howitt, 1982; Tsur, 1990). McKinney *et al.* (1999) ont distingué entre deux types d'approches de modélisation, l'approche par compartiment ou bloc et l'approche dite holistique. L'approche par compartiment est caractérisée par une structure exogène où les deux modèles hydrologique et économique sont exécutés séparément mais connectés par un fichier d'échange de données. Le modèle dit holistique, par contre, incorpore les deux structures hydrologique et économique dans un modèle endogène où la demande et l'offre de l'eau sont résolues simultanément.

En examinant ces différents travaux, on constate que la majorité de ces études ont traité les ressources en eau séparément sans tenir compte des autres activités directement liées à la ressource eau, d'une part. D'autre part, d'autres auteurs ont analysé les ressources en eau de surface indépendamment des ressources souterraines et ont écarté la relation et la complémentarité qui existe entre ces deux ressources. Par conséquent, l'analyse de la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin nécessite d'autres approches plus complexes du fait qu'il faut tenir compte des différentes caractéristiques hydrologiques et des demandes en eau des différents usagers au niveau du bassin.

Pour compléter ces efforts en matière de modélisation économique, d'autres travaux ont permis de développer des modèles intégrés de bassin, en l'occurrence les études faites par Cai *et al.* (1999)² et Rosegrant *et al.* (2000). Cai a développé un prototype d'un modèle intégré hydro-économique de bassin. Sa contribution a été très importante puisqu'il a incorporé plusieurs aspects agronomiques, hydrologiques et économiques dans un modèle intégré. Ce modèle a servi de base pour les autres applications qui ont suivi, notamment le modèle qui a été développé par Rosegrant au niveau du Bassin 'Maipo'. Heidecke *et al.* (2006) se sont basés sur le modèle qui a été développé initialement par l'IFPRI (International Food Policy Research Institute) et ont utilisé une approche d'optimisation hydro-économique au niveau de la vallée de Drâa, au Maroc, pour évaluer la politique du prix de l'eau dans la zone.

Néanmoins, le modèle de base utilisé au niveau de ces études contient plusieurs imperfections qui peuvent influencer les résultats. En effet, ce modèle maximise la marge brute au lieu de la valeur ajoutée, sachant qu'il est agrégé par zone agricole. De même, quelques problèmes de programmation au niveau des rendements entre culture irriguée et bours ont été relevés.

Pour pallier les insuffisances des travaux antérieurs, cet article propose une modélisation économique intégrée à l'échelle du bassin versant qui appartient à la lignée des travaux de modélisation entrepris au niveau international, notamment par l'IFPRI. Il s'agit d'un modèle plus approfondi et qui intègre de nouveaux aspects, à savoir le développement de l'aspect dynamique de la ressource, en plus des composantes économiques, hydrologiques et agronomiques. De même, ce modèle sera suffisamment désagrégé par sous-unités physiques et fonctionnelles du bassin versant, par types d'exploitations agricoles et par systèmes de production.

2. Méthode d'approche

2.1. Choix de la zone d'étude

Situé entre l'Océan Atlantique et les montagnes du Haut-Atlas et l'Anti-Atlas, le bassin du Souss-Massa s'étend approximativement sur plus de 27 880 km², soit 4% du territoire national. Le climat de la région, à prédominance aride, est caractérisé par une irrégularité et une variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

Le choix du bassin du Souss-Massa, une des zones les plus touchées par le changement climatique et souffrant d'un très fort déficit hydrique, est motivé par la place économique qu'occupe ce bassin et la rareté croissante de l'eau à laquelle fait face cette zone. En effet, le développement touristique important et la contribution considérable de ce bassin aux exportations agricoles nationales (leader en exportation de fruits et légumes hors saison), conjugués à la pression démographique et à l'urbanisation que connaît cette zone font que la demande en eau est devenue insoutenable. On note déjà des déficits hydriques des ressources en

² Cai X., Ringler C., Rosegrant M.W. (2006), *Modeling water resources management at the basin level. Methodology and application to the Maipo River Basin*. Washington: International Food Policy Research Institute. Research report, 149.

eau souterraine qui ont atteint 300 Mm³ (ABHSM, 2009)³. Ceci impose des plans d'urgence, non seulement pour rationaliser l'utilisation des ressources actuelles, mais aussi pour augmenter l'offre d'eau.

2.2. Structure du modèle de bassin

Le modèle proposé dans cette étude utilise trois composantes principales pour son fonctionnement qui sont d'ordre hydrologique, économique et agronomique. Le développement d'une structure de modélisation économique-hydrologique intégrée à l'échelle du bassin est complexe puisqu'il implique:

- Une estimation logique des flux et des réserves d'eau au niveau du bassin, la demande en eau de chaque secteur au niveau des différents sites, les infiltrations et les retours d'eau et leurs flux vers la rivière.

- Une représentation à l'amont et à l'aval de la demande des ménages, la demande dérivée des secteurs économiques ainsi que la demande pour la génération de l'énergie hydroélectrique.

- Une représentation des systèmes de production agricole par périmètre et par type d'exploitation agricole.

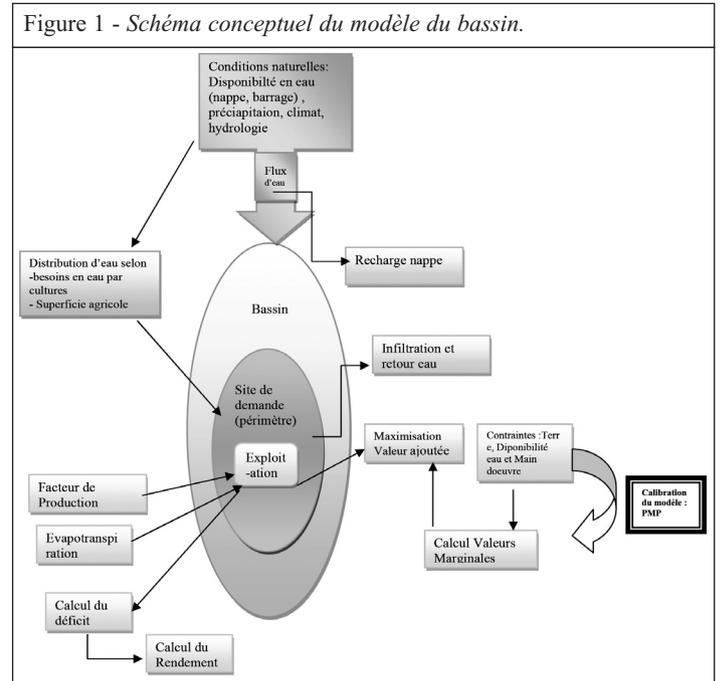
- L'incorporation des règles institutionnelles qui gouvernent l'allocation de la ressource eau pour les différents secteurs, tout en incluant les droits, les prix et les restrictions imposées par les institutions en place.

Tout en se basant sur le modèle initial "River Basin Model", développé par l'IFPRI, le modèle économique utilise les techniques d'optimisation économique et inclut les rapports réels entre les différentes unités du réseau hydrologique appelées «nœud». Ces nœuds représentent des entités physiques pouvant être soit des afflux, des barrages, des nappes, soit des sites de demande en eau. Les liens entre les différents nœuds et les sites de demande simulent le flux d'eau entre ces différentes entités le long de la rivière. La distribution de l'eau distingue entre les différents usages agricole, industriel et municipal. Alors que pour le secteur agricole l'allocation de l'eau d'irrigation se fait selon les besoins et la rentabilité de chaque culture, pour le reste des secteurs cette allocation est déterminée de façon exogène (Elame et Doukkali, 2012).

Pour refléter au mieux la complexité des conditions d'exploitation et de valorisation des eaux d'irrigation, le modèle sera suffisamment désagrégé par sous-unités physiques et fonctionnelles du bassin versant, par types d'exploitations agricoles, par systèmes de production, par activités de production animale et végétale et leur intégration dans les chaînes de valeur. Egalement, le modèle intégrera les composantes spatiales (unités hydrologiques, espaces de cultures et d'exploitation des terres) et fonctionnelles (unités de gestion et d'exploitation des eaux superficielles et souterraines, terres de cultures pluviales, terres de parcours et forêts) des paramètres étudiés ainsi que leur variabilité spatio-temporelle (voir figure 1).

³ ABHSM: Agence du bassin hydraulique de Souss-Massa.

Figure 1 - Schéma conceptuel du modèle du bassin.



2.3. Spécification du modèle

La tâche majeure dans le développement de la structure d'un modèle économique hydrologique intégré est la détermination de la résolution spatiale adéquate et l'agrégation des composantes économiques et hydrologiques, qui permettent une intégration cohérente et logique de ces rapports, et cela tout en harmonisant les échelles spatiales entre les composantes économiques et hydrologiques.

Le modèle hydro-économique proposé est établi sur la base d'un réseau de nœuds. Les éléments spatiaux (nœuds de demande) sont tracés afin que la variabilité spatiale des ressources en eau et l'allocation à divers sites de demandes d'eau puissent être bien reproduites. L'allocation de l'eau et les bilans input-output sont simulés à plusieurs échelles spatiales: les champs de culture, les sites de demande, les nœuds de source (barrages, nappes, portées de rivière), et pour la totalité du bassin.

2.3.1. Les composantes du modèle intégré

À la base, le modèle proposé est un modèle d'optimisation non linéaire où, étant donné un certain nombre de contraintes, on cherche à maximiser une fonction objectif qui est dans notre cas la valeur ajoutée globale générée au niveau de l'ensemble du bassin. Cette valeur ajoutée est calculée au niveau de la parcelle et puis, agrégée au niveau des sites de demande et du bassin entier.

EQ 1: $\text{Max } V_GOALVAR = \sum VAGPMP(dma, farm_t)$
 $V_GOALVAR$ Valeur ajoutée globale à l'échelle du bassin de Souss-Massa

$VAGPMP$ La valeur ajoutée par type d'exploitation après calibration

dma indice des périmètres de demande en eau d'irrigation
 $farm_t$ indice des types d'exploitation

– Les composantes hydrologiques

Les composantes hydrologiques incluent les flux d'eau entrants (inflows) et les flux sortants (outflows) au niveau du barrage, la distribution des flux sortants en quantités et par destination, l'usage de l'eau d'irrigation, les réutilisations de l'eau ainsi que les interactions entre les eaux superficielles et souterraines.

- Les équations se rapportant à cette composante incluent:
- L'équation des flux d'eau, des transferts et de l'équilibre d'eau à partir de l'exutoire de la rivière vers les champs de culture ou les ménages.
- L'équation de la recharge et la décharge de l'eau superficielle et souterraine.
- L'équation traduisant les disponibilités et besoins en eau des cultures et qui tiennent compte de l'évapotranspiration des cultures et des pluies effectives ou les réserves utiles du sol (quantités stockées au niveau des racines et qui peuvent être utilisées par la plante).
- L'équation exprimant l'équilibre de l'eau dans les différents sites de demande: demandes municipale et d'irrigation (tout en incluant la distribution de l'eau), infiltration, génération d'énergie hydro-électrique, fuites et drainage).

Il est à noter que les balances hydrologiques du modèle sont constituées de la balance de l'eau de surface et de l'eau souterraine. L'équation donnant ces balances égalise les quantités d'eau entrantes vers un nœud à celles sortantes.

- Les composantes agronomiques

Les composantes agronomiques sont données par des équations linéaires liant le rendement réel des cultures au rendement potentiel.

$$EQ: 2 \quad AYEILD = MYEILD * [1 - (P_KY * (ETA / ETM))]$$

AYEILD rendement réel

MYEILD rendement maximal

ETA évapotranspiration actuelle

ETM évapotranspiration potentielle

P_ky coefficient saisonnier du rendement

Dans ces équations, le coefficient de réponse du rendement (ky) est basé sur l'hypothèse que la relation entre le rendement relatif (rendement actuel par rapport au rendement maximum) et l'évapotranspiration relative (ETA/ETM) est linéaire pour un déficit d'eau relativement supérieur à 50% ou bien ($1 - \text{Eta} / \text{Etm} = 0.5$).

- Les composantes économiques

Une fois calculés, les rendements seront introduits dans la fonction objectif pour calculer les marges brutes par culture et les valeurs ajoutées agricoles. La valeur ajoutée est calculée par la production totale dont on soustrait les différents coûts liés aux inputs (semence, labour, traitements, irrigation d'eau de surface et souterraine...).

Le prix économique de l'eau est défini comme étant le supplément de valeur ajoutée par m³ attribuée à l'eau d'irrigation. Dans notre cas, le prix économique correspond à la valeur marginale de l'usage de l'eau d'irrigation.

Les trois composantes décrites ci-dessus sont intégrées dans une structure cohérente d'allocation de l'eau qui, tout en tenant compte du fonctionnement hydrologique des différents systèmes et des règles d'allocation de l'eau au niveau des sites de demande, permet d'évaluer les conséquences environnementales et de rentabilité économique d'une telle allocation.

La demande en eau est déterminée de façon endogène en se basant sur les rendements agricoles empiriques et les fonctions de production des cultures. A l'échelle de chaque secteur agricole, l'eau est allouée aux cultures en fonction de leurs stades de développement et de leurs besoins.

Une fois la fonction 'objectif' et les fonctions contraintes spécifiées, la calibration du modèle est obtenue à l'aide de la technique dite de programmation mathématique positive PMP (Howitt, 1995; Heckelei, 1997). La PMP consiste à considérer que l'allocation choisie par l'exploitation agricole est une allocation optimale, c'est-à-dire qui maximise sa 'Fonction objectif' étant donné un certain nombre de contraintes. Ainsi, les données observées peuvent servir de base à la calibration des paramètres spécifiés dans la fonction de coût de production. Cette méthode de calibration garantit que le modèle reproduit l'allocation de la terre et les volumes produits de l'année de référence. Le modèle proposé est calibré de telle façon à reproduire la situation observée de la part de chaque culture dans la SAU totale.

2.4. Hypothèses du modèle

Le modèle calcule la valeur économique de l'eau pour les différents usagers au niveau du bassin qui sont l'agriculture et les ménages. Les ressources terre, eau d'irrigation et main d'œuvre, sont utilisées de manière optimale afin de maximiser la valeur ajoutée au niveau des exploitations agricoles.

Signalons que la demande en eau est déterminée de façon endogène en se basant sur les rendements agricoles empiriques et les fonctions de production des cultures. A l'échelle de chaque secteur agricole, l'eau est allouée aux cultures en fonction de leurs stades de développement et de leurs besoins. L'offre d'eau est déterminée par l'équilibre entre l'offre et la demande, résultant d'un comportement de maximisation de la valeur ajoutée globale à l'échelle du bassin sous des contraintes physiques, techniques et de choix politiques.

Dans le cas du bassin étudié, le pompage de l'eau à partir des nappes est illimité. Les agriculteurs peuvent pomper l'eau sans contrainte limitante. Concernant la contrainte terre, il faut signaler que la surface totale au niveau du bassin (Bour+Irriguée) est entièrement utilisée. Il est à préciser que la surface irriguée ne peut pas dépasser la surface totale irriguée alors que les terres non irriguées peuvent dépasser la surface totale consacrée à ces cultures qui peuvent même être cultivées sur les terres irriguées. Cette démarche permettra un inter-changement et une conversion des terres irriguées en terres non irriguées en cas de sécheresse, alors que le sens inverse n'est pas permis.

2.5. Développement dynamique du modèle

Dans l'analyse statique de l'allocation des ressources naturelles, la question qui se pose est d'optimiser une certaine fonction 'objectif' qui dépendra des quantités en ressources utilisées. Cependant, le problème majeur de cette analyse, d'où la pertinence des modèles dynamiques, est de savoir à quel point l'utilisation actuelle d'une ressource donnée peut limiter son utilisation future. De ce fait, la représentation du temps dans les modèles économiques s'avère d'un grand intérêt. La prise en compte de la notion du temps peut se faire de différentes manières. Dans les modèles statiques, la prise en compte du temps ne se fait pas de manière explicite. L'optimisation est réalisée pour l'obtention d'une fonction 'objectif' dans un moment donné. Les modèles dynamiques sont, par contre, ceux où il existe une prise en compte explicite de la notion du temps.

Afin de tenir compte des variations climatiques et de leurs impacts prévus, l'aspect dynamique du modèle a été développé, ce qui permettra de disposer d'une connaissance du futur en termes de probabilités des états de la nature, notamment dans le cas des années de sécheresse où le facteur eau devient rare. Ce type de modélisation est caractérisé par l'introduction des équations de la dynamique, à savoir un générateur de données qui convertit l'état passé du système en données pour être utilisées par l'algorithme d'optimisation: un algorithme de feedback qui détermine l'état du système suivant, à partir de l'état passé et la solution optimale actuelle. Ces équations permettront de faire des itérations en tenant compte des paramètres et variables qui seront influencés par la notion du temps dans le modèle, à savoir les précipitations, la recharge des nappes et les apports en eau de surface. Pour les barrages et les nappes, la quantité d'eau restante de l'année t sera utilisée comme quantité initiale de l'année $t+1$. Cette démarche permettra, d'une part, de simuler l'impact des changements climatiques et des choix politiques comme mesure d'atténuation des changements climatiques et de réduction de la pression sur les ressources. D'autre part, elle permettra de capter le comportement des différents secteurs usagers, d'analyser l'évolution des ressources en eau de surface et souterraine et de proposer une meilleure allocation de ces ressources.

3. Résultats et discussions

Ce travail vise une meilleure gestion et allocation des ressources en eau à l'échelle du bassin de Souss-Massa. Il se base sur la modélisation économique qui a pour objectif de maximiser la fonction de la valeur ajoutée à l'échelle du bassin sujette à un ensemble de contraintes. Plusieurs équations sont intégrées dans le modèle exprimant les différentes demandes en eau, les flux d'eau à partir des barrages et des nappes, les flux d'eau entre nappes, des équations de formation du rendement tenant compte des contraintes liées à la disponibilité en eau et en terres. Ces résultats doivent être raisonnables et indicatifs et permettrons de montrer l'é-

volution des principaux paramètres économiques et hydrologiques sous d'éventuels impacts des changements climatiques.

Cette simulation a été construite sur la base des prévisions des précipitations et des demandes en eau des 15 ans à venir 2015-2030. Une boucle a été créée et permettra de faire des itérations en tenant compte des paramètres et variables qui seront influencés par les variations qui seront introduites par les années de l'ensemble créé par cette boucle. Un scénario moyen a été retenu avec une augmentation absolue de la température de $+0.7$ °C en 2030 et une tendance à la réduction relative de 4% des précipitations et des apports d'eau chaque année. Il est à noter que les rendements ne seront généralement affectés par ces changements qu'après 2030.

3.1. Usage des ressources en eau

Le modèle dynamique a permis de refléter de manière plus précise l'évolution de l'usage des ressources en eau au cours des années en comparaison avec le modèle statique qui donne seulement les résultats instantanés de l'année en cours. Les résultats de l'usage de l'eau sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 - Usage des ressources en eau.

| | A1 | A3 | A5 | A7 | A8 | A10 | A12 | A15 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Usage de l'eau de surface en Mm ³ | 328,01 | 328,01 | 281,22 | 267,23 | 240,3 | 207,80 | 207,80 | 207,80 |
| Usage de l'eau souterraine (Mm ³) | 382,05 | 382,05 | 396,07 | 401,22 | 411,62 | 423,12 | 423,12 | 423,12 |
| Usage de l'eau potable (Mm ³) | 39,29 | 39,29 | 78,59 | 78,59 | 78,59 | 78,59 | 117,88 | 117,88 |
| Usage agricole Total (Mm ³) | 710,06 | 710,06 | 677,29 | 668,45 | 651,92 | 630,92 | 630,92 | 630,92 |
| Usage Total (Mm ³) | 749,35 | 749,35 | 755,88 | 747,04 | 730,51 | 709,51 | 748,8 | 748,8 |

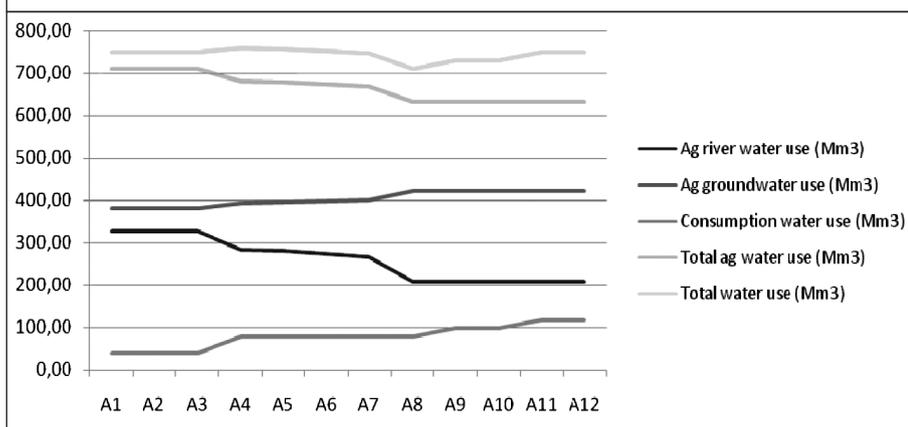
– L'usage de l'eau pour l'irrigation

L'usage agricole de l'eau au niveau du bassin de Souss-Massa a tendance à diminuer. La quantité d'eau totale utilisée est de l'ordre de 710 millions de mètres cubes (m³) la première année et de 630 millions de m³ la dernière année, soit une diminution de 11% des ressources utilisées. Cette diminution aura un impact sur les superficies agricoles cultivées.

L'utilisation de l'eau de surface pour l'irrigation a tendance à baisser à partir de l'année où on commence à ressentir la diminution des apports d'eau et des précipitations. En effet, l'utilisation des ressources en eau de surface pour l'irrigation a diminué de plus de 37%, soit l'équivalent de plus de 100 millions de mètres cubes sur les 15 prochaines années. Cependant, l'utilisation des ressources en eau souterraine a augmenté de plus de 40 Millions de mètres cubes, ce qui représente 10% de la quantité totale d'eau souterraine destinée à l'irrigation.

L'usage global de l'eau prend la même allure de l'usage agricole puisque ce dernier constitue plus de 80% de la demande totale en eau à l'échelle de la zone. On remarque aussi une augmentation de cette demande globale au cours des dernières années simulées par le modèle dynamique suite à l'augmentation des besoins en eau non agricole. Cette augmentation est due à la concurrence sur les ressources potables par les grandes villes de la zone et le secteur du

Figure 2 - Evolution de l'usage de l'eau au cours des années.



tourisme qui constituera plus de 25% de l'usage non agricole en 2030.

3.2. La valeur ajoutée agricole

La valeur ajoutée totale créée à l'échelle du bassin de Souss-Massa tend à diminuer considérablement à partir de la huitième année de résolution par le modèle dynamique. En effet, on assiste à une diminution de 8% de la valeur ajoutée totale du bassin, ce qui correspond à 776 Millions de dirhams. Cette diminution de la valeur ajoutée est directement affectée par la diminution des superficies irriguées au profit des superficies bours. Les superficies irriguées ont diminué de 5,7% suite à la diminution des apports d'eau et des précipitations. Ainsi et afin de permettre cette interaction entre le bour et l'irriguée, les superficies non irriguées ont augmenté de 7,8% au détriment des superficies irriguées.

L'effet des diminutions des apports en eau et des précipitations sur la valeur ajoutée nette par hectare est important dans les zones agricoles utilisant uniquement l'eau de surface. En effet, la valeur ajoutée nette pour les zones qui utilisent l'eau de surface a diminué de 28% pour le massa traditionnel et de 4% pour l'Issen moderne public. Cette diminution est due à une importante réduction des superficies irriguées dans ces zones, d'une part, et à une diminution des rendements réalisés par hectare d'autre part. Par contre, pour les zones agricoles utilisant l'eau souterraine, les valeurs ajoutées nettes par hectare sont moins affectées avec environ 1% de réduction.

3.3. Les assolements optimaux

Les prévisions du modèle dynamique ont montré qu'il y aura un changement des superficies irriguées et non irriguées. La superficie des terres non irriguées a augmenté significativement au détriment des cultures irriguées. En effet, on note une augmentation moyenne des superficies

bours comme suit: le blé dur 12%, le blé tendre 29%, l'orge 58% et la jachère qui a augmenté de 9,45%. Pour les cultures irriguées, les superficies ont tendance à baisser, notamment les cultures maraîchères et fourragères. Les superficies des cultures pérennes comme les agrumes n'ont pratiquement pas changé. Ceci signifie qu'en cas de sécheresse, les exploitations agricoles ont tendance à diminuer les superficies irriguées.

Si on analyse les résultats des assolements optimaux par secteur, on constate que la diminution des apports en eau a moins d'effet, en termes de superficie cultivée, sur les secteurs qui utilisent l'eau

souterraine et les secteurs qui pratiquent une irrigation mixte. Néanmoins, on constate une diminution importante des superficies des cultures irriguées à partir de l'eau de surface. Cette diminution avoisine 30% dans le périmètre de Massa traditionnel, 26 et 29% respectivement pour l'Issen moderne public et l'Issen traditionnel.

Pour la zone bour, les prévisions montrent que les superficies agricoles continueront à augmenter tant que les précipitations couvrent les besoins en eau des cultures non irriguées et qu'à partir d'un certain seuil de stress hydrique, estimé à 50% de réduction des apports en eau, les cultures bours vont commencer à se convertir en jachère.

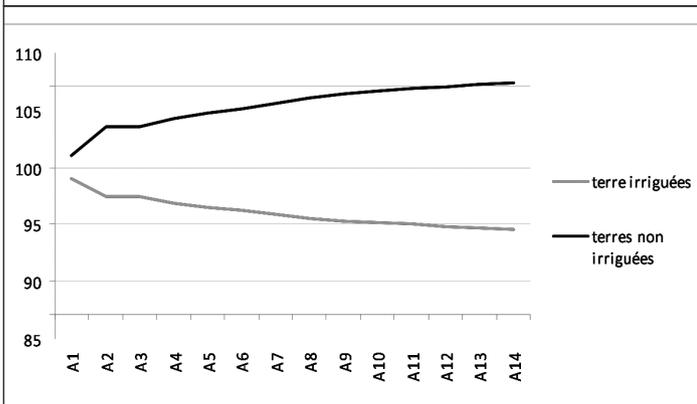
Tableau 3 - Evolution des superficies agricoles entre la première année et la dernière année de la simulation.

| évolution des superficies entre A0 et Af | | | |
|--|---------|----------------------------|--------|
| Blé dur (bour) | 11,80% | Haricot vert (plein champ) | -12% |
| Blé Tendre (bour) | 29,10% | Agrume | -0,30% |
| Jachere | 4,64% | Tomate (Serre) | -13% |
| Org (bour) | 58% | Tomate (plein champ) | -13% |
| Blé dur | 0,33% | Pomme de terre | -8% |
| Blé Tendre | -0,15% | Melon (Serre) | -7% |
| Orge | 0,07% | Melon (plein champ) | -8% |
| Mais | -5,07% | Olivier | -1% |
| Mais_fourager | -3,14% | Bananier | -4% |
| Luzerne | -6,60% | Carotte | -6% |
| Bersim | -2,58% | P_f (Serre) | -7% |
| Petit pois | -11,80% | P_f (plein champ) | -5% |
| Haricot vert (Serre) | -11,70% | | |

Tableau 2 - Evolution de la valeur ajoutée, des superficies et du prix économique (shadow price).

| | A1 | A3 | A5 | A6 | A7 | A8 | A10 | A11 | A13 | A15 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Valeur économique de l'eau (DH/m3) | 2,61 | 4,42 | 5,15 | 5,77 | 6,34 | 6,96 | 9,10 | 10,38 | 11,78 | 15,61 |
| Valeur ajoutée (M. DH) | 9210,93 | 9075,93 | 9075,05 | 9003,81 | 8896,68 | 8793,72 | 8731,44 | 8665,69 | 8517,96 | 8434,15 |
| Utilisation des superficies irriguées (%) | 100,00 | 98,54 | 96,50 | 96,20 | 95,80 | 94,30 | 95,14 | 94,88 | 94,71 | 94,57 |
| Utilisation des superficies non irriguées (%) | 100,00 | 104,57 | 104,79 | 105,20 | 105,74 | 107,80 | 106,64 | 106,85 | 107,23 | 107,42 |

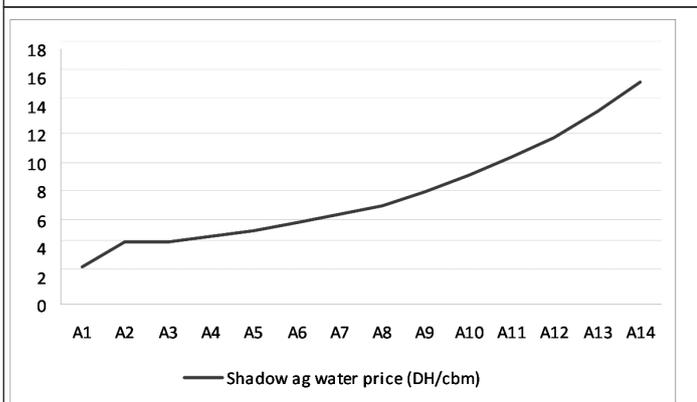
Figure 3 - Evolution des superficies irriguées et Bours.



3.4. Le prix économique de l'eau (*Shadow price*): une rareté qui s'accroît de plus en plus

Le prix économique de l'eau augmente sept fois plus que le prix de l'année de base. Ce prix moyen de l'eau à l'échelle du bassin est passé de 2.6 DH/m³ à plus de 15 DH/m³. Ceci implique qu'en cas de diminution des apports en eau et des précipitations, notamment en cas de sécheresse, la ressource eau de surface de la zone devient très contraignante et entraîne une augmentation considérable du prix économique de l'eau. Sachant qu'il n'y a pas de contraintes limitantes sur les ressources en eau souterraines, les exploitations qui utilisent l'eau souterraine n'ont pas été affectées par cette simulation.

Figure 4 - Evolution du prix économique de l'eau.



Le prix économique varie dans un intervalle de 1.19 à 4.92 DH/m³ la première année qui est une année normale, alors qu'il varie de 1.19 et 26 DH/m³ pour la dernière année de la simulation. Les zones agricoles qui utilisent l'eau de surface ont les prix économiques de l'eau les plus élevés.

Tableau 4 - Evolution du prix économique entre la première année et la dernière année par périmètre.

| | Massa moderne | Massa traditionnel | Massa privé | Issen moderne | Issen traditionnel | Secteur G1 | Sous Amant mod | Ssous Traditionel | Sous privé |
|----|---------------|--------------------|-------------|---------------|--------------------|------------|----------------|-------------------|------------|
| A0 | 4,15 | 1,65 | 5,00 | 6,08 | 3,56 | 1,19 | 3,10 | 2,05 | 5,00 |
| Af | 26,24 | 23,74 | 5,00 | 14,97 | 12,53 | 1,19 | 3,10 | 2,05 | 5,00 |

En cas de diminution des précipitations, la disponibilité de l'eau des barrages devient de plus en plus faible: ces zones agricoles n'ont aucune autre alternative pour augmenter leurs disponibilités en eau, d'où une augmentation considérable de leurs prix économiques de l'eau.

Les zones agricoles qui pratiquent une irrigation mixte et celles qui pompent l'eau souterraine n'ont pas été affectées par cette variabilité climatique et leurs prix économiques n'ont pas beaucoup changé. Les zones qui utilisent l'eau de surface et souterraine font recours plus au pompage pour combler le déficit en eau de surface entraîné par la variabilité appliquée par le biais du modèle dynamique.

En guise de conclusion, les exploitations irriguées par l'eau souterraine sont les moins affectées par la variabilité climatique vu que les eaux de nappe arrivent à satisfaire les besoins exprimés. En cas de sécheresse, cette eau souterraine joue le rôle de tampon puisqu'elle permet de compenser le manque d'eau de surface, ce qui explique cette stagnation des prix économiques, des valeurs ajoutées, des quantités d'eau consommées par les cultures et des superficies cultivées qui n'ont pas beaucoup changé. Cependant, les exploitations irriguées par l'eau de surface ont vu leurs valeurs ajoutées nettes, leurs consommations en eau et leurs superficies diminuer significativement.

3.5. Evolution des ressources en eau souterraines

A travers cette simulation, nous avons essayé de refléter l'état actuel de l'utilisation des ressources en eau souterraine. Cette simulation est le résultat de plusieurs itérations et qui suppose qu'il n'y a pas de contraintes limitantes sur l'utilisation des eaux souterraines.

L'analyse des résultats des ressources souterraines montrent que les deux principales nappes de la zone sont déficitaires et que ce déficit continue à augmenter tant qu'il n'y a pas une utilisation rationnelle et régulée des ressources en eau.

Vu que les scénarios des changements climatiques prévoient une diminution des précipitations et des apports en eaux, cette situation est traduite par une diminution de la recharge de la nappe et une augmentation du pompage destiné essentiellement à l'irrigation et par conséquent, une réduction des niveaux des nappes et des volumes. En effet, les niveaux moyens des nappes entre la première et la dernière année de la simulation ont diminué considérablement. On enregistre une régression de 8 m pour la nappe de Chtouka et 16 m pour la nappe de Souss. Les volumes des nappes suivent la même allure que les niveaux des nappes (voir figure). Le volume moyen de la nappe de Souss a diminué de 207 Millions de mètres cubes alors que celui de la nappe de Chtouka a régressé de 23 Millions de m³.

Cette simulation montre de manière claire l'effet combiné des changements climatiques et de la surexploitation des nappes par le secteur agricole. Cette situation deviendra chaotique si

aucune décision de contrôle des prélèvements des eaux souterraines n'est appliquée, ce qui pourra compromettre toutes les activités usagères des ressources en eau dans la zone et aura des conséquences sévères sur l'environnement.

Figure 5 - Variation du volume de la nappe Souss.

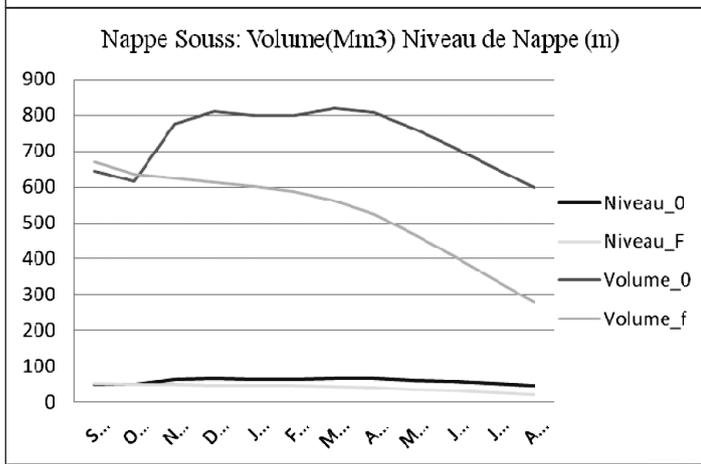
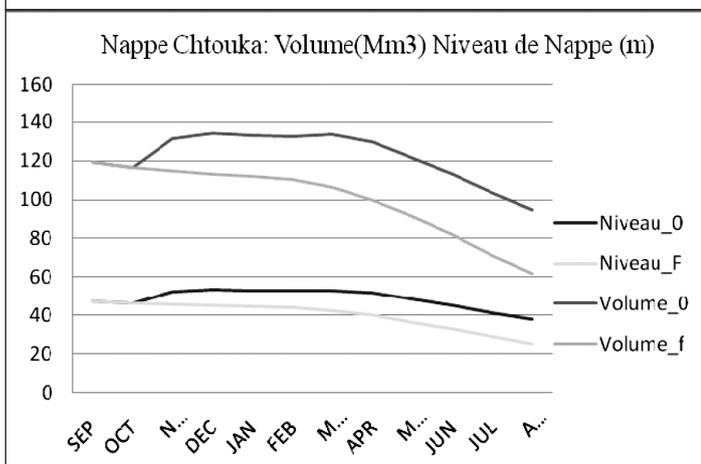


Figure 6 - Variation du volume de la nappe Chtouka.



4. Conclusion

Le modèle dynamique a permis de refléter l'impact des changements climatiques sur l'évolution de l'usage des ressources en eau au cours des années. Les prévisions du modèle ont montré qu'il y aura un changement des superficies agricoles ainsi que de l'usage des ressources en eau. L'usage agricole de l'eau au niveau du bassin de Souss-Massa a tendance à diminuer suite à la diminution des apports d'eau. Cette diminution aura un impact direct sur les superficies agricoles cultivées. En effet, la superficie des terres non irriguées a augmenté significativement au détriment des cultures irriguées. Les superficies des cultures irriguées ont tendance à baisser, en particulier dans le cas des cultures maraîchères et fourragères.

Le prix économique de l'eau augmente de manière considérable pour atteindre 15 DH/m³. Ceci implique qu'en cas

de diminution de la ressource, notamment en cas de sécheresse, la ressource eau de surface de la zone devient très contraignante et entraîne une augmentation considérable du prix économique de l'eau. Ce résultat montre à quel point l'eau deviendra rare avec les années. Il est à noter qu'en cas de sécheresse, l'eau souterraine joue le rôle de tampon puisqu'elle permet de compenser le manque d'eau de surface, ce qui explique cette stagnation des valeurs ajoutées et des superficies irriguées à partir des eaux souterraines.

L'analyse des résultats des ressources souterraines montre que les deux principales nappes de la zone sont déficitaires et que ce déficit continue à augmenter tant qu'il n'y a pas une utilisation rationnelle et régulée des ressources en eau vu que les scénarios des changements climatiques prévoient une diminution des précipitations et des apports d'eau. Sur la base de ce constat, la recherche de nouveaux instruments de contrôle comme la taxation de l'eau souterraine s'impose si on souhaite gérer de manière rationnelle les prélèvements, préserver au mieux les réserves en eau et éviter un recours massif de l'agriculture de la région à l'eau souterraine, ce qui peut avoir des conséquences graves sur le plan environnemental.

Il en ressort que:

- le développement d'une modélisation économique et hydrologique intégrée à l'échelle des bassins du Maroc constitue un moyen adéquat pour la gestion du partage et l'allocation optimale de la ressource eau entre les différents secteurs de demande ainsi que pour l'aide à l'instauration d'une politique appropriée de l'eau à l'échelle régionale. En effet, toute politique de gestion de la demande en eau doit être nuancée par bassin pour tenir compte des spécificités régionales.

- Les ressources en eau au niveau d'un bassin sont substituables et toute politique de gestion de l'eau ne peut ignorer cet aspect et doit intégrer à la fois les ressources en eau de surface et souterraine.

- En situation de sécheresse, le prix économique de l'eau devient si élevé que la politique de tarification de l'eau adoptée par l'Etat marocain reste insuffisante pour une rationalisation de l'utilisation et une préservation de la ressource à long terme.

Références bibliographiques

ABHSM Agence du Bassin Hydraulique de Souss-Mass, 2007. *Etude de révision du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) des bassins du Souss Massa. Mars 2007.*

Agrawala S. et Fankhauser S., 2008. *Economic aspects of adaptation to climate change: costs, benefits and policy instruments.* Paris: Organisation de coopération et de développement économiques.

Banque Mondiale, 2010. *Rapport sur le développement 2010 dans le monde. Développement et changement climatique.*

Cai X., 1999. *A modeling framework for sustainable wa-*

ter resource management. Center for research on water resources. University of Texas at Austin. PhD Thesis.

Elame F. et Doukkali R., 2012. Water valuation in agriculture in the Souss-Massa Basin (Morocco) . In: Choukr-Allah R., Ragab R., Rodriguez-Clemente R. (eds.). *Integrated water resources management in the Mediterranean region. Dialogue towards new strategy*. Dordrecht: Springer, pp. 109-122.

Heckeley T., 1997. *Positive mathematical programming: review of the standard approach*. CAPRI Project. Working paper 97/03.

Heidecke C. et Kuhn A., 2006. Calculating feasible charges for irrigation water in the Drâa Valley in Southern Morocco. In: *Journal of Agriculture and Marine Science*, 11: 47-54.

Howitt R. E., 1995. Positive mathematical programming. *American journal of agriculture economics*, 77: 329-342.

MAPM, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2012. *L'agriculture marocaine en chiffres, 2012*.

McKinney D.C., Cai X., Rosegrant M.W., Ringler C., Scott C.A., 1999. *Integrated basin-scale water resources management modeling: review and future directions*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. IWMI SWIM paper, 6.

Rosegrant M.W., Ringler C., McKinney D.C., Cai X., Keller A., Donoso G., 2000. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale. The Maipo River basin. *Agricultural Economics*, 24(1): 33-46.

Stern N., 2007. *The economics of climate change: The stern review*. Cambridge: Cambridge University Press.

Tsur Y., 1990. The stabilization role of groundwater when surface water supplies are uncertain: The implications for groundwater development. *Water resources research*, 26 (5): 811-818.