

# La Valeur Ajoutée de l'Évaluation d'Empreinte Eau pour la Politique National de l'Eau: Une Etude de Cas pour le Maroc

Joep F. Schyns\*, Arjen Y. Hoekstra

Twente Water Centre, Université de Twente, Enschede, Pays-Bas

\* E-mail: [j.f.schyns@utwente.nl](mailto:j.f.schyns@utwente.nl)

## Unités

1 Mm<sup>3</sup> = 1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> = million m<sup>3</sup>

1 Gm<sup>3</sup> = 1×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> = milliard m<sup>3</sup>

## Notification

Cet article est une traduction d'un article de recherche publié en anglais dans la revue PLoS ONE, qui devrait être cité comme suit:

Schyns JF, Hoekstra AY (2014) The Added Value of Water Footprint Assessment for National Water Policy: A Case Study for Morocco. PLoS ONE 9(6): e99705.  
doi:10.1371/journal.pone.0099705

L'article original est disponible à partir de:

<http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0099705>

Une version étendue de l'article original est publié en tant qu'un rapport de l'UNESCO-IHE (en anglais) disponible à partir de:

<http://www.waterfootprint.org/Reports/Report67-WaterFootprintMorocco.pdf>

Cette traduction a été rendue possible par l'Ambassade du Royaume des Pays-Bas à Rabat (<http://maroc.nlabassade.org/>) et l'Institut Néerlandais au Maroc (NIMAR - <http://www.ru.nl/nimar/francais/informations/>). Les auteurs remercient Hatem Chouchane (Université de Twente, Enschede, Pays-Bas) pour la traduction du jargon.

© 2014 Schyns, Hoekstra

## Résumé

Une Evaluation d'Empreinte Eau est effectuée pour le Maroc, permettant une cartographie d'empreinte eau de différentes activités au niveau du bassin fluvial et sur une échelle mensuelle, en distinguant entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Le document vise à démontrer la valeur ajoutée de l'analyse détaillée de l'empreinte eau humaine dans un pays donné et une analyse approfondie des flux d'eau virtuels sortant et entrant dans un pays pour la formulation de la politique nationale de l'eau. Les estimations de l'empreinte eau verte, bleue et grise et des flux d'eau virtuels sont principalement tirées d'une étude mondiale précédente avec la grille à 5 × 5 minutes d'arc de résolution pour la période 1996-2005. Ces évaluations

sont placées dans le cadre de l'écoulement naturel mensuel et de la capacité d'assimilation des déchets par bassin fluvial provenant de sources de données marocaines. L'étude conclut que: (i) l'évaporation à partir des réservoirs de stockage est la deuxième plus grande forme de consommation de l'eau bleue au Maroc, après la production des cultures irriguées; (ii) les ressources en eau et en terres du Maroc sont principalement utilisées pour produire des cultures avec une productivité économique relativement faible (en US\$/m<sup>3</sup> et US\$/ha) telles que les céréales, les olives et les amandes; (iii) une bonne partie de l'exportation d'eau virtuelle du Maroc a trait à l'exportation de produits avec une productivité économique d'eau relativement faible (en US\$/m<sup>3</sup>); (iv) la pénurie de l'eau bleue sur une échelle mensuelle est sévère dans tous les bassins fluviaux et la pression exercée sur les ressources en eaux souterraines par les prélèvements et la pollution par les nitrates est considérable dans la plupart des bassins; (v) les économies potentielles d'eau estimées par relocalisation partielle des cultures de bassins où elles consomment moins d'eau et en réduisant les empreintes eau des cultures à des niveaux de repère sont importantes en comparaison avec les mesures de réduction de la demande et d'accroissement de l'offre envisagées dans la stratégie nationale de l'eau au Maroc.

## Introduction

Le Maroc est un pays semi-aride de la Méditerranée confronté à la pénurie et à la détérioration de la qualité d'eau. Les ressources en eau limitées contraignent les activités dans les différents secteurs de l'économie du pays. L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau et les prélèvements destinés à l'irrigation atteignent un sommet au cours de la période sèche de l'année, ce qui contribue à un faible écoulement de surface et à la dessiccation des cours d'eau. Actuellement, 130 réservoirs sont en service pour faire face à ce décalage de la demande d'eau et de l'approvisionnement en eau naturelle et pour servir à la production d'hydroélectricité et la lutte contre les inondations [1]. Les ressources en eaux souterraines jouent également un rôle important dans le développement socio-économique du pays, en particulier en assurant l'approvisionnement en eau pour les communautés rurales [2]. Cependant, une grande partie des aquifères est surexploitée et souffre de la détérioration de la qualité de l'eau par l'intrusion d'eau salée, en raison de la surexploitation, et des nitrates et des pesticides qui s'échappent des terres cultivées, en raison de l'utilisation excessive d'engrais. Les eaux de surface en aval de certains centres urbains sont également polluées, en raison de rejets d'eaux usées non traitées.

En 1995, la loi sur l'eau du Maroc (n°. 10-95) est entrée en vigueur et a introduit la gestion intégrée de l'eau décentralisée et la rationalisation de l'utilisation de l'eau, y compris le principe de l'utilisateur-payeur et du pollueur-payeur. Elle dicte également l'élaboration de plans directeurs nationaux et des bassins fluviaux [3], qui sont élaborés conformément à la stratégie nationale de l'eau. Pour faire face à la pénurie d'eau et à la pollution, la stratégie nationale de l'eau comprend des plans d'action pour réduire la demande, augmenter l'offre et préserver et protéger les ressources en eau [1]. Elle propose également des réformes juridiques et institutionnelles pour la mise en œuvre et l'exécution appropriées de ces actions. La gestion de la demande se concentre sur l'amélioration de l'efficacité des réseaux d'irrigation et d'approvisionnement urbain et tarification de l'eau pour rationaliser son

utilisation. Les plans visant à accroître l'offre comprennent la construction de plusieurs barrages et un grand transfert d'eau entre bassins Nord-Sud, la protection des infrastructures hydrauliques existantes, le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées traitées.

Bien que la stratégie nationale de l'eau tienne compte des options pour réduire la demande d'eau en plus des options pour accroître l'offre, elle ne comprend pas la dimension mondiale de l'eau en prenant en compte le commerce international de l'eau virtuelle, en plus qu'elle n'évalue pas si les ressources en eau sont attribuées de manière efficace en terme des productivités d'eau physique et économique des cultures (les principaux consommateurs d'eau). L'analyse de l'empreinte eau des activités au Maroc et de la balance commerciale de l'eau virtuelle du pays pourrait donc indiquer de nouvelles perspectives pour alléger la pénurie de l'eau.

Le concept de l'empreinte eau a été introduit par Hoekstra [4]; ceci a mené par la suite à l'élaboration de l'Evaluation d'Empreinte Eau en tant que domaine distinct de recherche et d'application [5], [6]. L'empreinte eau est un indicateur de consommation d'eau douce qui examine non seulement l'utilisation directe de l'eau d'un consommateur ou producteur, mais aussi l'utilisation indirecte de l'eau. En soi, elle établit un lien entre la consommation et l'appropriation humaine des systèmes d'eau douce. L'Evaluation d'Empreinte Eau se réfère à une variété de méthodes pour quantifier et tracer l'empreinte eau des processus, produits, producteurs ou consommateurs spécifiques, afin d'évaluer la durabilité environnementale, sociale et économique de l'empreinte eau au niveau de captation ou de bassin fluvial et pour formuler et évaluer l'efficacité des stratégies visant à réduire l'empreinte eau dans des endroits prioritaires. L'empreinte eau d'un produit est le volume d'eau douce utilisé pour fabriquer le produit, mesurée sur la chaîne d'approvisionnement complète [6]. Trois composantes différentes de l'empreinte eau sont distinguées: verte, bleue et grise. L'empreinte eau verte est le volume d'eau de pluie évaporée ou incorporée dans le produit. L'eau bleue se réfère au volume des eaux de surface ou des eaux souterraines évaporé, incorporé dans le produit ou renvoyé vers un autre bassin fluvial ou vers la mer. L'empreinte eau grise concerne la pollution et est définie comme le volume d'eau douce requis pour diluer les polluants dans des proportions suffisantes pour que la qualité de l'eau corresponde aux normes en vigueur [6]. Le volume total d'eau douce consommée ou polluée sur le territoire d'une nation à la suite des activités dans les différents secteurs de l'économie est appelé l'empreinte eau de la production nationale. Le commerce international des produits crée des «flux d'eau virtuelle» sortant et entrant dans un pays. L'exportation d'eau virtuelle d'une nation se réfère à l'empreinte eau des produits exportés. L'importation d'eau virtuelle dans une nation se réfère à l'empreinte eau des produits importés.

Plusieurs auteurs ont évalué l'empreinte eau et la balance commerciale de l'eau virtuelle des nations et des régions et soulignent la pertinence de l'outil pour une politique de l'eau éclairée au niveau national et de bassin fluvial [7]-[10]. Dans une étude de cas pour une région espagnole, Aldaya *et al.* [10] concluent que les analyses de l'empreinte eau peuvent fournir un cadre transparent pour identifier des alternatives potentiellement optimales pour l'utilisation efficace de l'eau au niveau du bassin fluvial et que cela peut être très utile pour parvenir à une attribution efficace de l'eau et des ressources économiques dans la région. Chahed *et al.* [8] soulignent que l'intégration de toutes les ressources en eau à l'échelle

nationale, y compris l'eau verte utilisée dans l'agriculture pluviale et dans le cadre de la balance commerciale des produits alimentaires, est indispensable pour faire face aux grands défis de la sécurité alimentaire dans les pays arides.

L'objectif de cette étude est d'explorer la valeur ajoutée de l'analyse de l'empreinte eau des activités au Maroc et les flux virtuels d'eau en provenance et à destination du Maroc dans la formulation de la politique nationale de l'eau. L'étude comprend une Evaluation d'Empreinte Eau des activités au Maroc (au niveau du bassin fluvial et sur une échelle mensuelle) et la balance commerciale de l'eau virtuelle du pays et, sur cette base, des options de réponse sont formulées pour réduire l'empreinte eau au Maroc, atténuer la pénurie d'eau et attribuer les ressources en eau de manière plus efficiente. Les résultats et les conclusions de l'Evaluation d'Empreinte Eau sont comparés à la portée de l'analyse, et les plans d'action inclus dans la stratégie nationale de l'eau du Maroc et les plans d'aménagement des bassins fluviaux afin d'adresser la valeur ajoutée de l'Evaluation d'Empreinte Eau relativement à ces plans existants.

L'empreinte eau du Maroc n'a pas été évaluée précédemment au niveau du bassin fluvial sur une échelle mensuelle. Le Maroc a été inclus dans un certain nombre d'études mondiales, mais ces études n'ont pas analysé la variabilité spatiale et temporelle de l'empreinte eau dans ce pays [11]-[13]. En outre, cette étude est la première à inclure des estimations précises des pertes par évaporation issues du réseau d'irrigation et issues des réservoirs de stockage dans le cadre d'une Evaluation d'Empreinte Eau complète. En conclusion, elle est nouvelle en fournissant des évaluations quantitatives des économies potentielles d'eau par la relocalisation partielle de la production végétale aux régions où la consommation d'eau par tonne de récolte est inférieure en moyennant d'une optimisation et en ramenant les empreintes eau des cultures à des niveaux de repère.

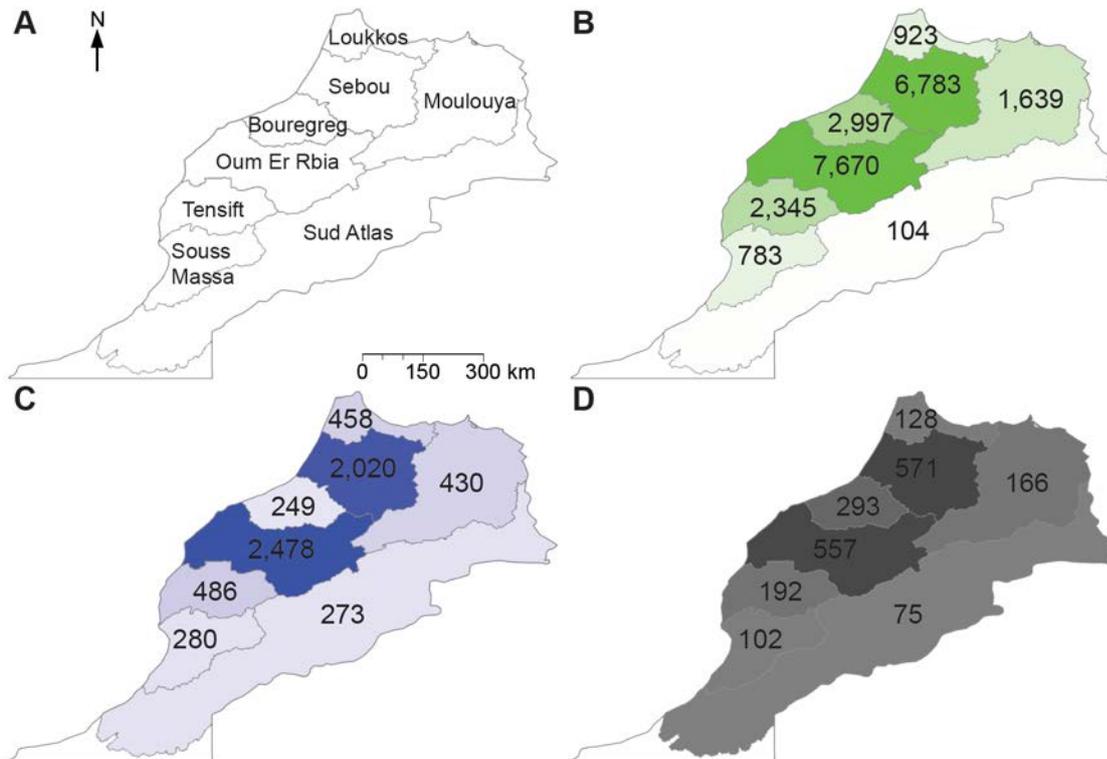
Plusieurs idées et options de réponse ont émergé de l'Evaluation d'Empreinte Eau, qui ne sont actuellement pas prises en compte dans la stratégie nationale de l'eau du Maroc et les plans de bassins fluviaux du pays. Par conséquent, l'Evaluation d'Empreinte Eau est considérée avoir une valeur ajoutée pour la formulation de la politique nationale de l'eau au Maroc.

## Méthode et Données

### Empreinte Eau de la Production du Maroc

Cette étude suit la terminologie et la méthodologie mises au point par Hoekstra *et al.* [6]. L'empreinte eau de la production du Maroc est estimée au niveau du bassin fluvial sur une échelle mensuelle pour les activités incluses dans le Tableau 1. Les bassins sont choisis de telle sorte qu'ils coïncident avec les zones d'action des agences de bassin du Maroc (Figure 1A). En raison de limites en matière de données, l'empreinte eau grise est analysée sur une échelle annuelle et les empreintes eau du pâturage et de l'approvisionnement en eau des animaux sont analysées au niveau national et annuel. L'étude considère les conditions climatiques, de production et les conditions commerciales moyennes sur la période 1996-2005. Les empreintes eau de l'agriculture, de l'industrie et des ménages sont obtenues auprès de Mekonnen et Hoekstra [13], [14], qui a estimé ces paramètres à l'échelle mondiale à une résolution spatiale de minutes d'arc 5 sur 5. Les estimations de l'empreinte eau bleue annuelles pour les industries et les ménages par Mekonnen et Hoekstra [13] sont réparties tout au long

de l'année en fonction de la distribution mensuelle de l'approvisionnement public en eau obtenue auprès du ministère EMEE (données non publiées 2013). Ces distributions sont disponibles pour les bassins du Loukkos, Sebou, Bouregreg et Oum Er Rbia. Pour les autres bassins, une moyenne de ces distributions est prise.



**Figure 1. Empreinte eau de la production du Maroc par bassin fluvial.** Période: 1996-2005. Les bassins fluviaux du Maroc (A) et l'empreinte eau totale verte (B), bleue (C) et grise (D) de la production du Maroc par bassin fluvial (en Mm<sup>3</sup>/an)

**Tableau 1.** Estimations de l'empreinte eau incluses dans cette étude.

Empreinte eau	Composants	Période	Source
de la production végétale	verte, bleue, grise	1996-2005	[14]
du pâturage	verte	1996-2005	[13]
de l'approvisionnement en eau des animaux	bleue	1996-2005	[13]
de la production industrielle	bleue, grise	1996-2005	[13]
de l'approvisionnement en eau domestique	bleue, grise	1996-2005	[13]
des réservoirs de stockage	bleue	-	élaboration par les auteurs
du réseau d'alimentation d'irrigation	bleue	1996-2005	élaboration par les auteurs

L'empreinte eau mensuelle des réservoirs de stockage (en m<sup>3</sup>/an) est calculée comme étant l'évaporation de l'eau libre (en m<sup>3</sup>/an) multiplié par la superficie de la surface des réservoirs de stockage (en m<sup>2</sup>). Les données relatives à évaporation ouverte de l'eau à partir des réservoirs dans les bassins du Loukkos, Sebou, Bouregreg et Oum Er Rbia sont obtenues auprès du Ministère EMEE (données non publiées de 2013) et pour les autres bassins à partir d'un

modèle de simulation avec le modèle hydrologique global PCR-GLOBWB réalisé par Sperna Weiland *et al.* [15]. La surface des réservoirs au niveau de stockage supérieure est dérivée du ministère EMEE (données non publiées de 2013) et de la FAO [16]. Puisque les niveaux de stockage varient tout au long de l'année (et au cours des années), et les zones réservoirs en conséquence, ce qui donne une surestimation de l'évaporation des réservoirs. Pour remédier à cette surestimation, et en raison du manque de données sur les niveaux de stockage mensuelles et la superficie des réservoirs, pour tous les mois une fraction de l'évaporation au niveau de stockage supérieure (43%) est prise comme estimation de l'empreinte eau des réservoirs de stockage. Cette fraction représente la superficie moyenne du réservoir en tant que fraction de sa surface au niveau de stockage supérieur, calculée comme étant la moyenne des réservoirs dans les bassins du Loukkos, Sebou, Bouregreg et Oum Er Rbia pour lesquels des données sur la surface à différents niveaux des réservoirs sont disponibles auprès du ministère EMEE (données non publiées de 2013).

L'empreinte eau du réseau d'alimentation d'irrigation se réfère à la perte par évaporation dans le réseau et est estimée en fonction d'un facteur  $K$ , qui est défini comme le ratio de l'empreinte eau bleue du réseau d'irrigation de l'offre devisé par l'empreinte eau bleue de surface de la production végétale au niveau du terrain (c'est à dire la culture de l'évapotranspiration de l'eau d'irrigation provenant de l'eau de surface). L'empreinte eau bleue de la production végétale au niveau du terrain est tiré de Mekonnen et Hoekstra [14] et la répartition de l'eau de surface est faite en fonction de la fraction de l'eau d'irrigation retirée des eaux de surface (par opposition aux eaux souterraines) par bassin fluvial sur la base de données des plans de bassins fluviaux associés.  $K$  est calculée en tant que:

$$K = \left[ \frac{1}{e_a \times e_c} - \frac{1}{e_a} \right] \times f_E$$

dans lequel  $e_a$  représente l'efficacité de l'application sur le terrain,  $e_c$  l'efficacité du canal d'irrigation et  $f_E$  la fraction des pertes dans le réseau de canaux d'irrigation qui s'évapore (par opposition aux percolats). Les efficacités d'irrigation  $e_a$  et  $e_c$  sont estimées sur la base de données d'une agence de bassin locale et de la FAO [17]. La valeur de  $f_E$  est supposée être de 50%. La résultante  $K$  pour l'agriculture irriguée au Maroc dans son ensemble est de 15%, c'est à dire que la perte par évaporation à partir du réseau d'alimentation en eau d'irrigation représente un volume égal à 15% de l'empreinte eau bleue de surface de la production végétale au niveau du terrain en moyenne.

## Empreinte Eau et Productivité Economique d'Eau et de Terres des Cultures

L'empreinte eau des cultures par unité de production (en m<sup>3</sup>/tonne) est calculée en divisant l'empreinte eau par hectare (en m<sup>3</sup>/ha/an) par le rendement (en tonne/ha/an), pour lesquels les données sont obtenues auprès de Mekonnen et Hoekstra [14]. La productivité économique de l'eau (en US\$/m<sup>3</sup>) représente la valeur économique de la production végétale par unité d'eau consommée et est calculée comme le prix moyen à la production pour la période 1996-2005 (en US\$/tonne) obtenu auprès de la FAO [18] divisé par la somme de l'empreinte eau verte et bleu (en m<sup>3</sup>/tonne). De même, la productivité économique des terres (en US\$/ha) représente la

valeur économique de la production végétale par hectare de terre récoltée et est calculée en multipliant le prix à la production par le rendement des cultures (en tonne/ha), qui est également obtenu auprès de Mekonnen et Hoekstra [14].

### Les Flux d'Eau Virtuelle et la Valeur Economique Associés

Les flux d'eau virtuelle vert, bleu et gris liés à l'importation et l'exportation de produits agricoles et industriels pour la période 1996-2005 du Maroc sont obtenus auprès de Mekonnen et Hoekstra [13], qui estime ces flux à l'échelle mondiale, sur la base de matrices du commerce et de l'empreinte eau des produits échangés, au niveau des emplacements d'origine. L'exportation d'eau virtuelle qui provient de ressources en eau domestique (une autre partie est réexportation) est estimée en fonction de la part relative de l'importation d'eau virtuelle au budget total de l'eau:

$$V_{e,dom.res.} = \frac{WF_{national}}{V_i + WF_{national}} \times V_e$$

dans laquelle  $WF_{national}$  est l'empreinte eau au sein de la nation,  $V_i$  l'importation d'eau virtuelle et  $V_e$  l'exportation d'eau virtuelle.

Le revenu moyen par unité d'eau exportée (en US\$/m<sup>3</sup>) est calculé en divisant la valeur des exportations (en US\$/an) par l'exportation d'eau virtuelle (en m<sup>3</sup>/an). De même, le coût unitaire de l'importation d'eau virtuelle est calculé en divisant la valeur des importations (en US\$/an) par l'importation d'eau virtuelle (en m<sup>3</sup>/an). La valeur économique moyenne de l'importation et de l'exportation pour la période 1996-2005 est tirée des statistiques pour l'analyse du commerce international (SITA) de la base de données du Centre du Commerce International [19].

### Empreinte Eau en face de la Disponibilité de l'Eau et Capacité d'Assimilation des Déchets

Pour évaluer la durabilité de l'environnement de l'empreinte eau au Maroc, l'empreinte eau bleue totale de la production (des eaux de surface ainsi que des eaux souterraines) est placée dans le contexte de l'écoulement naturel mensuel et de l'empreinte eaux souterraines dans le contexte de la disponibilité annuelle des eaux souterraines. L'eau nécessaire pour assimiler les engrais azotés qui atteignent les systèmes d'eau par lessivage est comparée à la capacité d'assimilation des déchets des aquifères.

L'empreinte eaux souterraines est calculée en divisant l'empreinte eau bleue de la production agricole, la production industrielle et l'approvisionnement en eau domestique selon la fraction prélevée dans les eaux souterraines par bassin fluvial sur la base des données issues des plans de bassins fluviaux associés. En supposant qu'aucune partie de l'eau prélevée dans les eaux souterraines pour la production industrielle et l'eau domestique ne retourne (propre) dans la nappe phréatique dans le même laps de temps, les empreintes eaux souterraines de ces fins sont augmentées afin d'égaliser les prélèvement d'eau (par opposition à la consommation) en les divisant par les fractions de consommation prises en tant qu'hypothèse par Mekonnen et Hoekstra [13]: 5% pour les industries et 10% pour les ménages.

Les données relatives à l'écoulement moyen à long terme naturel mensuel (1980-2011) pour les bassins du Loukkos, du Sebou, du Bouregreg et de l'Oum Er Rbia sont dérivées du ministère EMEE (données non publiées de 2013). L'écoulement naturel est estimé en tant que l'afflux de réservoirs. Il est considéré comme l'écoulement non appauvri, puisque les prélèvements d'eau bleue à grande échelle proviennent des réservoirs. Pour les autres bassins, les eaux de l'écoulement moyen annuel naturel à long terme sont dérivées des plans de bassin pour les bassins fluviaux respectifs et par la suite réparties sur les mois en fonction de la configuration des précipitations intra-annuelles [20], [21] ou l'écoulement naturel mensuel [22]. En raison du manque de données, pour le bassin du Souss Massa, la même variation mensuelle est appliquée comme pour le bassin de Tensift adjacent. La disponibilité de l'eau souterraine est évaluée à l'échelle des bassins fluviaux et définie comme la recharge par infiltration des eaux de pluie et des rivières, moins l'évaporation directe des aquifères. Ces données sont obtenues à partir des plans des bassins fluviaux et auprès de Laouina [23] pour le bassin du Souss Massa.

La pénurie de l'eau bleue est définie comme le ratio de l'empreinte eau bleue totale dans un bassin fluvial par la disponibilité de l'eau bleue dans ce bassin [6]. Dans cette étude, ce ratio est calculé comme étant l'empreinte eau bleue totale divisé par l'écoulement naturel mensuel et comme étant l'empreinte eaux souterraines divisé par la disponibilité annuelle des eaux souterraines. A la suite d'Hoekstra *et al.* [24], les valeurs de la pénurie de l'eau bleue ont été classées en quatre niveaux de pénurie. Le classement dans cette étude correspond à leur classement, en soulignant que l'étude ne tient pas compte des exigences des flux environnementaux dans la définition de la disponibilité de l'eau bleue, car elles ne sont généralement pas prises en compte dans les plans de bassins fluviaux du Maroc, et par ailleurs les études locales relatives au niveau de ces exigences font défaut. Ceci est compensé par l'utilisation de valeurs seuils plus strictes pour les différents niveaux de pénurie, de sorte que le système résultant soit équivalent à celui de Hoekstra *et al.* [24]:

- pénurie faible de l'eau bleue ( $<0,20$ ): l'empreinte eau bleue est inférieure à 20% de l'écoulement naturel; l'écoulement de la rivière est intact ou peu modifié.
- pénurie modéré de l'eau bleue ( $0,20-0,30$ ): l'empreinte eau bleue se situe entre 20 et 30% du écoulement naturel; l'écoulement est modérément modifié.
- pénurie significative de l'eau bleue ( $0,30-0,40$ ): l'empreinte eau bleue se situe entre 30 et 40% de l'écoulement naturel; l'écoulement est modifié de façon significative.
- pénurie sévère de l'eau ( $>0,40$ ): l'empreinte eau bleue mensuelle dépasse 40% de l'écoulement naturel, si l'écoulement est sérieusement modifié.

Le niveau de pollution de l'eau est défini comme l'empreinte eau grise totale dans un bassin fluvial divisée par la capacité d'assimilation des déchets [6]. En d'autres termes, il montre la fraction de l'écoulement réel qui est nécessaire pour diluer les polluants afin de répondre aux normes de la qualité d'eau en vigueur. Un niveau supérieur à 1 de la pollution de l'eau signifie que les normes de qualité de l'eau en vigueur sont violées. L'empreinte eau grise liée aux nitrates de la production végétale, telle que calculée dans cette étude, est supposée contribuer essentiellement à la pollution des eaux souterraines et est donc comparée avec la capacité d'assimilation des déchets des eaux souterraines. En tant que mesure de celle-ci, on utilise la

disponibilité réelle de l'eau souterraine, calculée en tant que disponibilité (naturelle) de l'eau souterraine moins l'empreinte eaux souterraines.

## Relocalisation de la Production Végétale et Réduction des Empreintes Eau des Cultures à des Niveaux de Repère

Les économies potentielles d'eau qui pourraient être réalisées en changeant le modèle de production végétale dans les bassins fluviaux (ce qui est possible en raison de différences spatiales dans la consommation d'eau des cultures) sont quantifiées à l'aide d'un modèle d'optimisation. L'empreinte eau totale verte plus bleue de douze cultures principales dans le pays (en Mm<sup>3</sup>/an) sont minimisées en modifiant la répartition spatiale de la production (en tonnes/an) sur les bassins fluviaux soumis à des contraintes de demande de production (en tonnes/an) et à la disponibilité des terres (en ha/an). Les cultures analysées sont: les amandes, l'orge, les dattes, les raisins, le maïs, les olives, les oranges, les betteraves à sucre, canne à sucre, les mandarines, les tomates et le blé. Les résultats sont comparés à un scénario de référence, qui correspond à l'empreinte eau verte plus bleue moyenne des récoltes examinées au cours de la période 1996-2005. La disponibilité des terres est limitée par bassin fluvial et prise comme étant égale à la superficie récoltée moyenne au cours de la période 1996-2005 obtenue auprès de Mekonnen et Hoekstra [14]. Deux cas sont distingués: 1) toutes les cultures peuvent être relocalisées; 2) seules les cultures annuelles (l'orge, le maïs, les betteraves à sucre, les tomates et le blé) peuvent être relocalisées ailleurs, mais les cultures vivaces ne peuvent pas l'être. Dans les deux cas, une restriction est imposée selon laquelle la production nationale totale par culture (en tonnes/an) doit être égale (ou supérieure) à la production nationale totale de la récolte dans le cas de base, qui est définie comme la production moyenne au cours de la période 1996-2005 obtenue auprès de Mekonnen et Hoekstra [14].

En outre, une évaluation est faite des économies potentielles d'eau en réduisant l'empreinte eau des douze cultures principales jusqu'à certains niveaux de repère. Pour chaque bassin et culture, un repère est définie sous la forme de la plus faible consommation d'eau (verte plus bleue) de cette culture qui est réalisée dans un bassin fluvial comparable au Maroc. Dans ce cas, les bassins sont considérés comme comparables lorsque l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub> en mm/an) est du même ordre de grandeur (voir Tableau 2). L'évapotranspiration de référence exprime le pouvoir d'évaporation de l'atmosphère à un endroit précis (et moment de l'année) et ne considère pas les caractéristiques des cultures et facteurs pédologiques [6]. Les différences dans les conditions du sol et de développement ne sont donc pas prises en compte.

**Tableau 2.** Comparaison des bassins fluviaux sur la base de l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub> en mm/an, période: 1961-1990).

n°	Bassin fluvial	ET <sub>0</sub> (mm/an)	Considéré comparable à n°
1	Sud Atlas	1 652	-
2	Souss Massa	1 450	3
3	Moulouya	1 409	2
4	Tensift	1 389	5
5	Oum Er Rbia	1 387	4
6	Sebou	1 266	7,8
7	Bouregreg	1 239	6,8
8	Loukkos	1 212	6,7

## Résultats

### Empreinte Eau de la Production du Maroc

L'empreinte eau totale de la production du Maroc au cours de la période 1996-2005 était de 38,8 Gm<sup>3</sup>/an (77% verte, 18% bleue, 5% grise), voir Tableau 3. La production végétale est le principal contributeur à cette empreinte eau, ce qui représente 78% de toute l'eau verte consommée, 83% de toute l'eau bleue consommée (pertes par évaporation dans le réseau d'alimentation en eau d'irrigation incluses) et 66% du volume total d'eau polluée. Les pertes par évaporation issues des réservoirs de stockage sont estimées à 884 Mm<sup>3</sup>/an, soit 13% de l'empreinte eau bleue totale au Maroc. Pour la plupart des réservoirs, ces pertes sont finalement liées à l'agriculture irriguée et dans certains cas, à l'approvisionnement en eau potable.

**Tableau 3.** Empreinte eau de la production du Maroc au cours de la période 1996-2005 (en Mm<sup>3</sup>/an).

Empreinte eau	Verte	Bleue	Grise	Totale
de la production végétale <sup>a)</sup>	23 245	5 097	1 378	29 719
du pâturage <sup>a)</sup>	6 663	-	-	6 663
de l'approvisionnement en eau des animaux <sup>a)</sup>	-	151	-	151
de la production industrielle <sup>a)</sup>	-	18	69	88
de l'approvisionnement en eau domestique <sup>a)</sup>	-	125	640	765
des réservoirs de stockage <sup>b)</sup>	-	884	-	884
du réseau d'alimentation d'irrigation <sup>b)</sup>	-	549	-	549
<b>totale</b>	<b>29 908</b>	<b>6 824</b>	<b>2 087</b>	<b>38 819</b>

Source: <sup>a)</sup> [13] <sup>b)</sup> Elaboration par les auteurs

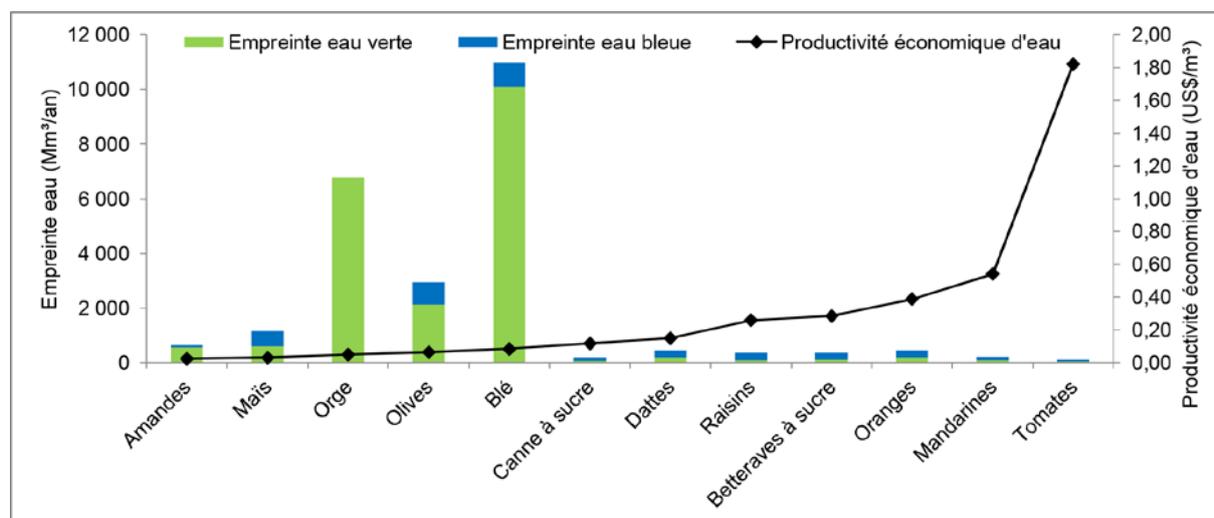
Les plus grandes empreintes eau (verte, bleue et grise) se trouvent dans les bassins de l'Oum Er Rbia et Sebou, les bassins contenant les principales régions agricoles du Maroc (voir Figure 1B-D). Ensemble, ces deux bassins représentent 63% de l'empreinte eau totale de la

production nationale. En général, l'empreinte eau verte est la plus grande au cours de la période des pluies de décembre à mai, tandis que l'empreinte eau bleue est la plus grande au cours de la période d'avril-septembre lorsque l'utilisation de l'eau d'irrigation augmente.

Dans les bassins du Bouregreg et du Loukkos, l'évaporation issue des réservoirs de stockage représente respectivement 45% et 55% de l'empreinte eau bleue totale. L'agriculture irriguée est le plus grand consommateur d'eau bleue dans les autres bassins, mais l'évaporation des réservoirs de stockage est également importante dans ces bassins. Les principales cultures irriguées dans le bassin de l'Oum Er Rbia sont le maïs, le blé, les olives et les betteraves à sucre, qui représentent ensemble 60% de l'eau totale d'irrigation consommée au cours de la période 1996-2005. Dans le bassin de Sebou, 56% de l'empreinte eau bleue de la production végétale concerne l'irrigation du blé, des olives, de la betterave à sucre, de la canne à sucre et des graines de tournesol.

## Empreinte Eau et Productivité Economique d'Eau et des Terres des Principales Cultures

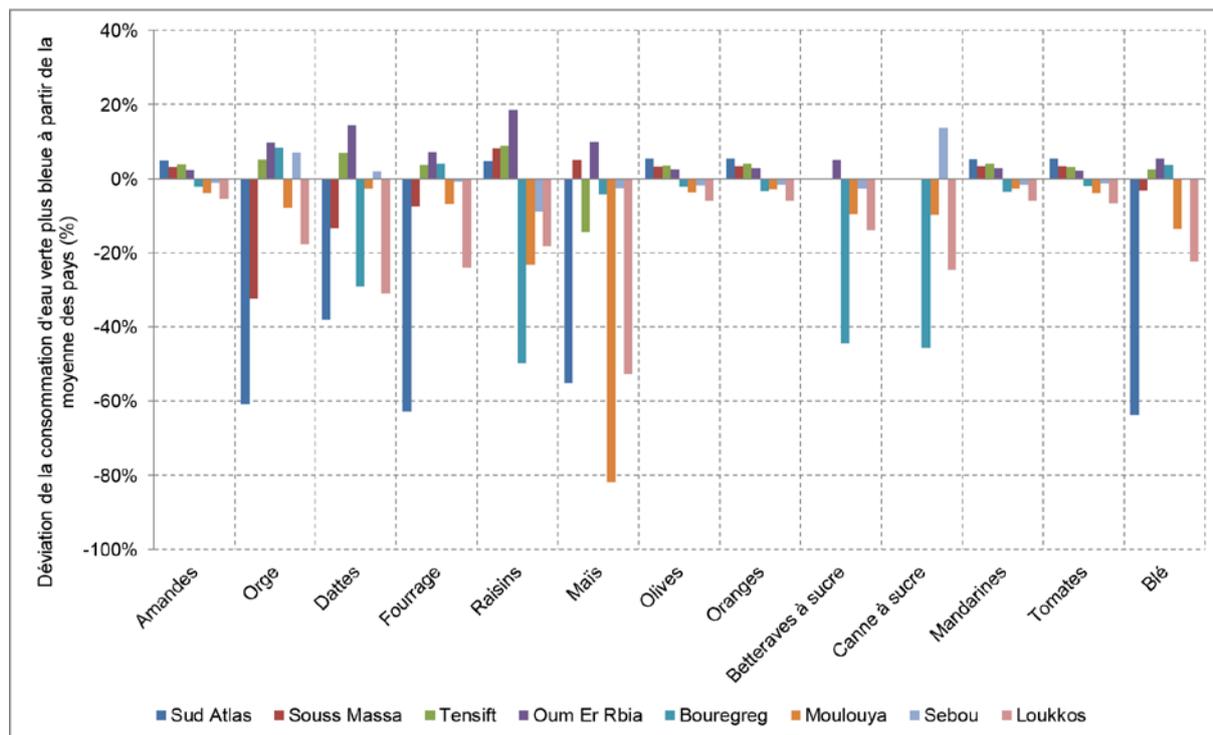
Au cours de la période 1996-2005, une bonne partie de l'eau verte a été consommée par la production de blé, d'orge et d'olives (Figure 2). Les plus grandes empreintes eau bleue se rapportent à la production de blé, d'olives et de maïs. Pour le blé, la culture numéro 1 consommatrice d'eau bleue était à son plus haut niveau au cours de la période mars-mai et a atteint un sommet en avril.



**Figure 2. Productivité économique de l'eau et empreinte eau verte et bleue des principales cultures au Maroc.** Période: 1996-2005. Source: Empreinte eau provenant de Mekonnen et Hoekstra [14], prix à la production provenant de la FAO [18].

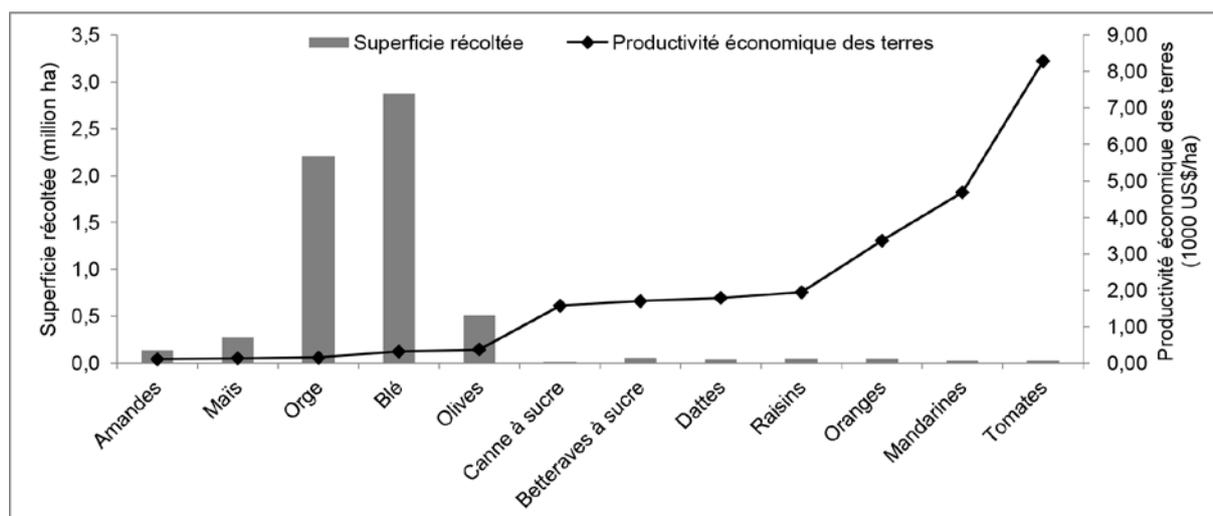
La consommation d'eau des cultures (verte, plus bleue, en m³/tonne) varie de façon significative par bassin fluvial en raison de différences dans les conditions climatiques. En général, la consommation d'eau des cultures est au-dessus de la moyenne du pays dans les bassins de l'Oum Er Rbia et du Tensift et au-dessous de la moyenne du pays dans les bassins du nord du Bouregreg, du Sebou, du Loukkos et de la Moulouya (Figure 3). Dans les bassins du Sud Atlas et du Souss Massa, le tableau n'est pas si clair, avec certaines cultures ayant des

empreintes eau moyennes au-dessus de la moyenne du pays et d'autres ayant des empreintes eau au-dessous de la moyenne du pays (en m<sup>3</sup>/tonne).



**Figure 3. Variation de la consommation d'eau verte plus bleue (en m<sup>3</sup>/tonne) dans les bassins fluviaux. Période: 1996-2005.**

Les cinq cultures ayant consommé le plus d'eau verte et bleu au cours de la période 1996-2005 sont les cultures ayant la plus faible productivité économique de l'eau, allant de 0,08 US\$/m<sup>3</sup> pour le blé à seulement 0,02 US\$/m<sup>3</sup> pour les amandes (Figure 2). La production de tomates a produit 22 fois plus de valeur par goutte que la production de blé. Les cinq mêmes cultures ont également les plus faibles productivités économiques des terres, allant de 375 US\$/ha pour les olives à 112 US\$/ha pour les amandes (Figure 4). La valeur la plus élevée par hectare cultivé a été obtenue par la production de tomates.



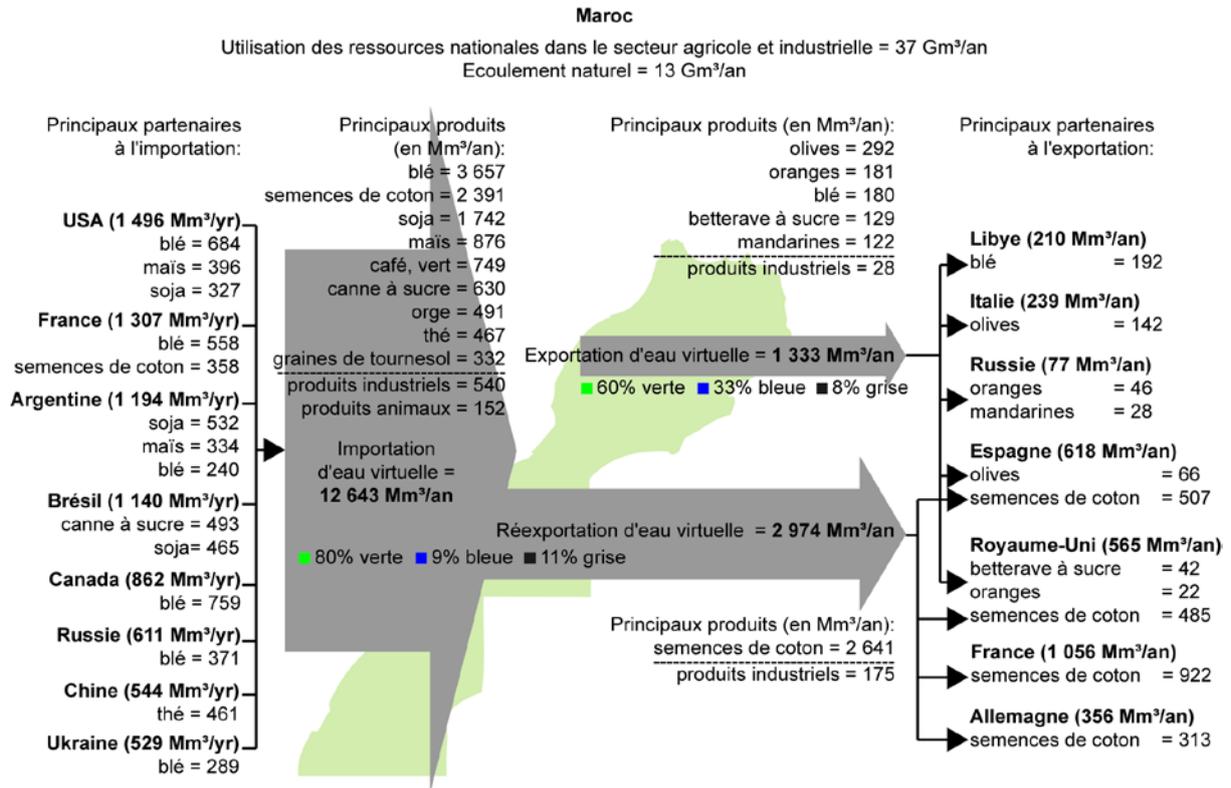
**Figure 4. Productivité économique des terres et superficie récoltée des principales cultures au Maroc.** Période: 1996-2005. Source: Surface récoltée et rendement provenant de Mekonnen et Hoekstra [14], prix à la production provenant de la FAO [18].

## Balance Commerciale de l'Eau Virtuelle du Maroc

La balance commerciale de l'eau virtuelle du Maroc pour la période 1996-2005 est indiquée au Figure 5. Les importations d'eau virtuelle dépassent les exportations, ce qui fait du Maroc un importateur net d'eau virtuelle. Seuls 31% de l'exportation d'eau virtuelle proviennent des ressources en eau du Maroc, les autres 69% sont liés à la réexportation de l'eau virtuelle importée. Par l'importation de produits au lieu de les produire au pays, le Maroc a économisé 27,8 Gm<sup>3</sup>/an d'eau domestique (75% verte, 21% bleue et 4% grise) au cours de la période 1996-2005, ce qui équivaut à 72% de l'empreinte eau au Maroc.

La valeur de l'eau virtuelle totale importée au cours de la période 1996-2005 a été de 12,4 milliards US\$/an. Les importations de produits industriels ont représenté 83%, les importations de produits végétaux 16% et les importations de produits animaux 1%. Le coût moyen des produits importés par unité d'eau virtuelle importée était de 0,98 US\$/m<sup>3</sup>. La valeur de l'eau virtuelle totale exportée dans cette période a été de 7,1 milliards US\$/an (produits industriels: 51%, produits végétaux: 48%, produits animaux: 1%). Le revenu moyen des produits exportés par unité d'eau virtuelle exportée était de 1,66 US\$/m<sup>3</sup>.

Le volume total de l'eau du Maroc pratiquement exporté hors du pays (à l'exclusion de la réexportation) au cours de la période 1996-2005 est estimé à 1333 Mm<sup>3</sup>/an. Cela signifie que près de 4% de l'eau utilisée dans le secteur agricole et industrielle du Maroc est utilisé pour la fabrication de produits d'exportation. Le reste est utilisé pour fabriquer des produits qui sont consommés par les habitants du Maroc. L'exportation virtuelle d'eau bleue provenant de ressources du Maroc était de 435 Mm<sup>3</sup>/an, ce qui est équivalent à 3,4% de l'écoulement naturel moyen à long terme (13 Gm<sup>3</sup>/an).



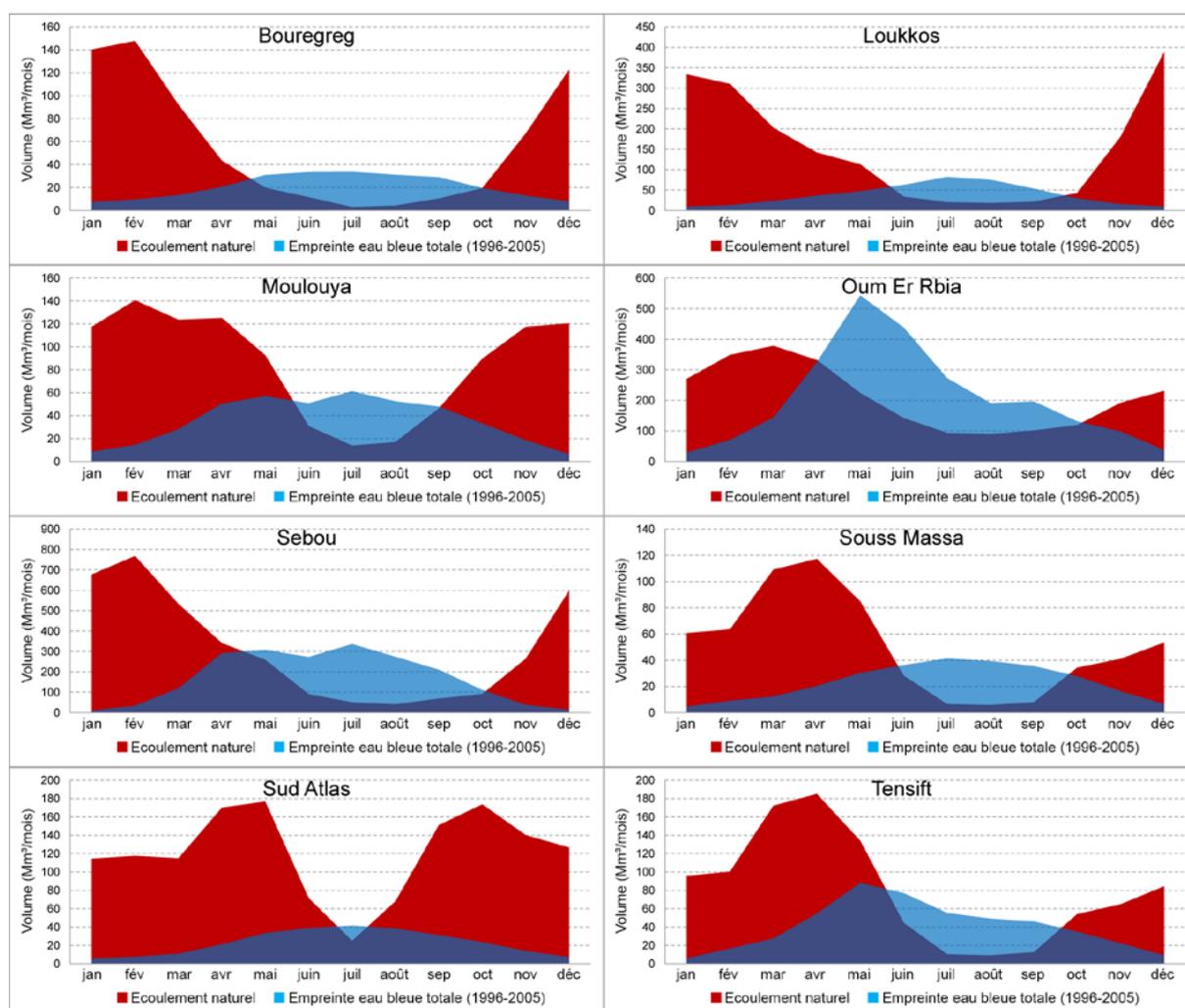
**Figure 5. Balance commerciale de l'eau virtuelle du Maroc liée au commerce des produits agricoles et industriels.** Période: 1996-2005. Source: Importation d'eau virtuelle et exportation d'eau virtuelle (totale) provenant de Mekonnen et Hoekstra [13].

La plupart de l'exportation d'eau virtuelle à partir des ressources du Maroc rapporte relativement peu de devises par unité d'eau virtuelle exportée. L'exportation de produits agricoles a représenté la plus grande part dans l'exportation d'eau virtuelle à partir des ressources en eau du Maroc (1305 Mm<sup>3</sup>/an), rapportant 0,87 US\$/m<sup>3</sup> en moyenne. Les produits agricoles spécifiques associés à une grande exportation d'eau virtuelle d'origine marocaine sont les olives, les oranges, le blé, la betterave à sucre et les mandarines. Sur ces produits, la seule exportation de mandarines (122 Mm<sup>3</sup>/an) a rapporté une valeur (1,37 US\$/m<sup>3</sup>) plus grande que la moyenne pour les produits végétaux (0,87 US\$/m<sup>3</sup>). D'autre part, les exportations d'eau virtuelle liées aux tomates marocaines (24 Mm<sup>3</sup>/an) ont généré 7,13 US\$/m<sup>3</sup>.

## Empreinte Eau en face de la Disponibilité de l'Eau et Capacité d'Assimilation des Déchets

La pénurie d'eau bleue se manifeste au cours de certains mois de l'année (Figure 6; Tableau 4). La pénurie d'eau moyenne mensuelle indique une sévère pénurie d'eau, plus sévère que ce que les valeurs de pénurie de l'eau annuelles (totales) suggèrent. Dans tous les bassins, l'empreinte eau bleue totale dépasse l'écoulement naturel pendant une période importante de l'année. Au cours des mois de juin, de juillet et d'août, une sévère pénurie d'eau se produit dans tous les bassins fluviaux. Les cultures ayant une grande empreinte eau bleue en juillet sont: la betterave à sucre dans l'Oum Er Rbia et le Sebou; les raisins dans les bassins du Sud Atlas, Souss Massa et de l'Oum Er Rbia; les dates dans l'Oum Er Rbia et le Sebou; les graines

de tournesol dans le bassin du Sebou; le maïs dans le bassin de l'Oum Er Rbia. La demande en eau potable connaît un pic au cours des mois de juin, juillet et août, lié au tourisme, et l'évaporation issue des réservoirs de stockage est grande au cours de ces mois en raison du fort pouvoir d'évaporation de l'atmosphère. L'écoulement annuel dans le bassin de l'Oum Er Rbia est presque entièrement consommé (les transferts d'eau entre bassins ne sont pas encore pris en compte), ce qui soulève la question de savoir s'il est sage d'exporter de l'eau à partir de ce bassin vers les bassins de Bouregreg et Tensift comme cela est pratique courante.



**Figure 6. Empreinte eau bleue totale et de l'écoulement naturel par bassin fluvial.** Période de l'empreinte eau bleue: 1996-2005. L'écoulement naturel est estimé en tant que l'apport moyen à long terme des réservoirs. Il est considéré comme étant l'écoulement non appauvri, puisque les prélèvements d'eau bleue à grande échelle proviennent des réservoirs. Les estimations peuvent être considérées comme prudentes, car les précipitations nettes dans les zones en aval des réservoirs ne sont pas incluses.

**Tableau 4.** Pénurie d'eau bleue par bassin fluvial.

Bassin fluv.	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Tot	Moy
Bouregreg	0,05	0,06	0,14	0,47	1,57	2,89	11,3	7,30	2,78	1,01	0,19	0,06	0,37	2,32
Loukkos	0,03	0,04	0,12	0,25	0,42	1,85	4,04	4,11	2,49	0,69	0,08	0,02	0,25	1,18
Moulouya	0,07	0,10	0,23	0,40	0,62	1,65	4,41	3,09	1,03	0,37	0,16	0,05	0,41	1,02
Oum Er Rbia	0,11	0,20	0,38	0,98	2,42	3,08	2,91	2,14	1,93	1,10	0,51	0,16	0,98	1,33
Sebou	0,02	0,04	0,22	0,86	1,19	3,01	6,66	6,72	3,05	1,21	0,14	0,02	0,53	1,93
Souss Massa	0,07	0,14	0,11	0,17	0,36	1,28	6,35	6,82	4,45	0,81	0,40	0,12	0,46	1,76
Sud Atlas	0,05	0,07	0,09	0,12	0,19	0,54	1,67	0,56	0,21	0,14	0,10	0,06	0,19	0,32
Tensift	0,06	0,16	0,16	0,29	0,66	1,72	5,39	5,40	3,66	0,64	0,34	0,11	0,50	1,55
Totale	0,05	0,09	0,22	0,56	1,03	2,23	4,15	2,98	1,55	0,66	0,22	0,06	0,52	1,15

Pénurie de l'eau bleue est définie comme le ratio de l'empreinte eau bleue totale dans un bassin fluvial divisé par l'écoulement naturel mensuel dans ce bassin. Classification: pénurie faible de l'eau bleue (<0,20); pénurie modéré de l'eau bleue (0,20–0,30); pénurie significative de l'eau bleue (0,30–0,40); sévère pénurie de l'eau (>0,40).

L'empreinte eaux souterraines totale au Maroc constitue presque la moitié de la disponibilité du pays en termes d'eaux souterraines (Tableau 5). Le stress de l'eau souterraine est sérieux dans tous les bassins fluviaux, à l'exception des bassins du Loukkos et du Sud de l'Atlas. Dans le bassin du Bouregreg, en terme d'eaux souterraines l'empreinte eau annuelle dépasse la disponibilité. Comme cela est confirmé dans le plan de l'année 2012 pour ce bassin, la plupart des aquifères de ce bassin sont en effet surexploités, notamment les principaux aquifères de Berrechid et de la Chaouia Côtière.

**Tableau 5.** Pénurie de l'eau bleue liée aux eaux souterraines.

Bassin fluvial	Empreinte eaux souterraines (1996-2005) (Mm <sup>3</sup> /an)	Disponibilité des eaux souterraines (Mm <sup>3</sup> /an)	Pénurie de l'eau (-)	Niveau de pénurie de l'eau
Bouregreg	106	66	1,60	Sévère
Tensift	259	262	0,99	Sévère
Oum Er Rbia	510	667	0,77	Sévère
Souss Massa	219	349	0,63	Sévère
Sebou	689	1 502	0,46	Sévère
Moulouya	144	351	0,41	Sévère
Loukkos	93	377	0,25	Modéré
Sud Atlas	137	697	0,20	Modéré
Totale	2 159	4 347		

Les bassins sont triés du haut vers le bas du plus élevé à la plus faible pénurie de l'eau.

Dans le bassin du Bouregreg, il n'y a pas de capacité d'assimilation des déchets de l'eau souterraine restants (car en terme d'eaux souterraines l'empreinte eau bleue dépasse la disponibilité), qui se traduit par un niveau de pollution infini de l'eau (Tableau 6). Dans les bassins du Tensift et de l'Oum Er Rbia, la capacité d'assimilation des déchets de l'eau souterraine est également dépassée, même par 43 fois la disponibilité de l'eau souterraine

naturelle dans le bassin du Tensift. Ces résultats correspondent aux chiffres indiqués dans les plans pour ces trois bassins, qui indiquent des concentrations fortement élevées de nitrates dans les eaux souterraines (au niveau de certaines stations de mesure dépassant le seuil maximal autorisé dans l'eau potable), principalement causées par la pollution diffuse aux nitrates par l'utilisation irrationnelle d'engrais azotés, mais dans le cas de l'aquifère du Sahel-Doukkala, dans le bassin de l'Oum Er Rbia aussi par l'infiltration des eaux usées domestiques non traitées.

**Tableau 6.** Niveau de pollution de l'eau liée à nitrate-nitrogène dans les eaux souterraines.

<b>Bassin fluvial</b>	<b>Empreinte eau grise de la production végétale (1996-2005) (Mm<sup>3</sup>/an)</b>	<b>Disponibilité réelle de l'eau souterraine / Capacité d'assimilation des déchets (Mm<sup>3</sup>/an)</b>	<b>Niveau de pollution de l'eau (-)</b>	<b>Capacité d'assimilation des déchets dépassé?</b>
Bouregreg	148	0	∞	Oui
Tensift	129	3	43.2	Oui
Oum Er Rbia	435	157	2.78	Oui
Sebou	428	813	0.53	Non
Moulouya	99	207	0.48	Non
Souss Massa	51	130	0.39	Non
Loukkos	63	284	0.22	Non
Sud Atlas	25	560	0.04	Non
<b>Totale</b>	<b>1 378</b>	<b>2 188</b>	<b>0.63</b>	<b>Non</b>

Les bassins sont triés du haut vers le bas du plus élevé au plus faible niveau de pollution de l'eau.

## Réduire l'Empreinte Eau de Production Végétale au Maroc

Les différences régionales dans la consommation d'eau des cultures (Figure 3) fournissent une occasion pour la réduction de l'empreinte eau de la production végétale au Maroc. Les économies potentielles d'eau (verte, plus bleue) sont de l'ordre de 1,9 et 1,2 milliards de m<sup>3</sup> par année lorsque toutes les cultures (cas A) et lorsque seules les cultures annuelles (cas B) sont relocalisées vers les bassins fluviaux, respectivement (Tableau 7). Les économies d'eau bleue sont de l'ordre de 1276 Mm<sup>3</sup>/an dans le cas A et 697 Mm<sup>3</sup>/an dans le cas B. Il s'agit d'économies importantes lorsqu'elles sont placées dans le contexte de la stratégie nationale de l'eau du Maroc, qui comprend des plans d'action visant à mobiliser 1,7 milliard de m<sup>3</sup>/an d'ici 2030 par la construction de 60 grands et 1000 petits barrages locaux et une quantité supplémentaire de 0,8 milliard de m<sup>3</sup>/an avec le transfert d'eau entre les bassins Nord-Sud [1].

**Tableau 7.** Economies potentielles d'eau par relocalisation partielle de la production végétale par culture.

	Empreinte eau verte plus bleue dans le scénario de référence (Mm <sup>3</sup> /an)	Relocalisation partielle de toutes les cultures*		Relocalisation partielle de seules les cultures annuelles**	
		Economie (verte + bleue) (Mm <sup>3</sup> /an)	Economie relatif (%)	Economie (verte + bleue) (Mm <sup>3</sup> /an)	Economie relatif (%)
Amandes	641	14	2%	0	0%
Orge	6 787	-116	-2%	-202	-3%
Dattes	449	131	29%	0	0%
Raisins	367	183	50%	0	0%
Maïs	1 148	939	82%	939	82%
Olives	2 951	58	2%	0	0%
Oranges	440	15	3%	0	0%
Betteraves à sucre	353	157	44%	157	44%
Canne à sucre	200	91	46%	0	0%
Mandarines	209	7	3%	0	0%
Tomates	99	2	2%	2	2%
Blé	10 981	413	4%	278	3%
Totale	24 625	1 896	8%	1 174	5%

\*Toutes les cultures analysées sont: les amandes, l'orge, les dattes, les raisins, le maïs, les olives, les oranges, les betteraves à sucre, canne à sucre, les mandarines, les tomates et le blé.

\*\*Les cultures annuelles sont: l'orge, le maïs, les betteraves à sucre, les tomates et le blé.

Les plus grandes économies potentielles d'eau peuvent être obtenues par la relocalisation partielle de la production de maïs et de blé (Tableau 7), en particulier en déplaçant la production de maïs depuis le bassin de l'Oum Er Rbia vers le bassin de la Moulouya et la production de blé depuis le bassin du Bouregreg vers le bassin du Sebou. La relocalisation partielle de la production végétale dans le cas A se traduit par une empreinte eau diminuée (verte, plus bleue) dans tous les bassins, à l'exception du bassin de Bouregreg où l'empreinte eau augmente (Tableau 8). Dans le cas B, les empreintes eau dans les bassins du Bouregreg, du Sebou et du Loukkos augmentent, notamment en raison de la production de blé accrue dans ces bassins, tandis que les empreintes eau dans les autres bassins diminuent. Les précipitations dans les bassins du Sebou et du Loukkos sont généralement plus grandes que dans les autres régions du Maroc [1].

**Tableau 8.** Economies potentielles d'eau par relocalisation partielle de la production végétale par bassin fluvial.

	Empreinte eau verte plus bleue dans le scénario de référence (Mm <sup>3</sup> /an)	Relocalisation partielle de toutes les cultures*		Relocalisation partielle de seules les cultures annuelles**	
		Economie (verte + bleue) (Mm <sup>3</sup> /an)	Economie relatif (%)	Economie (verte + bleue) (Mm <sup>3</sup> /an)	Economie relatif (%)
Sud Atlas	306	189	62%	12	4%
Souss Massa	903	175	19%	14	2%
Tensift	2 525	388	15%	124	5%
Oum Er Rbia	8 498	1 229	14%	821	10%
Bouregreg	2 813	-994	-35%	-95	-3%
Moulouya	1 737	605	35%	412	24%
Sebou	6 905	154	2%	-95	-1%
Loukkos	939	151	16%	-19	-2%
Totale	24 625	1 896	8%	1 174	5%

\*Toutes les cultures analysées sont: les amandes, l'orge, les dattes, les raisins, le maïs, les olives, les oranges, les betteraves à sucre, canne à sucre, les mandarines, les tomates et le blé.

\*\*Les cultures annuelles sont: l'orge, le maïs, les betteraves à sucre, les tomates et le blé.

Le fait de réduire les empreintes eau des cultures à des niveaux de repère conduit à une économie potentielle d'eau verte plus bleue de 2768 Mm<sup>3</sup>/an, soit une réduction de 11% (Tableau 9). 52% de cette économie sont liés à une empreinte eau réduite (c'est à dire une productivité de l'eau améliorée) dans le seul bassin du Sebou. Les plus grandes économies potentielles d'eau sont associées à la réduction de l'empreinte eau des céréales, notamment le blé. Les économies d'eau bleue sont estimées à 422 Mm<sup>3</sup>/an et sont les plus importantes dans les bassins du Sebou et de l'Oum Er Rbia.

**Tableau 9.** Economies potentielles d'eau en réduisant les empreintes eau des principales cultures à des niveaux de repère.

	Oum								Totale
	Sud Atlas	Souss Massa	Ten-sift	Er Rbia	Bou-regreg	Mou-louya	Sebou	Louk-kos	
Amandes	0	2	1	0	3	0	8	0	14
Orge	0	0	0	100	158	222	238	0	717
Dattes	0	0	0	10	0	4	48	0	63
Raisins	0	20	0	5	0	0	18	4	48
Maïs	0	13	0	175	32	0	33	0	254
Olives	0	9	4	0	10	0	35	0	59
Oranges	0	1	1	0	1	0	6	0	9
Betteraves à sucre	0	0	0	0	0	0	70	4	73
Canne à sucre	0	0	0	0	0	0	79	10	89
Mandarines	0	1	0	0	0	0	3	0	4
Tomates	0	0	0	0	1	0	1	0	3
Blé	0	14	0	102	417	0	904	0	1 436
Totale (verte + bleue)	0	60	6	392	623	226	1 444	18	2 768
Totale (bleue)**	0	23	2	113	11	2	258	12	422
Totale (bleue) (% de l'écoulement naturel)	0%	4%	0%	4%	2%	0%	7%	1%	3%

\*Les cultures analysées sont: les amandes, l'orge, les dattes, les raisins, le maïs, les olives, les oranges, les betteraves à sucre, canne à sucre, les mandarines, les tomates et le blé.

\*\*Supposant que le ratio de l'eau vert par l'eau bleu reste la même pour tous les bassins et les cultures.

## Valeur Ajoutée de l'Evaluation d'Empreinte Eau pour la Politique de l'Eau au Maroc

Un bon nombre d'idées et d'options en matière de réponse ont émergé de l'Evaluation d'Empreinte Eau, qui ne sont actuellement pas prises en compte dans la stratégie nationale de l'eau du Maroc et dans les plans d'aménagement des bassins fluviaux du pays. Parmi celles-ci figurent:

- (i) De nouvelles perspectives dans le bilan hydrique du Maroc et les principaux bassins fluviaux du pays:
  - Les pertes par évaporation issues des réservoirs de stockage représentent une partie importante de l'empreinte eau bleue au Maroc. Cela jette une lumière nouvelle sur la stratégie nationale de l'eau qui se propose de construire 60 autres grands et 1000 petits barrages en 2030.

- La pénurie de l'eau bleue sur une échelle mensuelle est sévère et occultée par l'analyse annuelle de la demande par rapport à l'offre, qui est l'échelle d'analyse commune dans les plans d'aménagement des bassins fluviaux du Maroc.
- (ii) De nouvelles idées en termes de façon économiquement efficiente dont les ressources en eau et en terre sont utilisées:
- L'analyse de la valeur économique des produits végétale par unité d'eau et de terres utilisée au cours de la période 1996-2005 indique que la politique agricole peut être mieux mise en conformité avec la politique de l'eau en reconsidérant les cultures avant d'être cultivées.
  - Il est démontré que la politique d'exportation au cours de cette période n'était pas optimale du point de vue d'une gestion économique de l'eau, ce qui soulève la question de savoir si les revenus de source étrangère générés par l'exportation couvrent les coûts directs et indirects de la mobilisation et (sur-)exploitation des ressources en eau au Maroc. Cela pourrait ne pas être le cas compte tenu des coûts de la construction et de l'entretien des grands barrages et des transferts d'eau intra- et interbassins dans le pays et les coûts associés aux externalités négatives de la (sur-)consommation d'eau, tels que l'intrusion de sel dans les aquifères côtiers du Maroc.
- (iii) Nouvelles options de réponse pour réduire l'empreinte eau de la production végétale:
- L'analyse de l'empreinte eau des principales cultures au Maroc et sa variation à travers les bassins fluviaux offre de nouvelles façons de chercher à réduire la consommation d'eau dans le secteur agricole. Les économies potentielles d'eau estimées par relocalisation partielle des cultures de bassins où elles consomment moins d'eau et en réduisant les empreintes eau des cultures à des niveaux de repère sont importantes en comparaison avec les mesures de réduction de la demande et d'accroissement de l'offre envisagées dans la stratégie nationale de l'eau au Maroc.

## Discussion

L'empreinte eau au Maroc est principalement verte (77%). Ceci souligne l'importance des ressources en eau verte, mais aussi (ou surtout) dans les pays semi-arides avec une forte dépendance sur l'eau bleue, et est en accord avec d'autres études qui montrent la prédominance des flux de l'eau verte par rapport à celle de l'eau bleue en Afrique (et la plupart du monde) [25], [26]. La pertinence de l'empreinte eau verte ne doit pas être sous-estimée. Bien que la pluie est gratuite et l'évaporation qui se passe de toute façon, l'eau verte qui est utilisé dans un but ne peut pas être utilisé à d'autres fins [27].

L'évaporation dans le réservoir de stockage représente une part importante (13%) de l'empreinte eau bleue au Maroc. La nécessité du stockage saisonnier de l'eau est évidente compte tenu de la grande disparité entre l'écoulement naturel et la demande en eau (Figure 6). Cependant, la grande évaporation des réservoirs montre que ceux-ci devraient être considérés comme des consommateurs d'eau, en plus de leur rôle dans l'approvisionnement en eau. Cette

empreinte eau peut finalement être liée à la finalité du réservoir qui, pour la plupart des cas au Maroc, est principalement au service de l'agriculture irriguée. Par conséquent, pour réduire le besoin de stockage saisonnier et donc l'empreinte eau des réservoirs de stockage, il serait intéressant de prendre en compte le timing de la demande en eau des cultures par rapport à la disponibilité de l'eau naturelle dans le choix des cultures ou des variétés de cultures à développer. En outre, des solutions de recharge locales aux grands réservoirs d'eau de surface sont les barrages d'eau souterraine, qui améliorent le stockage de l'eau souterraine dans les aquifères alluviaux et perdent ainsi moins d'eau par évaporation [28].

Notre analyse montre d'un point de vue stricte d'économie de l'eau, il serait utile de revoir les cultures à développer au Maroc (en raison de la faible valeur de US\$/m<sup>3</sup> et US\$/ha pour certaines cultures par rapport aux autres). Dans la pratique, le choix de cultures à produire fait partie de la stratégie nationale en matière de sécurité alimentaire et bien sûr étroitement liée à la demande de cultures (nationales et mondiales). Néanmoins, nous considérons qu'il est utile et important d'analyser la productivité économique de l'eau et des terres (comme celui fait dans cette étude), en plus de ces considérations. Surtout pour les pays qui manquent d'eau comme le Maroc, il est pertinent d'évaluer l'efficacité économique de l'attribution de l'eau. Cela concerne également la question de savoir si les revenus étrangers générés par l'exportation des produits, qui ont une empreinte provenant des ressources nationales, dépassent les coûts directs et indirects liés à l'utilisation de ces ressources.

## Incertitudes et Limites

L'empreinte eau de production végétale est largement influencée par la base de données utilisée et les hypothèses formulées par Mekonnen et Hoekstra [14] qui peut facilement contenir une incertitude de  $\pm 20\%$  [14], [29], [30]. Les productivités économiques de l'eau et des terres calculées pour les cultures sont, outre les empreintes et les rendements eau, en fonction des prix à la production. Les variations de ces prix influencent largement la productivité économique de l'eau et des terres de cultures. Les empreintes eau de la production industrielle et l'approvisionnement en eau à usage domestique sont très sensibles aux fractions de consommation appliquées.

Bien que les chiffres sur la disponibilité de l'eau soient basés sur les données des plans de bassin et du EMEE (données non publiées de 2013), la façon dont ils sont estimés exactement est souvent pas clair d'où viens l'incertitude. Etant donné que l'écoulement naturel est estimé à partir de l'afflux des réservoirs (à l'exclusion donc des prélèvements locaux à petite échelle en amont) et que les précipitations nettes dans les zones en aval des réservoirs ne sont pas incluses, les estimations de l'écoulement naturel peuvent être considérées comme prudentes.

En général, les plans de bassins fluviaux indiquent une plus grande pression sur les ressources en eaux souterraines que celle suggéré dans cette étude. Cela pourrait être causé par le fait que les plans de bassins comprennent des prélèvements plus récents et parce que l'unité d'analyse dans cette étude (zone d'action de l'agence du bassin fluvial) est plus grande que l'unité utilisée dans les plans de bassins (aquifères individuels), de sorte que dans cette étude la surexploitation d'un aquifère peut être masquée par une faible exploitation de l'autre aquifère. Aussi la pollution des eaux souterraines locales selon les plans de bassins fluviaux est parfois pire que le niveau de pollution de l'eau estimée ici. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les mesures de la qualité de l'eau enregistrées dans les plans de bassins sont en partie

plus récentes et sont mesurées à des points spécifiques, tandis que cette étude a envisagé la distribution homogène de nitrates dans les eaux souterraines.

Compte tenu des incertitudes et des limites de l'étude, les estimations de l'empreinte eau présentés et les valeurs de la pénurie de l'eau doivent être interprétées avec prudence. Néanmoins, l'ordre de grandeur des estimations de l'étude donne une bonne indication des activités et cultures auxquelles les ressources en eau du Maroc sont attribuées, au cours desquels mois et bassins les empreintes eau sont relativement grandes ou petites, et où et quand cela conduit à une pénurie d'eau plus élevé.

Les incertitudes en termes d'économies potentielles estimées par la relocalisation de la production végétale et la réduction de l'empreinte eau des cultures vers des niveaux de repère sont étroitement liées aux incertitudes dans les estimations de l'empreinte eau de la production végétale, et les résultats doivent être interprétés avec prudence. Néanmoins, l'ordre de grandeur des économies estimées donne une indication approximative du potentiel de ces mesures. Lorsque l'on considère la relocalisation de la production végétale, il est nécessaire d'évaluer comment les empreintes eau verte et bleue des cultures se manifestent à l'échelle mensuelle. Cette étude a porté sur les économies d'eau annuelles, mais la relocalisation associée des cultures pourrait bien aggraver la pénurie d'eau mensuelle dans certains bassins fluviaux. En outre, la faisabilité et l'opportunité de la relocalisation de la production végétale sont bien sûr en grande partie déterminées par des facteurs sociaux et économiques qui ne sont pas prises en compte dans cette étude.

## Conclusion

L'étude conclut que: (i) l'évaporation à partir des réservoirs de stockage est la deuxième plus grande forme de consommation de l'eau bleue au Maroc, après la production des cultures irriguées; (ii) les ressources en eau et en terres du Maroc sont principalement utilisées pour produire des cultures à valeur relativement faible (en US\$/m<sup>3</sup> et US\$/ha) telles que les céréales, les olives et les amandes; (iii) une bonne partie de l'exportation d'eau virtuelle du Maroc a trait à l'exportation de produits avec une productivité économique d'eau relativement faible (en US\$/m<sup>3</sup>); (iv) la pénurie de l'eau bleue sur une échelle mensuelle est sévère dans tous les bassins fluviaux et la pression exercée sur les ressources en eaux souterraines par les prélèvements et la pollution par les nitrates est considérable dans la plupart des bassins; (v) les économies potentielles d'eau estimées par relocalisation partielle des cultures de bassins où elles consomment moins d'eau et en réduisant les empreintes eau des cultures à des niveaux de repère sont importantes en comparaison avec les mesures de réduction de la demande et d'accroissement de l'offre envisagées dans la stratégie nationale de l'eau au Maroc.

Sur la base de ces nouvelles idées et options en matière de réponse, on conclut que l'Evaluation d'Empreinte Eau a une valeur ajoutée pour la politique nationale de l'eau au Maroc. L'Evaluation d'Empreinte Eau nous force à examiner les utilisateurs finaux et l'utilisation finale d'eau douce, ce qui est essentiel dans la détermination de la attribution efficace et équitable de l'eau dans les limites de ce qui est écologiquement durable, à la fois au niveau du bassin fluvial et au niveau national. Ceci est particulièrement pertinent pour les pays pauvres en eau comme le Maroc. En outre, le fait de prendre compte des éléments verts et gris de l'empreinte eau offre de nouvelles perspectives sur la pénurie de l'eau bleue, car la

pression sur les ressources en eau bleue pourrait être réduite par une utilisation plus efficace de l'eau verte et par une réduction de la pollution.

## Remerciements

Nous tenons à remercier Mesfin Mekonnen (Université de Twente, Enschede, Pays-Bas), Karen Meijer et Wil van der Krogt (Deltares, Delft, Pays-Bas), Abdelkader Larabi (École Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat, Maroc) et Siham Laraichi (Ministère de l'Energie, Mines, Eau et de l'Environnement, Rabat, Maroc) pour leurs commentaires lors des différentes étapes de la recherche.

## Références

1. Ministère EMEE (2011) Stratégie Nationale de l'Eau. Disponible: [www.minenv.gov.ma/PDFs/EAU/strategie\\_eau.pdf](http://www.minenv.gov.ma/PDFs/EAU/strategie_eau.pdf), Département de l'Eau, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Rabat, Maroc. Consulté le 21 janvier 2013.
2. Ministère EMEE (2012) Les eaux souterraines, [http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=12&ID\\_PAGE=42](http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=12&ID_PAGE=42), Département de l'Eau, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Rabat, Maroc. Consulté le 8 décembre 2012.
3. Official State Gazette (1995) Royal Decree no. 1-95-154 promulgating Law no. 10-95 on water. Available: [http://ocid.nacse.org/rewab/docs/Royal\\_Decree\\_No\\_1-95-154\\_Promulgating\\_Law\\_on\\_Water\\_EN.pdf](http://ocid.nacse.org/rewab/docs/Royal_Decree_No_1-95-154_Promulgating_Law_on_Water_EN.pdf). Consulté le 3 janvier 2013.
4. Hoekstra AY, ed. (2003) Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002. Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas. Disponible: [www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf). Consulté le 5 Juillet 2013.
5. Hoekstra AY, Chapagain AK (2008) Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Oxford: Blackwell Publishing.
6. Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011) The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Londres: Earthscan.
7. Aldaya MM, Garrido A, Llamas MR, Varelo-Ortega C, Novo P, et al. (2010) Water footprint and virtual water trade in Spain. In: Garrido A, Llamas MR, eds. Water policy in Spain. Leiden: CRC Press. pp 49-59.
8. Chahed J, Besbes M, Hamdane A (2011) Alleviating water scarcity by optimizing "Green Virtual-Water": the case of Tunisia. In: Hoekstra AY, Aldaya MM, Avril B, eds. Proceedings of the ESF Strategic Workshop on accounting for water scarcity and pollution in the rules of international trade, Amsterdam, 25-26 November 2010. Value of Water Research Report Series No. 54, UNESCO-IHE. pp 99-113. Disponible: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report54-Proceedings-ESF-Workshop-Water-Trade.pdf>. Consulté le 4 février 2013.
9. Hoekstra AY, Mekonnen MM (2012) The water footprint of humanity. Proc Natl Acad Sci USA 109(9): 3232-3237.
10. Aldaya, MM, Martinez-Santos P, Llamas, MR (2010) Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. Water Resources Management 24(5): 941-958.
11. Hoekstra AY, Chapagain AK (2007) Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resources Management 21(1): 35-48.
12. Hoekstra AY, Chapagain AK (2007) The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. Ecol Econ 64(1): 143-151.
13. Mekonnen MM, Hoekstra AY (2011) National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series No.50, UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas. Disponible: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report50-NationalWaterFootprints-Voll.pdf>. Consulté le 23 novembre 2012.

14. Mekonnen MM, Hoekstra AY (2010) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water Research Report Series No.47, UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas. Disponible: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report47-WaterFootprintCrops-Voll.pdf>. Consulté le 23 novembre 2012.
15. Sperna Weiland FC, van Beek LPH, Kwadijk JCJ, Bierkens MFP (2010) The ability of a GCM-forced hydrological model to reproduce global discharge variability. *Hydrol Earth Syst Sci* 14: 1595-1621. doi:10.5194/hess-14-1595-2010.
16. FAO (2013) AQUASTAT base de données online. Geo-referenced database of African dams. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Disponible: [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dams/region/D\\_Africa.xlsx](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dams/region/D_Africa.xlsx). Consulté le 28 mars 2013.
17. FAO (2013) AQUASTAT base de données online. Country Fact Sheet: Morocco. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italy. Disponible: [www.fao.org/nr/aquastat/](http://www.fao.org/nr/aquastat/). Consulté le 22 février 2013.
18. FAO (2013) FAOSTAT base de données online. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Disponible: <http://faostat.fao.org>. Consulté le 6 juillet 2013.
19. ITC (2007) SITA version 1996–2005 in SITC [DVD-ROM], Centre du Commerce International, Genève.
20. Riad S (2003) Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse inédite. Disponible: <http://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/e5d351a6-ce4c-4b64-b891-84d85f3d8f02>. Consulté le 19 juin 2013.
21. Tekken V, Kropp JP (2012) Climate-Driven or Human-Induced: Indicating Severe Water Scarcity in the Moulouya River Basin (Morocco). *Water* 4: 959-982. doi:10.3390/w4040959.
22. JICA, MATEE, ABHT (2007) Etude du plan de gestion intégrée des ressources en eau dans la plaine du Haouz, Royaume du Maroc, Rapport intermédiaire. Disponible: [http://eau-tensift.net/fileadmin/user\\_files/pdf/etudes/JICA\\_ETUDE\\_PLAN\\_DE\\_GESTION\\_INTEGREE\\_RE\\_HAOU\\_Z.pdf](http://eau-tensift.net/fileadmin/user_files/pdf/etudes/JICA_ETUDE_PLAN_DE_GESTION_INTEGREE_RE_HAOU_Z.pdf). Consulté le 12 août 2013.
23. Laouina A (2001) Compétition irrigation/eau potable en région de stress hydrique: le cas de la région d'Agadir (Maroc). In: Camarda D, Grassini L, ed. Interdependency between agriculture and urbanization: Conflicts on sustainable use of soil and water. Bari: CIHEAM, 2001, pp 17-31. Disponible: [ressources.ciheam.org/om/pdf/a44/02001585.pdf](http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a44/02001585.pdf). Consulté le 20 juin 2013.
24. Hoekstra AY, Mekonnen MM, Chapagain AK, Mathews RE, Richter BD (2012) Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE* 7(2): e32688.
25. Rockstrom J, Falkenmark M, Karlberg L, Hoff H, Rost S, et al. (2009) Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resour Res* 45: W00A12.
26. Schuol J, Abbaspour KC, Yang H, Srinivasan R, Zehnder AJB (2008) Modeling blue and green water availability in Africa. *Water Resour Res* 44: W07406.
27. Hoekstra AY (2013) *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. Londres: Routledge.
28. Al-Taiee TM (2012) Groundwater Dams: a Promise Option for Sustainable Development of Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions. In: UNESCO. Proceedings of the Second International Conference on integrated water resources management and challenges of the sustainable development, Agadir, 24-26 March 2010. IHP-VII Series on Groundwater No. 4, UNESCO. pp 35-41.
29. Hoff H, Falkenmark M, Gerten D, Gordon L, Karlberg L, et al. (2010) Greening the global water system. *J Hydrol* 383(3-4): 177-186.
30. Mekonnen MM, Hoekstra AY (2010) A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrol Earth Syst Sci* 14(7): 1259-1276.
31. FAO (2013) Global map of monthly reference evapotranspiration - 10 arc minutes. GeoNetwork: grid database. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Disponible: [www.fao.org/geonetwork/srv/en/resources.get?id=7416&fname=ref\\_evap\\_fao\\_10min.zip&access=private](http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/resources.get?id=7416&fname=ref_evap_fao_10min.zip&access=private). Consulté le 19 mars 2013.