

# Options de gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou, Maroc Analyse avantages-coûts utilisant le modèle WEAP



World Soil Information

Green Water Credits Report M2a



P. Droogers, W. Terink, J. Hunink, J.H. Kauffman and G.W.J. van Lynden





# Green Water Credits

## Sebou Eau verte

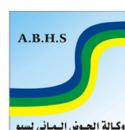
Options de gestion de l'eau verte dans  
le bassin du Sebou, Maroc  
Analyse avantages-coûts utilisant  
le modèle WEAP

### Authors

P. Droogers  
W. Terink  
J. Hunink  
J.H. Kauffman  
G.W.J. van Lynden

**Green Water Credits Report M2a / FutureWater Report 102**

Wageningen, 2011



© 2011, ISRIC Wageningen, Netherlands

*All rights reserved. Reproduction and dissemination for educational or non-commercial purposes are permitted without any prior written permission provided the source is fully acknowledged. Reproduction of materials for resale or other commercial purposes is prohibited without prior written permission from ISRIC. Applications for such permission should be addressed to:*

Director, ISRIC - World Soil Information

PO BOX 353

6700 AJ Wageningen

The Netherlands

E-mail: soil.isric@wur.nl

The designations employed and the presentation of materials do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of ISRIC concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Despite the fact that this publication is created with utmost care, the authors(s) and/or publisher(s) and/or ISRIC cannot be held liable for any damage caused by the use of this publication or any content therein in whatever form, whether or not caused by possible errors or faults nor for any consequences thereof.

Additional information on ISRIC - World Soil Information can be accessed through <http://www.isric.org>

#### Citation

P. Droogers, W. Terink, J. Hunink, J.H. Kauffman & G.W.J. van Lynden 2011. *Options de gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou, Maroc – Analyse avantages-coûts utilisant le modèle WEAP*. Green Water Credits Report M2a ; ISRIC – World Soil Information. 36 p

Lay-out: Wageningen UR, Communication Services

Foto credit: P. Droogers (FutureWater)

Submitted by



FutureWater  
Costerweg 1G  
6702 AA Wageningen, The Netherlands  
Phone: +31 (0)317 460050  
E-mail: [info@futurewater.nl](mailto:info@futurewater.nl)  
[www.futurewater.nl](http://www.futurewater.nl)

Commissioned by ISRIC-IFAD

Series Editor  
William Critchley

Associate Editor  
Eefke Mollee

Traduction  
A. Kouider



**Green Water Credits Report M2a / FutureWater Report 102**

# Contenu

Points clés	5
Acronyms and Abbreviations	7
1 Introduction	9
1.1 Avant propos	9
1.2 Outils de modélisation	9
1.3 Modèle WEAP	11
1.3.1 Contexte (Background)	11
1.3.2 Approche de WEAP	12
1.3.3 Structure du programme	13
2 Configuration du modèle	19
2.1 Aperçu	19
2.2 Installation	19
2.2.1 Préambule	19
2.2.2 Disponibilité de la ressource	20
2.2.3 Besoins en eau domestique et industrielle	20
2.2.4 Réservoirs	20
2.2.5 Economie	20
2.3 Analyse WEAP	21
3 Résultats	23
3.1 Situation actuelle	23
3.2 Projections Future	26
3.3 Mesures GWC	29
4 Conclusions	33
5 References	35



# Points clés

- Plusieurs régions à travers le Monde font face à de grands défis de gestion d'eau en raison de la limitation de la ressources en eau, de la qualité de l'environnement et des politiques d'utilisation de l'eau. Diverses initiatives ont été élaborées pour minimiser les effets négatives de ces défis. Ces initiatives sont souvent axées sur l'eau claire dite « eau bleue », et ignorent la partie de la ressource destinée à l'alimentation des racines des plantes « vert d'eau ».
- Une analyse critique, réalisée par l'équipe de FutherWater pour explorer la pertinence de différents outils de modélisation, a montré que SWAT a excellé dans l'analyse de l'impact du sol et l'eau et plus particulièrement en terme d'évaluation amont des mesures de conservation sur l'évolution de la productivité, l'érosion pluviale et les débits.
- WEAP est un outil, sur micro-ordinateur, dédié à la planification intégrée des ressources en eau. Il fournit un cadre global, flexible et convivial pour l'aide à la décision en matière de gestion des ressources en eau. Il utilise les résultats de SWAT pour générer des résultats en rapport avec l'évaluation de l'offre et de la demande conduisant à une analyse coûts-avantages.
- Pour les besoins des simulations par le modèle WEAP, le bassin du Sebou a été subdivisé en cinq sous-bassins.
- Le modèle développé doit être considéré comme exploratoire du fait que les données utilisées, et particulièrement pour la composante sol, ont été obtenues à partir de bases de données mondiales et locales.
- L'impact de trois mesures de gestion de l'eau a été défini et analysé :
  - les petites structures de pierres placées le long du contour à travers la pente.
  - Remblai construit le long du contour.
  - Une combinaison de labour suivant les courbes et la culture contour.
- L'hypothèse retenue est que ces mesures seraient mises en œuvre sur 25% des champs de cultures pluviales dans le bassin. Il est clair que tous les scénarios ont un effet positif sur la réduction de la pénurie d'eau.
- L'enjeu financier pour cinq principaux secteurs (agriculture pluviale, irrigation domestique, industrie et énergie hydroélectrique) peut atteindre 43,000,000 \$US/année si ces mesures de gestion des eaux vertes sont mises en œuvre sur 25% de la superficie.
- Plusieurs avantages découlent de l'application des principes évoqués dans la présente étude (réduction des pertes en sol fertile par l'érosion, réduction de la turbidité d'eau et moins d'envasement).



# Acronyms and Abbreviations

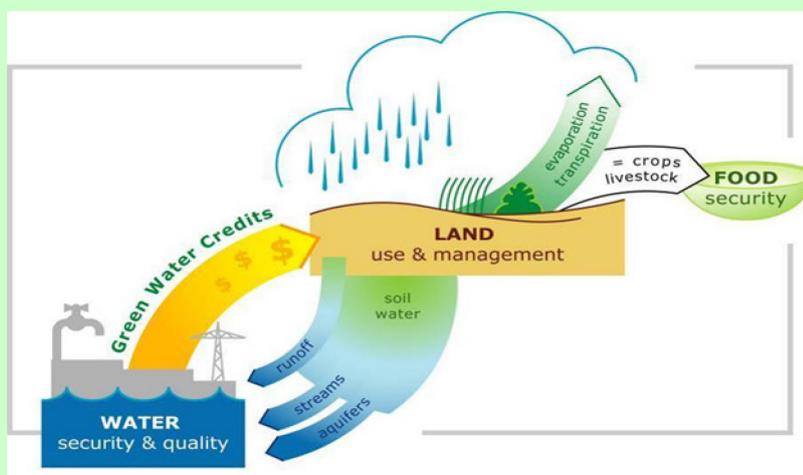
GWC	Green Water Credits
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWC	soil and water conservation
WEAP	Water Evaluation And Planning system
WOCAT	World Overview of Conservation Approaches and Technologies

## Crédits Eau Verte

### Le concept de l'eau verte et l'eau bleue, et le mécanisme de GWC

L'eau verte est l'eau contenue dans le sol. L'eau verte retourne sous forme de vapeur dans l'atmosphère par la transpiration des plantes ou à partir de la surface du sol par évaporation. Elle est la principale composante des précipitations, mais ne peut être utilisée qu'*in situ*. L'eau verte est gérée par les agriculteurs, les forestiers et les utilisateurs des pâturages ou des parcours.

L'eau bleue comprend le ruissellement de surface, nappe phréatique, le débit et l'eau stagnante qui peuvent être utilisés ailleurs - pour l'usage domestique, l'irrigation, usage industriel et consommation urbaine. Elle soutient aussi les écosystèmes aquatiques et les zones humides. L'écoulement et les ressources de l'eau bleue, en quantité et en qualité, sont étroitement déterminés par les pratiques de gestion des utilisateurs des terres en amont.



Gestion de l'eau verte comprend les pratiques efficaces de conservation des sols et l'eau mises en place par les utilisateurs des terres. Ces pratiques se focalisent sur l'utilisation durable des ressources en eau dans un bassin versant. La gestion de l'eau verte augmente la transpiration productive, réduit l'évaporation, contrôle le ruissellement, encourage un recharge des eaux souterraines et diminue les inondations. Il relie l'eau qui tombe sur la terre, et qui y est utilisé, avec les ressources en eau des rivières, lacs et eaux souterraines: la gestion de l'eau verte vise à optimiser la répartition entre les eaux vertes et bleues pour générer des avantages tant pour les utilisateurs des terres en amont et les consommateurs en aval.

Crédits Eau Verte (GWC) est un mécanisme financier qui soutient les agriculteurs en amont à investir dans l'amélioration de la gestion des eaux vertes. Pour ce faire, un fonds de GWC doit être créé par les bénéficiaires publics et privés en aval. Au début, les fonds publics peuvent être nécessaires pour combler l'écart entre les investissements en amont et la réalisation des bénéfices en aval.

Le concept de l'eau verte et bleue de l'eau a été initialement proposée par Malin Falkenmark comme un outil pour aider à la compréhension des flux de l'eau et des ressources différentes - et le cloisonnement entre les deux (voir Falkenmark M 1995 Land-eau.FAO Bulletin des terres et l'eau 15-16, FAO, Rome).

# 1 Introduction

## 1.1 Avant propos

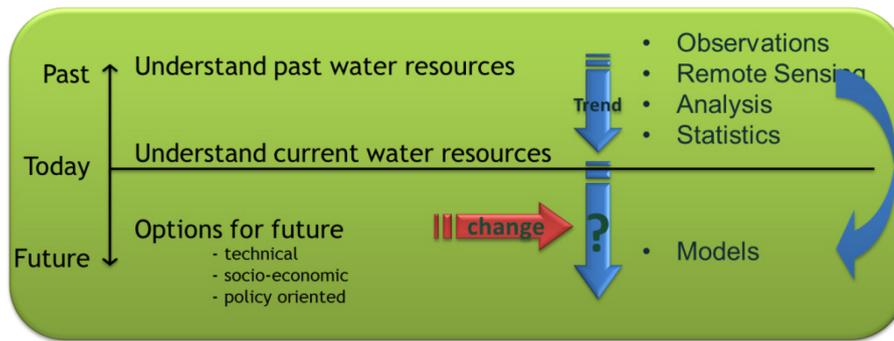
Compte tenu de la situation de pénurie d'eau dans le monde, en général et au Maroc en particulier, diverses initiatives visant à atténuer des impacts de cette pénurie ont été examinées par la communauté scientifique dans le domaine. Ces actions se focalisent davantage sur les eaux de surface et une partie des eaux souterraines, ignorant une partie importante de cette ressource qui consiste en l'eau d'accroissement des plantes "eau verte" (voir encadré). En s'inspirant de l'expérience au Kenya dans un bassin versant baptisé Tana où on s'intéresse à l'eau verte, ISRIC a tenté d'introduire ce concept dans le bassin de Sebou au Maroc. Pour se faire, deux outils de modélisation ont été utilisés : WEAP et SWAT (voir prochaine section).

Le présent document présente les résultats de l'analyse de l'offre et de la demande ainsi que les coûts-avantages réalisés à l'aide du logiciel WEAP.

L'analyse des interactions entre l'eau et le sol, les mesures de conservation sur l'évolution de la productivité, l'érosion pluviale et le débit « simulations de SWAT » sont présentés dans un rapport séparé (Terink et al., 2011).

## 1.2 Outils de modélisation

Une des principales raisons de modéliser les ressources en eau est de cerner les processus en jeux pour une gestion durable et d'avoir une image spatiale sur l'état de différents variables explicatives en rapport avec la ressource sur une étendue importante (Droogers et Bastiaanssen, 2002). La modélisation permet d'analyser des scénarios de gestion et de mesurer des tendances éventuelles (croissance démographique, changement climatique, etc.) (Droogers et Aerts, 2005). Ces scénarios aident les décideurs à se prononcer sur des stratégies à impacts directs comme c'est le cas pour les changements dans les règles de fonctionnement d'aménagements hydrauliques, l'affectation de l'eau, les investissements dans les infrastructures et les pratiques agricoles. En d'autres termes: les modèles permettant de mesurer l'impact de changements d'orientation de différentes natures sur le milieu naturel et sur l'utilisateur (Figure 1).



**Figure 1**  
 Concept d'utilisation de modèles de simulation dans l'analyse de scénarios.

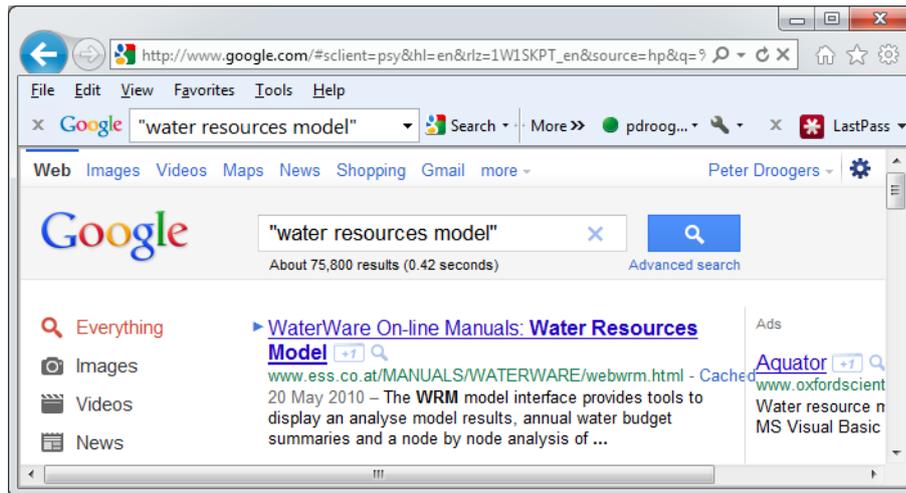
Un grand nombre de modèles mathématiques traitant des ressources en eau existe à travers le Monde. Les applications dans le domaine sont de plus en plus sophistiquées et conviviales. Une simple requête sur Google avec comme mots clef " modèle ressource eau» retourne plus de 75 milliers de pages (Figure 2). Cependant, le choix du bon modèle valable pour décrire des phénomènes donnés demeure complexe. La figure 3 présente le domaine d'utilisation de quelques modèles.

Pour l'eau verte, une analyse critique des modèles existants visant le choix de l'outil qui s'adapte le mieux à la modélisation biophysique a été réalisée par l'équipe de FutureWater (Droogers et al., 2006). A l'issue de cette analyse, le logiciel SWAT a été retenu pour l'analyse des interactions entre l'eau et le sol, les mesures de conservation sur l'évolution de la productivité, l'érosion pluviale et le débit. L'outil WEAP, utilise les résultats de SWAT, est adopté pour l'évaluation offre demande et l'analyse coûts-avantages. Le tableau 1 présente une comparaison entre ces deux logiciels.

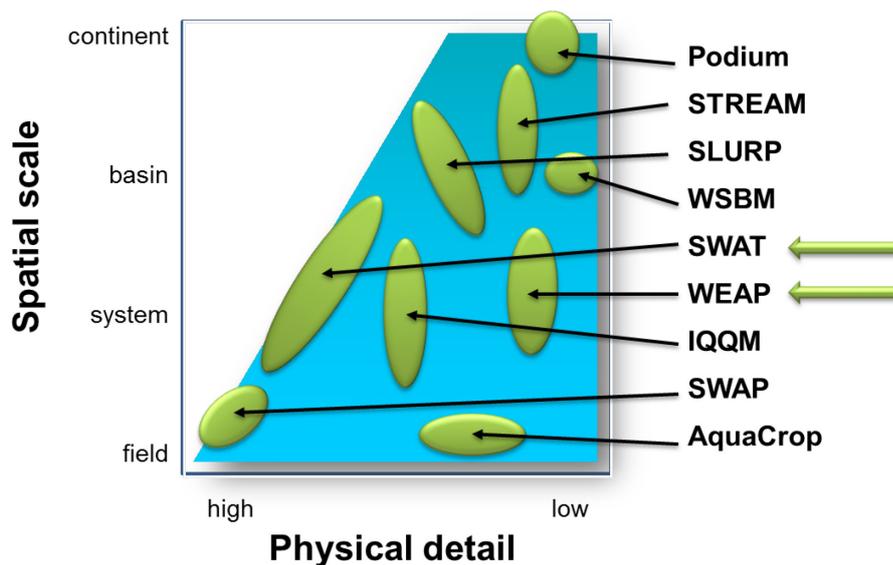
**Tableau 1**  
 Comparaison entre les logiciels SWAT et WEAP.

SWAT	WEAP
<i>(Outil d'évaluation des sols et l'eau)</i>	<i>(Évaluation d'eau et de planification)</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse de l'offre</li> <li>• Bases physiques</li> <li>• Impact sol-eau-mesures de conservation</li> <li>• Analyse détaillée de gestion agricole</li> <li>• Domaine public</li> <li>• Conviviale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse de la demande</li> <li>• Base conceptuelle</li> <li>• Avantage - Analyse des coûts</li> <li>• Détail interactions amont-aval</li> <li>• Domaine public</li> <li>• Interface conviviale</li> </ul>

WEAP utilise une approche intégrée permettant de simuler les interactions entre des variables explicatives naturelles (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, etc.) avec des composants d'aménagements (réservoirs, pompage, etc.), permettant d'aboutir à une vision globale de plusieurs facteurs pertinents à la gestion des ressources en eau.



**Figure 2**  
Pages retournées avec " modèle ressources eau " (juillet 2011).



**Figure 3**  
Domaine d'utilisation des modèles de ressources en eau.

## 1.3 Modèle WEAP

### 1.3.1 Contexte (Background)

Durant la dernière décennie, une approche intégrée de développement de l'eau avec une vision globale tenant compte de la demande, de la qualité et de la préservation des écosystèmes est apparue. Sur la base de cette approche, un modèle baptisé WEAP (Water Evaluation and Planning System) intégrant ces valeurs dans une approche intégrée de gestion (SEI, 2011) a été développé. WEAP fournit un cadre global, flexible et convivial sur micro-ordinateur traitant de la gestion des ressources en eau pour la planification de la ressource en eau.

### 1.3.2 Approche de WEAP

WEAP se base sur l'analyse du bilan hydrique et tient compte de variables explicatives de natures diverses : précipitations, eaux de surface, eaux souterraines, installations de traitement, exigences des écosystèmes, demande en eau, génération de pollution, etc.. La structure des données et leurs niveaux de détail peuvent être personnalisés pour permettre des analyses particulières, et pour refléter les limites imposées par les données disponibles. Cette présentation rend WEAP applicable dans plusieurs domaines : municipal, agricole, aménagements des bassins versants, fluviaux, etc.

WEAP intègre non seulement la répartition de l'eau, mais aussi sa qualité et la préservation des écosystèmes. Ce qui lui permet de simuler une panoplie de problèmes complexes.

La modélisation sous WEAP se déroule en plusieurs étapes se regroupant en deux groupes :

1. Le montage du modèle où le système à modéliser est défini (période de temps à analyser, limites spatiales de l'aire à étudier, composants du système et la calibration du modèle).
2. Le résultat recherché incluant l'évaluation instantanée de la demande réelle de l'eau et de la charge polluante.

Les hypothèses qui peuvent être intégrées dans les simulations sont en rapport avec les coûts et des facteurs influençant la demande, la pollution, l'approvisionnement et la disponibilité de la ressource. Les scénarios à analyser s'appuient sur l'état actuel et permettent l'exploration de l'impact des hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité future de l'eau et l'utilisation. Ces scénarios sont évalués au regard de la disponibilité de l'eau, les coûts et avantages, la compatibilité avec les objectifs environnementaux, et la sensibilité à l'incertitude dans les variables clés.

WEAP calcule un bilan de masse de l'eau et de pollution en chaque point de calcul défini par l'utilisateur. L'eau est injectée dans le système pour répondre aux exigences de débit minimal et de consommation, sous réserve des priorités de la demande, les préférences de l'offre, du bilan de masse et d'autres contraintes. Les charges ponctuelles de pollution ainsi que les concentrations en polluants de nature diverse sont calculées.

WEAP fonctionne sur un pas de temps mensuel. Les mois sont indépendants, sauf pour les réservoirs et stockages. Ainsi, l'eau entrant dans le système dans un mois (débit tête par exemple, alimentation des nappes souterraines ou les eaux de ruissellement en tronçons) est soit stockée ou quitte le système à la fin du mois. L'échelle de temps mensuelle étant relativement longue, les flux sont supposés se produire instantanément. Ainsi, un site peut retirer la demande d'eau de la rivière, de consommer certains, le retour du reste à une usine de traitement des eaux usées qu'il traite et il retourne à la rivière. Ce flux de retour est disponible pour une utilisation dans le même mois à la demande en aval.

Chaque mois, les calculs se font pour chaque nœud selon la démarche suivante (SEI, 2011):

1. Définir la demande annuelle et de besoins d'approvisionnement mensuel.
2. Estimer les eaux de ruissellement et d'infiltration des bassins versants.
3. Quantifier les entrées et les sorties d'eau incluant les prélèvements. Durant cette étape, on vise à optimiser la gestion de la demande et les exigences de débit réservé, l'offre et d'autres contraintes.
4. Evaluer les charges polluantes et leurs concentrations engendrées sur le milieu naturel.
5. Apprécier la production hydroélectrique.
6. Jauger les coûts d'immobilisations et d'exploitation et des revenus.

### 1.3.3 Structure du programme

Le logiciel WEAP comprend cinq fenêtres principales: (i) présentation schématique (ii) les données de base (iii) les résultats (iv) des aperçus, et (v) des notes. Ces fenêtres sont représentées par des icônes sur la barre d'outils à gauche de l'écran. WEAP calcule des scénarios avant que la fenêtre soit affichée, si des modifications ont été apportées au système ou sur les scénarios.

#### 1.3.3.1 Présentation schématique

Il s'agit là de réaliser une présentation schématique de la structure à modéliser (figure 4). Les objets du menu sont glissés et déposés dans le système : la rivière est créée, les sites de la demande et d'alimentation sont positionnés, etc..

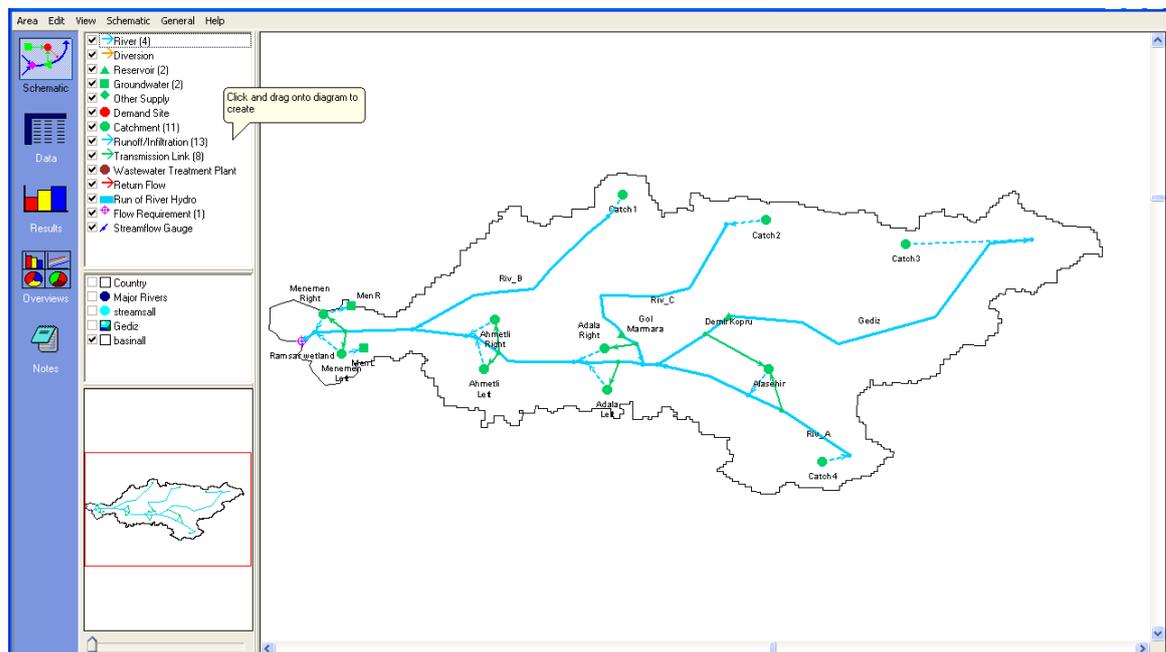


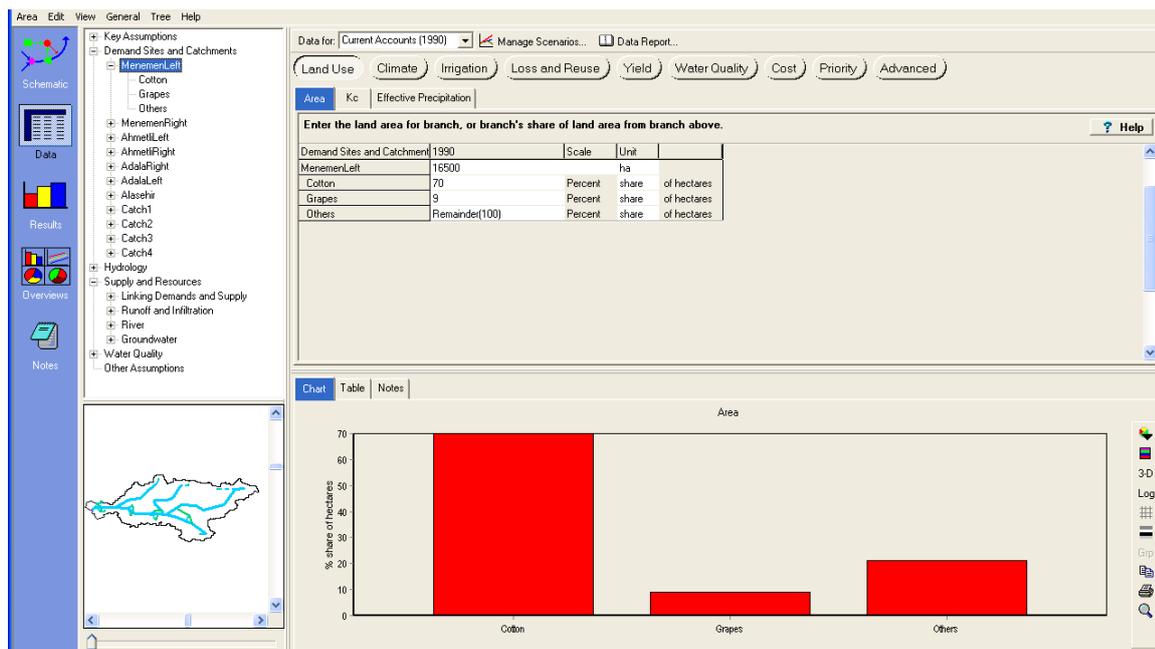
Figure 4  
Interface WEAP - Exemple de vue schématique.

#### 1.3.3.2 Affichage de données

La fenêtre donnée est utilisée pour ajouter des données au système schématisé. Cette fenêtre est structurée comme un arbre avec des branches. Les branches principales sont nommées hypothèses clés, les sites de la demande, l'hydrologie, l'approvisionnement et des ressources et la qualité de l'eau.

Les objets créés dans la vue schématique sont représentés dans les branches. Autres subdivisions de la demande d'un site peuvent être créés par l'analyste. L'exemple présenté à la figure 5 montre en outre des sous-divisiones de la demande sur les sites en classes d'utilisation des terres.

La vue de données permet la création de variables et de relations, d'injecter les hypothèses de calcul en utilisant des expressions mathématiques, et des liaisons dynamiques à des fichiers d'entrée (SEI, 2005).



**Figure 5**  
WEAP - Exemple de fenêtre de données.

### 1.3.3.3 Présentation des résultats

Le bouton résultats déclenche l'exécution de WEAP et les calculs de l'état des différentes variables: demande en eau, débits, exigences pour satisfaction de flux, réservoirs de stockage, eau souterraine, production hydroélectrique, évaporation, pertes de transmission, traitement des eaux usées, les charges de pollution et les coûts. Les résultats mensuels, annuels ou pour une période de temps donnée sont présentés sous forme graphique ou un tableau, ou affichées schématiquement (figure 6). Les rapports peuvent être personnalisés en changeant les nœuds, les périodes de calculs, les types de graphique, les unités, les couleurs, etc.. Les rapports personnalisés peuvent être enregistrés comme «favori» pour servir de modèles (figure 7). Aussi, les résultats intermédiaires peuvent être analysés afin de s'assurer que les données, hypothèses et les modèles sont valides et cohérents.

Les rapports sont regroupés en cinq catégories principales :

- Demande
- Approvisionnement et Ressources
- captage
- Qualité de l'Eau
- Financière

Les détails concernant la sortie générée par WEAP sont présentés au tableau 2.

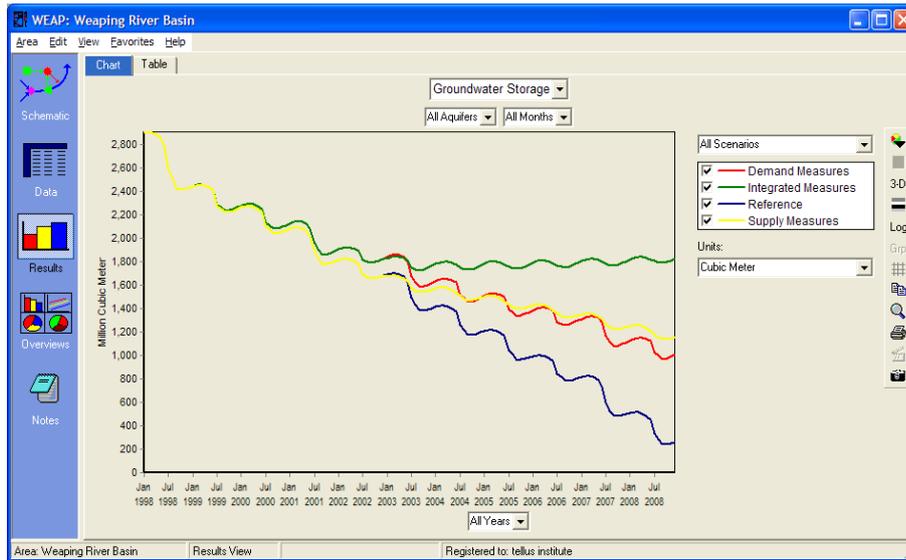


Figure 6  
WEAP - Exemple de résultats.

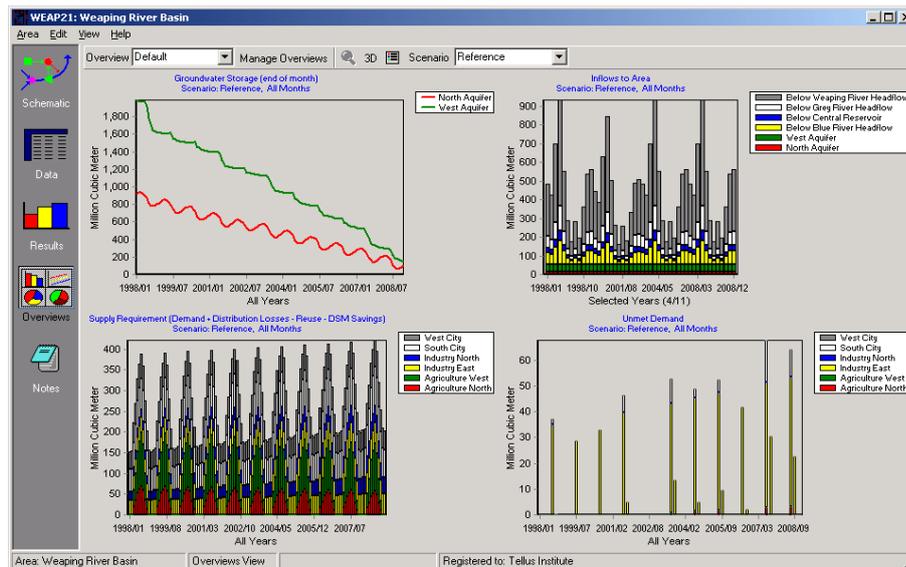


Figure 7  
WEAP - Aperçus d'un exemple de la vue.

## Tableau 2

Sortie WEAP.

---

### Résultats de la demande

- La demande en eau
- Exigence d'alimentation
- Alimentation délivrée
- Demande non satisfaite
- Couverture
- Apports (demande et sorties)
- Débit minimal
- Débit minimal Livré
- Besoin non comblé de débit minimal
- Couverture de flux

---

### Résultats approvisionnement et les ressources

- Entrée dans le bassin
- Sortie du bassin
- Rivière
  - Débit
  - Débit jaugé (absolue)
  - Débit jaugé (%)
  - Stade
  - Vitesse
  - Porté (longueur)
- Eaux souterraines
  - Stockage
  - Entrée et sortie
  - Débordement
  - Hauteur dessus de la rivière
  - Sorties à la rivière
- Réservoir
  - Volume
  - Volume de stockage
  - Altitude de stockage
  - Entrées et sorties
  - L'hydroélectricité
- Liaison de transmission
  - Débit
  - Entrées et sorties
- Autres alimentations
  - Entrées et sorties
- Lien retour
  - Débit
  - Entrées et sorties

---

### Résultats de captage

- Résultats (méthode FAO)
    - Les eaux de ruissellement par rapport aux précipitations
    - Précipitations observées
    - L'infiltration / ruissellement de débit
    - ET Potentiel
    - ET Actuel (y compris l'irrigation)
    - HE Déficit
    - Rendement total
    - Valeur marchande totale
  - Résultats (méthode de l'humidité des sols)
    - Classes de sols (entrée-sortie)
    - Précipitations observées
    - Accumulation de neige
    - Infiltration / ruissellement
    - Précipitations efficaces mensuelles pour HE (y compris la fonte des neiges)
    - Aire
    - Température
    - Rayonnement solaire net
    - Référence PET mensuel
    - ET Potentiel
    - ET Actuel (y compris l'irrigation)
    - L'humidité relative du sol (%)
    - Débit des rivières sans irrigation
    - Débit des rivières avec irrigation
    - Débit GW sans irrigation
    - Débit GW avec irrigation complet
    - Irrigation avec retour fraction d'écoulement d'eaux de surface
    - Irrigation avec retour fraction d'écoulement pour les eaux souterraines
-

---

#### Résultats de la qualité d'eau

- Génération de la pollution
- Charge de pollution
- Apport en pollution aux stations d'épuration
- Entrées et sorties de stations d'épuration
- Qualité des eaux de surfaces

---

#### Résultats financiers

- Rapport coût net
  - Rapport Valeur actualisée nette
  - Coût moyen de Rapport sur l'eau
-



## 2 Configuration du modèle

### 2.1 Aperçu

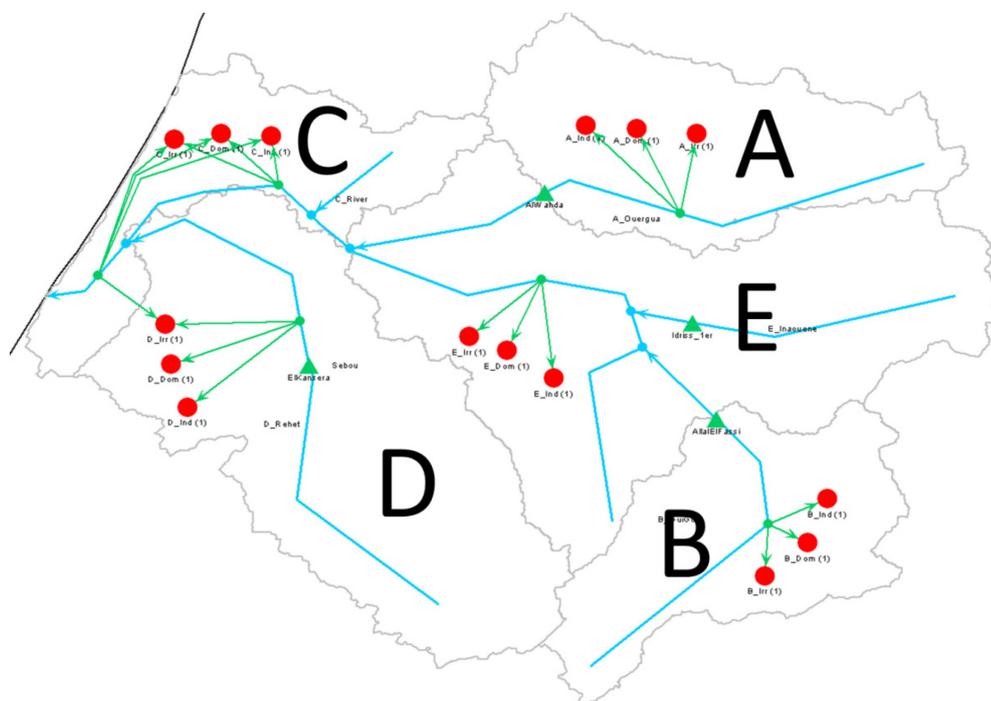
Le modèle WEAP a été configuré pour le bassin du Sebou dans l'objectif d'évaluer l'impact des trois mesures de gestion de l'eau (demande, approvisionnement et analyse coûts-avantages). Le projet Sebou-eaux vertes étant en phase de lancement, le modèle développé devrait être plus considéré comme exploratoire. Les données de base d'entrée du modèle ont été obtenues à partir de bases de données mondiales, et plus particulièrement pour la composante sol, et locales et des résultats d'analyses effectués sur le bassin à l'aide du logiciel SWAT – voir rapport SWAT (Terink et al., 2011).

### 2.2 Installation

#### 2.2.1 Préambule

Pour les besoins de la modélisation, le bassin du Sebou a été subdivisé en cinq sous-bassins (figure 8). Pour chacun de ces sous-bassins, les données de bases suivantes ont été renseignées :

- Disponibilité de la ressource
- Localisation des zones irriguées et leurs exigences en eau
- Besoins en eau domestique et industrielle
- Les réservoirs



*Figure 8*

*Découpage du bassin de Sebou.*

## 2.2.2 Disponibilité de la ressource

Les ressources en eau regroupent les eaux de surfaces, de drainage ainsi que les eaux souterraines. Cet apport en eau peut être utilisé pour l'hydroélectricité, l'irrigation, l'usage domestique et industriel et/ou les besoins de l'environnement. Ces ressources dépendent de divers facteurs interdépendants tels que la taille du sous-bassin, les conditions météorologiques, l'état d'humidité des sols, etc..

Pour les besoins de simulations, trois cultures irriguées ont été prises en considération dans l'aire d'étude:

- Fèves; 1-Dec / 1-avr
- Oliviers; 1-Jan / 15-Oct
- Blé d'hiver, 15-oct / 15-mai

D'autres types d'irrigation applicables à plus petite échelle existent dans la région.

Une moyenne de 400 mm pour les besoins d'irrigation a été appliquée, et supposée être distribuée selon le tableau ci-après.

Jan 0 %, Fev 2.5 %, Mars 2.5 %, Avr 20 %, mai 30%, juin 15%, Juil 5 %, aout 5 %, Sep 5 %, Oct 10 %, Nov 5 %, Dec 0 %

Les pertes d'eau ont été évaluées à 20 %.

## 2.2.3 Besoins en eau domestique et industrielle

La distribution de la population et les besoins en eau industrielle ont été supposés proportionnels par rapport à la taille des sous-bassins. Dans les phases à venir du projet, des données plus fines seront utilisées directement avec le modèle.

Pour les besoins en eau domestique, nous avons retenu une dotation de 150 litres par personne par jour. Pour l'usage industriel, on a supposé que 1000 unités de production dans le bassin et que chaque unité de production d'extrait de 1000 m<sup>3</sup> par jour. Les pertes pour l'extraction de l'eau domestique et industrielle ont été fixées à 10 %.

## 2.2.4 Réservoirs

Seuls les grands réservoirs ont été inclus dans le modèle WEAP: Allal El Fassi, Idriss 1<sup>er</sup>, El Kansera et Al Wahda. Le choix de ces réservoirs a été dicté par leurs capacités de stockage et/ou la production hydroélectrique.

## 2.2.5 Economie

Pour entreprendre une analyse coûts-avantages, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Valeur de la production agricole dans les systèmes pluviaux est basée sur le concept de la productivité de l'eau. Chaque m<sup>3</sup> d'eau utilisé a une valeur de 0,05 \$ m<sup>3</sup>.
- Valeur de l'eau d'irrigation est fixée à 0,15 \$ m<sup>3</sup>.
- Revenus de l'approvisionnement en eau domestique et industrielle est fixé à 0,30 \$ m<sup>3</sup>.
- Les revenus provenant de l'électricité ont été fixés à 50 000 dollars américains / GWH.

Ces chiffres ont été pris comme moyennes fondées sur des informations sur le pays ainsi que d'autres études de GWC. Évidemment, ces valeurs, fondamentales pour l'analyse économique, seront affinées dans les phases à venir du projet.

## **2.3 Analyse WEAP**

L'impact de trois scénarios d'aménagements a été analysé à l'aide du modèle WEAP. Ces scénarios sont les suivants:

- A. petites structures de pierres, où les pierres sont placées sur une ligne horizontale sur la pente. La distance entre les lignes est fonction de la pente et la disponibilité de pierre.
  - B. Un remblai construit le long du contour par l'utilisation de la pierre et du sol comme matériau de construction. Il est établi en creusant le sol, et de l'utiliser pour façonner le remblai. La pierre est utilisée sur le côté en aval pour renforcer la structure.
  - C. Une combinaison de contour ligne labourer et cultiver contour. Le labour et toutes les autres cultures sont effectués parallèlement aux lignes de contour.
- Une description plus détaillée de ces scénarios figure dans le rapport de SWAT (Terink et al., 2011) et dans la base de données WOCAT.

Les résultats de l'analyse SWAT de ces 3 mesures ont été inclus dans le modèle WEAP. Les données prises en considération concernent essentiellement :

- Transpiration des cultures pluviales
- Apport aux réservoirs
- Erosion et la sédimentation

Basé sur ce, WEAP calcule les valeurs de :

- la production agricole pluviale
- la production agricole irriguée
- l'eau domestique
- l'eau industrielle
- L'hydroélectricité

## 3 Résultats

Les résultats de l'analyse en utilisant l'approche WEAP seront discutés sous trois angles :

- Situation réelle pendant la période de 10 années de 2001 à 2010
- Situation future autour de l'an 2025 si aucune mesure d'adaptation n'est prise.
- Explorer l'avenir avec trois mesures GWC incluses.

Tous les résultats seront présentés pour une période de 10 ans afin de s'assurer que les variations d'année en année seront incluses. Comme indiqué précédemment, dans cette phase du projet l'accent a été mis davantage sur une première estimation des impacts potentiels. La calibration et la validation des données et des résultats sont nécessaires.

### 3.1 Situation actuelle

Certains de sortie typique de l'analyse seront présentés pour montrer la capacité du modèle.

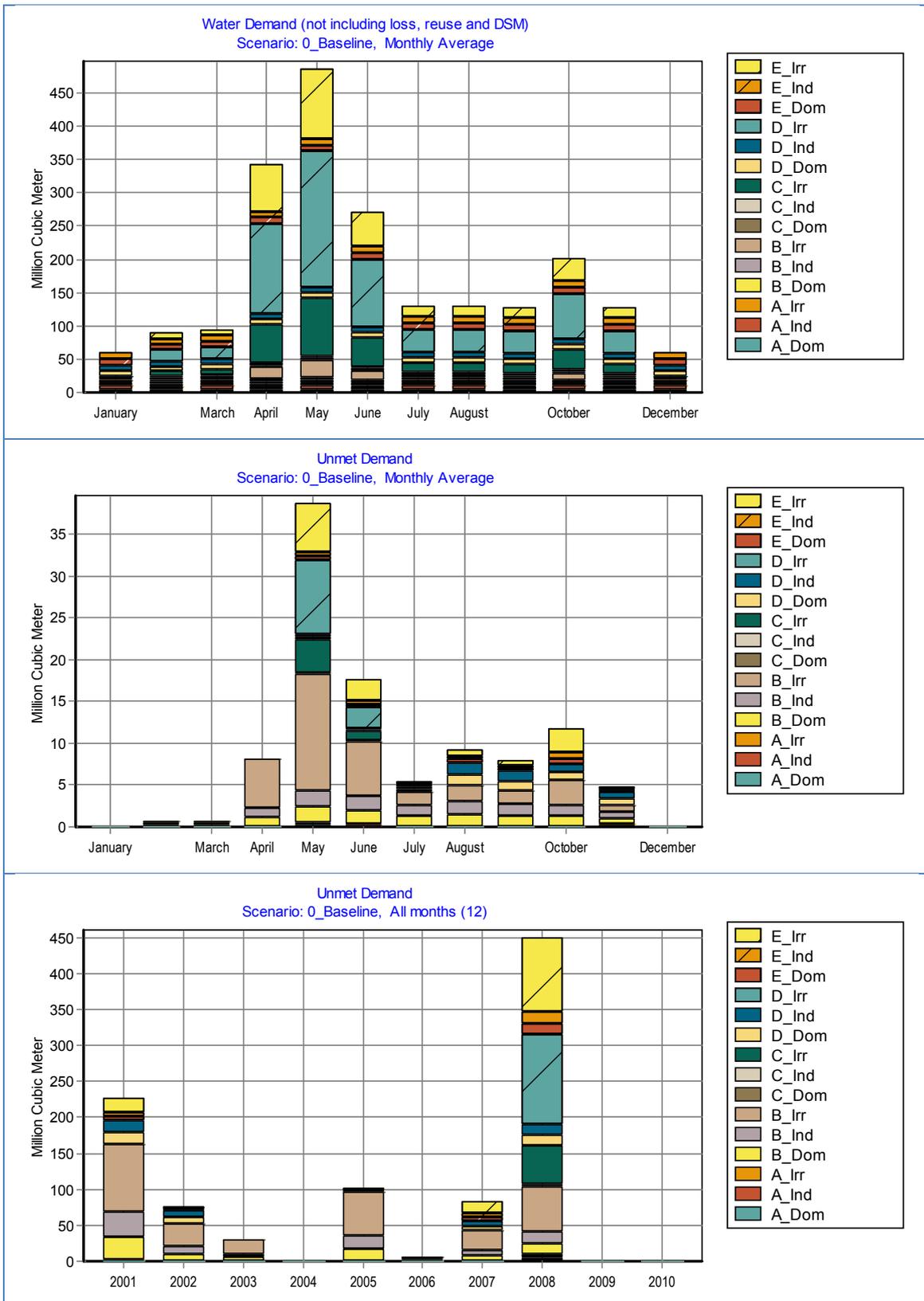
**Figure 9** : permet de constater une variabilité importante de la demande au cours des mois et des années. Aussi, la demande en eau est non satisfaite pour les cinq sous-bassins (irrigation, l'industrie et domestique).

**Figure 10** : montre la quantité d'eau disponible à partir du ruissellement, le drainage et la base pour les sous-bassins versants.

**Figure 11** : montre le volume des réservoirs dans la zone d'étude. Il est clair que pendant le début de ce siècle et vers 2008 les niveaux d'eau étaient à des niveaux critiques faibles.

**Figure 12** : montre la quantité d'énergie hydroélectrique produite par les réservoirs. Allal El Fassi et Al Whada génèrent la majorité de l'hydroélectricité dans le bassin.

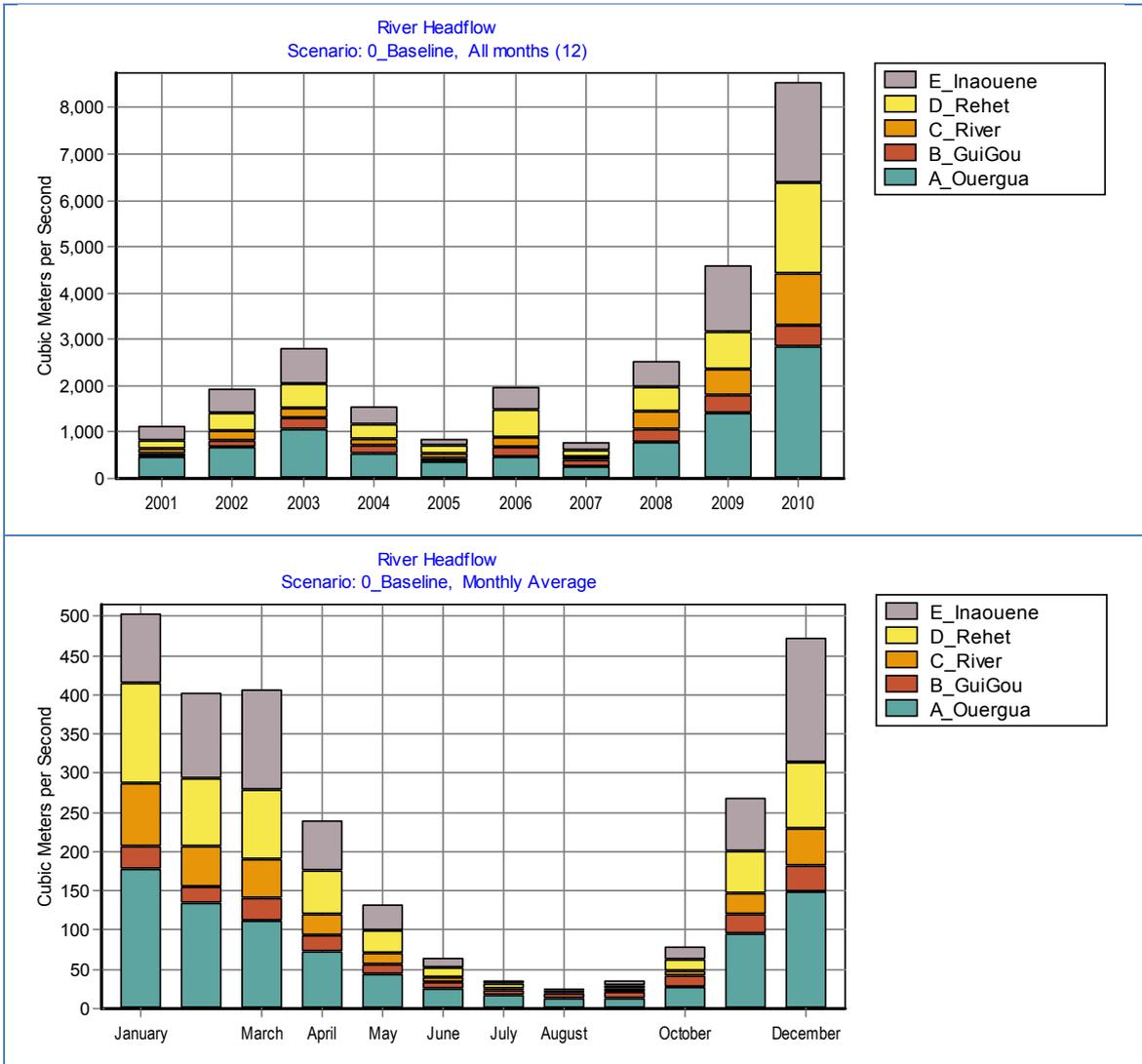
Ce travail a été fait dans un objectif de démontrer l'utilisation de l'outil et pour obtenir une première estimation d'une meilleure compréhension des processus dans le bassin. Il sera affiné dans les phases futures du projet.



**Figure 9**

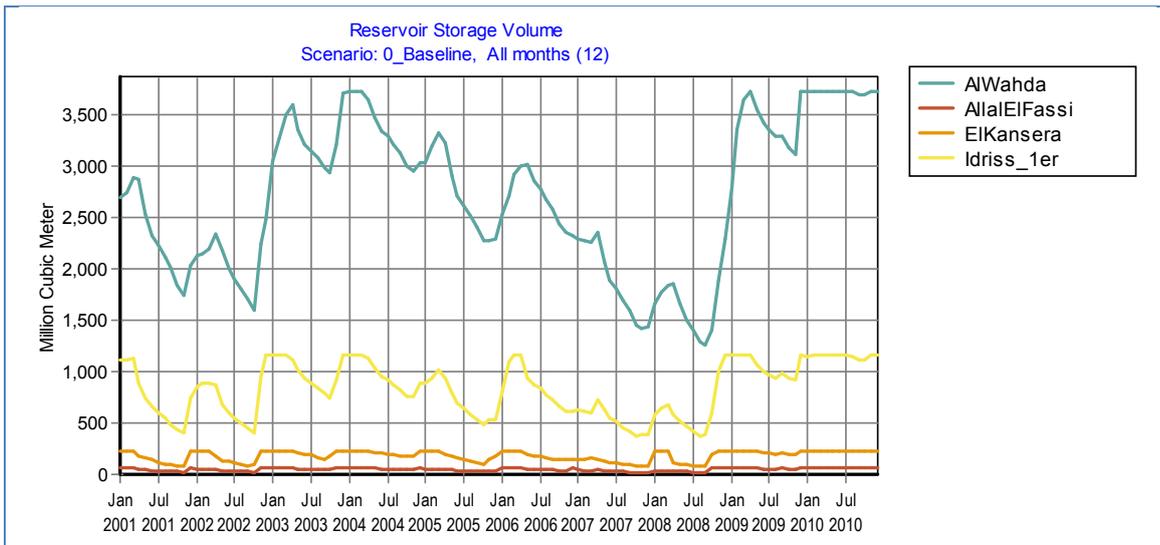
*Demande en eau.*

IRR = Irrigation; Ind = industrie; Dom = domestique; AE fait référence aux cinq sous-bassins.

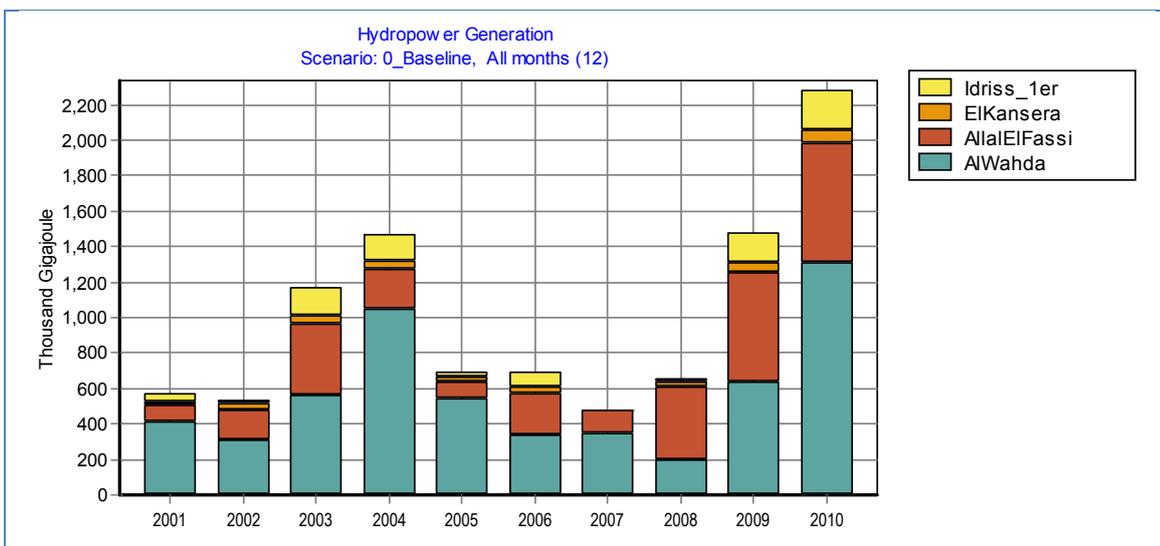


**Figure 10**

*Rendement de l'eau (ruissellement) pour les 10 ans (en haut) et en moyenne par mois (en bas).*



**Figure 11**  
*Evolution du volume de stockage des réservoirs.*

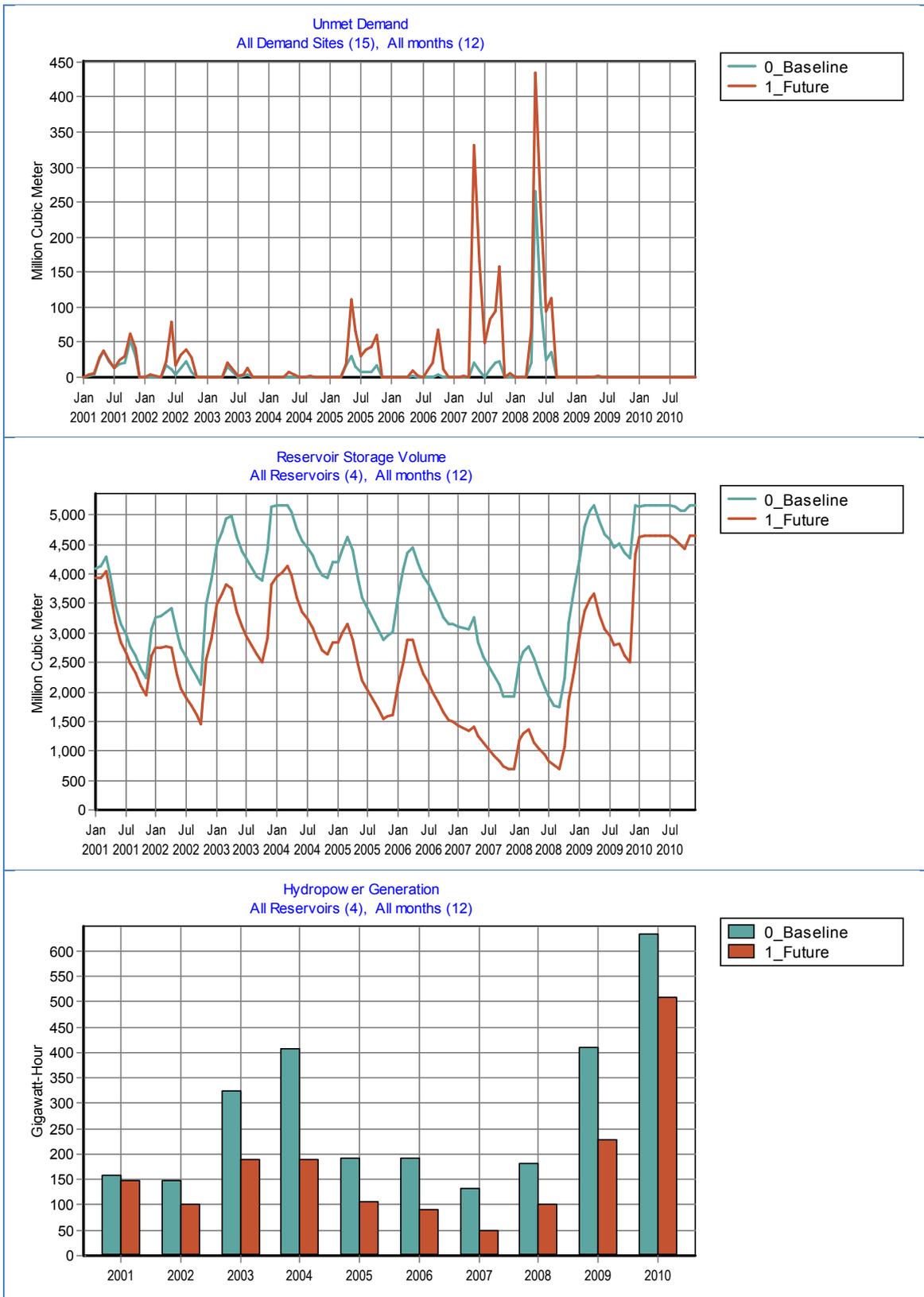


**Figure 12**  
*La production hydraulique de la ligne de base.*

### 3.2 Projections Future

Le bassin du Sebou connaîtra des changements en raison de la croissance économique, l'accroissement de la population et éventuellement des impacts en rapport avec les changements climatiques. Ces facteurs impactent directement la demande en eau. Il est au-delà de la portée de la présente étude d'évaluer tous ces changements qui auront inéluctablement des impacts négatifs sur la disponibilité de la ressource en eau. Il a été supposé que la disponibilité globale de l'eau sera de 80 % par rapport à celles actuelles. Ce fut dans WEAP introduit par la réduction de tous les débits mensuelle de 20%.

L'impact de ces changements est résumé dans la figure 13. La pénurie d'eau sera amplifiée, surtout durant les années sèches où elle sera plus que doubler. Dans le même temps, les niveaux des réservoirs sera de réduire de plus de 20% et ne sera plus capable de stocker suffisamment d'eau pour être utilisée en périodes sèches. La capacité du réservoir semble être suffisante, mais au total est apparemment le facteur limitant. Par ailleurs, l'hydroélectricité génération sera réduite par des centaines de gigawatts-heures chaque année (figure 13).



**Figure 13**

Comparaison scénario de référence avec projection future, en supposant scénario « Business as usual ». Demande mensuel non satisfaite (en haut), le volume mensuel des quatre réservoirs (milieu) et la production hydroélectrique annuelle (en bas).

### 3.3 Mesures GWC

Les problèmes liés à l'eau comme indiqué dans les deux sections précédentes exigent des solutions novatrices. Par conséquent, l'impact de la mise en œuvre des mesures GWC est évalué en utilisant le modèle WEAP.

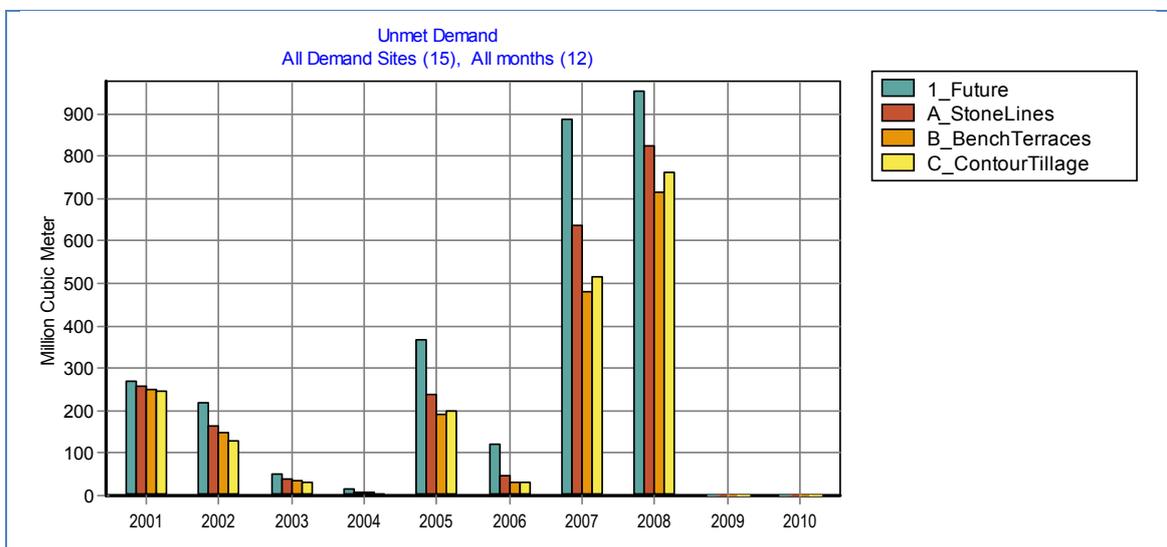
L'hypothèse a été faite que ces mesures seront mises en œuvre sur 25% de l'agriculture pluviale dans le bassin. Il est clair que tous les scénarios ont un effet positif sur la réduction de la pénurie d'eau (Figure 14), le stockage d'eau (figure 15) et la production hydroélectrique (figure 16).

Les revenus, exprimés en millions de dollars américains, pour les cinq principaux secteurs (agriculture pluviale, l'irrigation, domestique, l'industrie et l'hydroélectricité) sont présentés dans (tableau 3). Il est clair que l'augmentation de revenus peut atteindre 43 millions dollars américains chaque année si ces mesures étaient GWC mis en œuvre.

Les avantages de l'agriculture pluviale peut être principalement contribué à la réduction des pertes sols fertiles par l'érosion, tandis que les autres avantages surviennent : plus d'eau claire et moins d'envasement. Une première estimation des coûts de mise en œuvre des mesures de GWC a été faite ainsi.

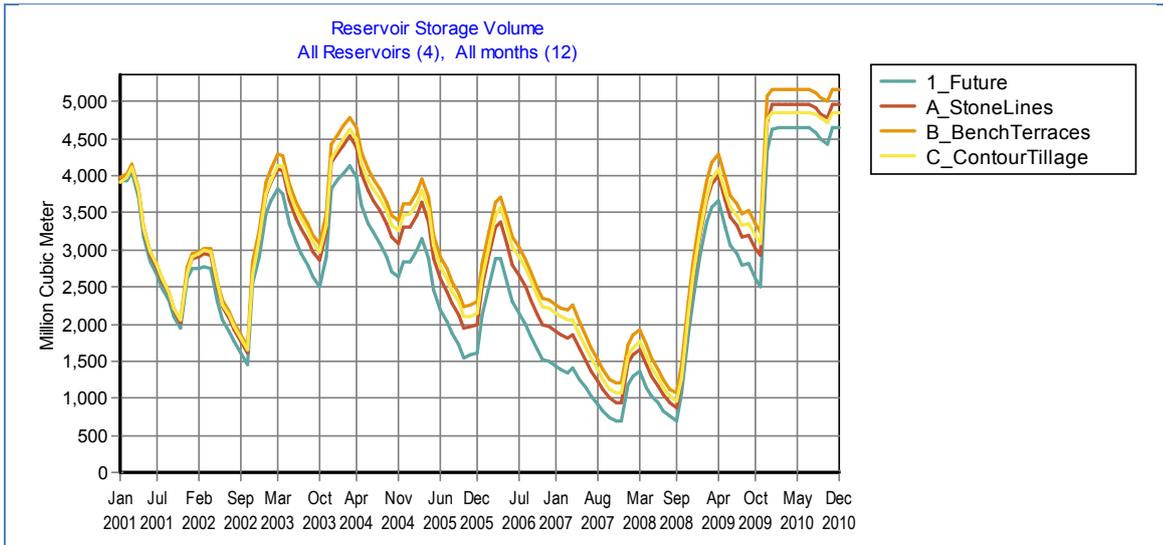
Ces premières estimations sont basées sur une publication de Shiferaw et Holden (2001), sur des travaux antérieurs GWC et sur des estimations d'experts. Il est nécessaire que davantage ces coûts soient affinés. Les coûts de constructions sont supposés être amortis en 10 ans et les coûts d'entretien annuel sont pris en considération.

L'analyse coûts-avantages finale est présentée dans le tableau 4. L'hypothèse de ce coût-bénéfice analyse est que la mise en œuvre aura lieu à 25% de la superficie.

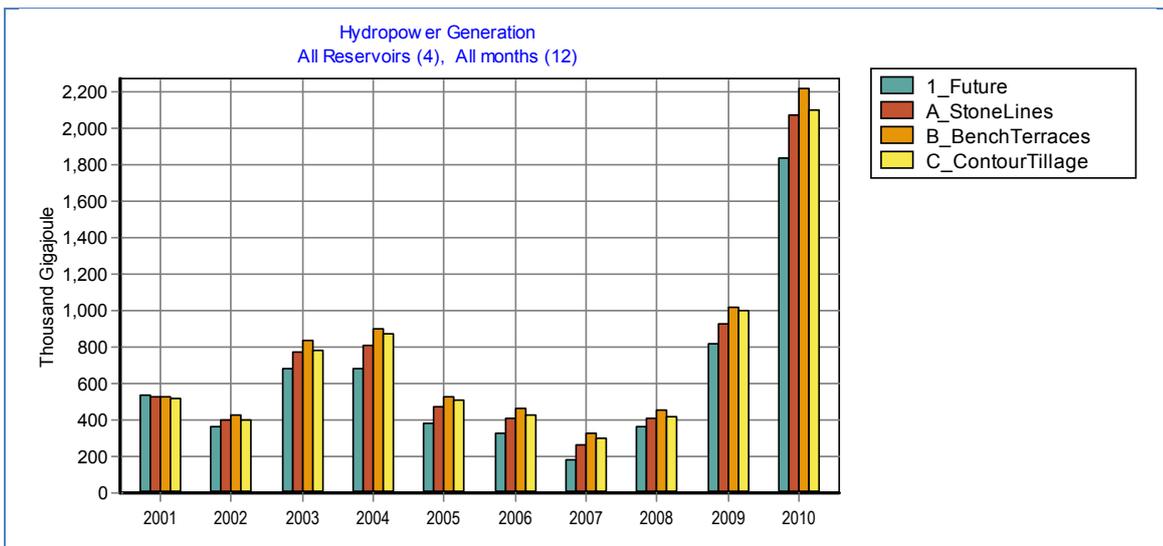


**Figure 14**

*Pénurie d'eau (demande non satisfaite) futur.*



**Figure 15**  
*Réservoir de stockage futur pour les trois scénarios GWC.*



**Figure 16**  
*La production hydraulique futur pour les trois scénarios GWC.*

**Tableau 3***Prestations de services de l'eau sous les différents scénarios.*

Scénario	Pluie		Irrigation.		Domestique & Industriel		Hydropower		TOTAL mUS\$ / an
	mm/an	mUS\$	MCM/an	mUS\$	MCM/an	mUS\$	GWH	mUS\$	
O_Baseline	420	93.6	1,714.9	257.2	737.8	221.3	278	13.9	<b>586</b>
1_Future	336	74.9	1,576.2	236.4	684.6	205.4	172	8.6	<b>525</b>
A_StoneLines	418	93.0	1,623.9	243.6	704.0	211.2	196	9.8	<b>558</b>
B_BenchTerraces	432	96.2	1,649.0	247.3	714.3	214.3	214	10.7	<b>569</b>
C_ContourTillage	408	90.9	1,644.9	246.7	713.1	213.9	203	10.1	<b>562</b>

**Tableau 4***Analyse coûts-avantages des trois mesures de GWC.*

Scénario	Benefits mUS\$ / y	Costs			Total mUS\$ / y	B/C mUS\$ / y
		ha	Construction US\$/ha	Maintanance US\$/ha /y		
A_StoneLines	32.4	111,400	100	40	5.6	26.8
B_BenchTerraces	43.3	111,400	200	50	7.8	35.5
C_ContourTillage	36.4	111,400	0	0	0.0	36.4



## 4 Conclusions

Le concept de crédits d'eau verte aborde la gestion durable des ressources en eau dans un bassin fluvial à la source. Il relie l'eau de pluie qui tombe et est utilisée (vert) sur pluviale des terres aux ressources en eau claire des rivières, des lacs et des eaux souterraines. L'importance de la bonne gestion de l'eau du sol à la fourniture des ressources en eau claire est souvent négligée. Une des raisons pour cela est la difficulté de quantifier l'impact potentiel de ces mesures. En utilisant le modèle SWAT en combinaison avec le modèle WEAP ces avantages potentiels peuvent être évalués.

Le modèle WEAP tel que développé au cours de cette phase initiale aux besoins de validation et d'étalonnage. L'objectif global de l'étude est de démontrer l'utilisation des outils et de fournir une première estimation de l'impact potentiel des mesures GWC. Les résultats devraient donc être utilisés avec précaution. L'hypothèse des trois mesures GWC explorées au cours de cette étude est que la mise en œuvre se déroulera sur environ 25% des zones de culture pluviale.

Les mesures les plus efficaces, en termes d'obtenir des avantages supplémentaires sont la création de terrasses en gradins suivie par le labour et le contour des lignes de pierres. Toutefois, banquettes sont plus chers par rapport aux deux autres mesures et l'analyse avantages-coûts indique que le labour contour est préférable.

Une analyse plus détaillée devrait révéler ce que la mesure la plus efficace GWC est un domaine particulier (la culture, le sol, pente, etc.) Cependant, ces premières analyses indiquent clairement qu'il ya un champ pour introduire Crédit Vert Eau dans le bassin du Sebou.



## 5 References

- Droogers P and Aerts J 2005. Adaptation strategies to climate change and climate variability: a comparative study between seven contrasting river basins. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 339 - 346
- Droogers P, Van Loon A and Immerzeel W 2008. Quantifying the impact of model inaccuracy in climate change impact assessment studies using an agro-hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 12: 1-10
- Droogers P and Bastiaanssen WGM 2002. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 128: 11-18
- Droogers P, Mantel S and Kauffman JH 2006. River basin models to support Green Water Credit assessment. *FutureWater Report 53*
- Falkenmark M 1995. Land-water linkages - A synopsis in Land and Water integration and river basin management. *FAO Land and Water Bulletin* 15-16
- Hunink J, Terink W, Droogers P, Reuter H, van Lynden G 2011. Towards a Proof-of-Concept of Green Water Credits for the Sebou Basin, Morocco. *FutureWater Report 98*
- SEI 2011. WEAP: Water Evaluation And Planning. *Stockholm Environment Institute*: <http://www.weap21.org/>
- Shiferaw B and Holden ST 2001. Farm Level Benefits to Investments for Mitigating Land Degradation: Empirical Evidence from Ethiopia. *Environment and Development Economics* 6: 335-358
- Terink W, Hunink J, Droogers P, Reuter H, van Lynden G, and Kauffman S 2011. *Green Water Management Options in the Sebou Basin: Assessing the Impacts using SWAT. Green Water Credits Morocco: Inception Phase. FutureWater Report 101*
- WOCAT 2011. WOCAT: World Overview of Conservation Approaches and Technologies. <http://www.wocat.net/>



## GWC Reports Kenya

GWC K1	<i>Basin identification</i>	Droogers P and others 2006
GWC K2	<i>Lessons learned from payments for environmental services</i>	Grieg Gran M and others 2006
GWC K3	<i>Green and blue water resources and assessment of improved soil and water management scenarios using an integrated modelling framework.</i>	Kauffman JH and others 2007
GWC K4	<i>Quantifying water usage and demand in the Tana River basin: an analysis using the Water and Evaluation and Planning Tool (WEAP)</i>	Hoff H and Noel S 2007
GWC K5	<i>Farmers' adoption of soil and water conservation: the potential role of payments for watershed services</i>	Porras IT and others 2007
GWC K6	<i>Political, institutional and financial framework for Green Water Credits in Kenya</i>	Meijerink GW and others 2007
GWC K7	<i>The spark has jumped the gap. Green Water Credits proof of concept</i>	Dent DDL and Kauffman JH 2007
GWC K8	<i>Baseline Review of the Upper Tana, Kenya</i>	Geertsma R, Wilschut LI and Kauffman JH 2009
GWC K9	<i>Land Use Map of the Upper Tana, Kenya: Based on Remote Sensing</i>	Wilschut LI 2010
GWC K10	<i>Impacts of Land Management Options in the Upper Tana, Kenya: Using the Soil and Water Assessment Tool - SWAT</i>	Hunink JE, Immerzeel WW, Droogers P, Kauffman JH and van Lynden GWJ 2011
GWC K11	<i>Soil and Terrain Database for the Upper Tana, Kenya</i>	Dijkshoorn JA, Macharia PN, Huting JRM, Maingi PM and Njoroge CRK 2010
GWC K12	<i>Inventory and Analysis of Existing Soil and Water Conservation Practices in the Upper Tana, Kenya</i>	Muriuki JP and Macharia PN 2011
GWC K13	<i>Estimating Changes in Soil Organic Carbon in the Upper Tana, Kenya</i>	Batjes NH 2011
GWC K14	<i>Costs and Benefits of Land Management Options in the Upper Tana, Kenya: Using the Water Evaluation And Planning system - WEAP</i>	Droogers P, Hunink JE, Kauffman JH and van Lynden GWJ 2011
GWC K15	<i>Cost-Benefit Analysis of Land Management Options in the Upper Tana, Kenya</i>	Onduru DD and Muchena FN 2011
GWC K16	<i>Institutes for Implementation of Green Water Credits in the Upper Tana, Kenya</i>	Muchena FN and Onduru DD 2011
GWC K17	<i>Analysis of Financial Mechanisms for Green Water Credits in the Upper Tana, Kenya</i>	Muchena FN, Onduru DD and Kauffman JH 2011

## GWC Reports Morocco

GWC M1	<i>Impacts of Land Management Options in the Sebou Basin: Using the Soil and Water Assessment Tool - SWAT</i>	Terink W, Hunink JE, Droogers P, Reuter HI, van Lynden GWJ and Kauffman JH 2011
GWC M2a	<i>Options de gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou, Maroc – Analyse avantages-coûts utilisant le modèle WEAP</i>	Droogers P, W Terink, J Hunink, S Kauffman and G van Lynden 2011
GWC M2b	<i>Green Water Management Options in the Sebou Basin: Analysing the Costs and Benefits using WEAP</i>	
GWC M3a	<i>Aspects institutionnels et financiers</i>	Benabderrazik H 2011
GWC M3b	<i>Institutional and Financial Aspects</i>	



ISRIC - World Soil Information



Agence du Bassin Hydraulique du Sebou



VU University Amsterdam

Centre for International Cooperation



Gouvernement Marocain



International Fund for Agricultural Development



FutureWater





ISRIC – World Soil Information has a mandate to serve the international community as custodian of global soil information and to increase awareness and understanding of soils in major global issues.

More information: [www.isric.org](http://www.isric.org)