



**Estimation des volumes d'eau pompés dans la nappe
pour l'irrigation (Plaine du Haouz, Marrakech, Maroc).
Comparaison d'une méthode statistique et d'une
méthode basée sur l'utilisation de données de
télédétection**

A. Abourida, Vincent Simonneaux, S. Errouane, F. Sighir, B. Berjami, F. Sgir

► **To cite this version:**

A. Abourida, Vincent Simonneaux, S. Errouane, F. Sighir, B. Berjami, et al.. Estimation des volumes d'eau pompés dans la nappe pour l'irrigation (Plaine du Haouz, Marrakech, Maroc). Comparaison d'une méthode statistique et d'une méthode basée sur l'utilisation de données de télédétection. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 2008, 21 (4), pp.489-501. ird-00389822

HAL Id: ird-00389822

<https://ird.hal.science/ird-00389822>

Submitted on 29 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ESTIMATION DES VOLUMES D'EAU POMPÉS DANS LA NAPPE POUR L'IRRIGATION (PLAINE DU HAOUZ, MARRAKECH, MAROC). COMPARAISON D'UNE MÉTHODE STATISTIQUE BASÉE SUR L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION

*Estimation of groundwater volumes pumped for irrigation (Haouz Plain, Marrakesh, Morocco).
Comparison of a statistical and remote sensing methods.*

ABOURIDA AAHD^{*1}, VINCENT SIMONNEAUX², ERROUANE SADIK¹, BERJAMI BRAHIM³, SGHIR FATHALLAH⁴

¹ Département de géologie, Faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, avenue Prince Moulay Abd allah,
BP 2390, 40 000 Marrakesh, Maroc.

² IRD-CESBIO, 18, avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France.

³ Agence de bassin hydraulique du tensift (ABHT), Marrakesh, Maroc.

⁴ Office Régional de mise en valeur agricole du Haouz (ORMVAH), Marrakesh, Maroc

Reçu le 26 juillet 2006, accepté le 27 mars 2008

RÉSUMÉ

L'agriculture irriguée est une des composantes essentielles du développement économique du Haouz avec le tourisme et l'artisanat. Elle représente plus de 85 % de la consommation en eau du bassin versant du Tensift. L'aridité climatique qui règne dans la région, ainsi que les périodes de sécheresse récurrentes depuis une dizaine d'années, induisent une mobilisation de

plus en plus importante des eaux souterraines et de surface, avec un recours croissant à l'irrigation.

L'objectif principal de cette étude est la détermination des volumes d'eau pompés à partir de la nappe phréatique, dont l'essentiel est destiné à l'irrigation. Pour ce faire, nous avons établi une carte d'occupation du sol par classification de trois images Landsat TM acquises à trois dates différentes. Cette

*Auteur pour correspondance :

Téléphone: 212-44-43-16-26

Télécopie : 212-44-43-16-26

Courriel : a.abourida@ucam.ac.ma

carte nous a permis de localiser les différentes cultures irriguées et d'estimer les consommations totales à partir des besoins en eau standard des cultures (méthode FAO). En comparant ces chiffres avec les volumes d'eau de surface attribués par l'organisme en charge de la gestion de l'irrigation à partir d'eau de surface au niveau de la plaine (ORMVAH - Office Régionale de Mise en Valeur Agricole du Haouz), nous avons pu estimer le volume d'eau moyen pompé pour l'irrigation à 481 Mm^3 , valeur comprise dans l'intervalle $(271; 691) \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ associé aux incertitudes sur l'estimation des consommations des cultures. Par ailleurs, l'interpolation graphique entre les débits réels estimés lors de l'enquête de terrain 1986 et 1971 et les autorisations de débits attribués par l'agence de bassin au niveau de la zone fournit une estimation des pompages effectifs d'environ $495 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$.

Mots-clés : télédétection, occupation du sol, irrigation, pompage, interpolation.

ABSTRACT

Irrigated agriculture is one of the main components of the economic development of the Haouz Plain, along with tourism and craft industry. It represents more than 85% of water consumption in the Tensift catchment. The dry climate, as well as the recurrent periods of drought during the past ten years, have led to an increase in the use of surface and ground waters, used mainly for irrigation. The main objective of this study was to determine the volume of groundwater pumped for irrigation. We created a land use map through the supervised classification of three Landsat images obtained on three different dates. This map enabled us to locate the various irrigated crops and to calculate their total water needs from the consumption values for each crop, using the FAO method. By comparing the volumes of surface water allocated by ORMVAH (Office Régionale de Mise en Valeur Agricole du Haouz) with the crop requirements, we could estimate the average volume of water pumped for irrigation to be $481 \text{ Mm}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$. The values ranged between 271 and $691 \text{ Mm}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ due to uncertainties in the estimation of crop water consumption. In addition, the graphic interpolation between the actual volume of water extracted, as determined by field investigations in 1986 and 1971, and the pumping flow allowed by the local water authority in the Haouz Plain, gave an estimated value of approximately $495 \text{ Mm}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$.

Key word: remote sensing, land use, irrigation, pumping, interpolation.

1. INTRODUCTION

Ces dernières décennies, la demande en eau s'est accrue au Maroc, consécutivement à la croissance démographique, au développement du tourisme, au développement industriel et agricole. Le pays a adopté depuis 1968 une politique de développement de l'irrigation, qui prévoyait l'aménagement d'un million d'hectares sur l'ensemble du royaume en 2000 (ALEXANDRE, 2002).

Au niveau de la plaine du Haouz, l'agriculture irriguée, qui consomme jusqu'à 85 % de la ressource en eau disponible, est la principale responsable de cette croissance, celle-ci étant accentuée par les sécheresses fréquentes se produisant depuis presque 10 ans. Or, la ressource disponible est actuellement insuffisante pour répondre à la demande de manière durable. Les eaux de surface sont quasiment toutes mobilisées, et une part importante des périmètres aménagés ne peut recevoir toute l'eau nécessaire pour l'irrigation. Pour palier ce manque, le recours aux pompages dans la nappe phréatique du Haouz s'intensifie donc et provoque une surexploitation de celle-ci (ABOURIDA *et al.* 2004). Les baisses moyennes du niveau d'eau observées depuis 20 ans sont de l'ordre de 0,8 à $1,6 \text{ m} \cdot \text{an}^{-1}$ dans les secteurs du N'fis et du Haouz central et de 0,2 à $0,5 \text{ m} \cdot \text{an}^{-1}$ dans le secteur oriental (C.S.E.C., 2001).

Le manque de précipitations dans les zones arides limite le développement agricole malgré l'existence d'importantes superficies de sols cultivables (DEBBARH, 1997). C'est le cas des zones arides et semi-arides du nord du Mexique (LOYER *et al.*, 2001) et des pays du Maghreb (ABDELLAOUI, 1989). Les eaux souterraines sont alors sollicitées lorsqu'elles sont disponibles, avec un risque fréquent de surexploitation. Dans ce contexte, l'estimation des pompages est une information indispensable pour une gestion raisonnée de la ressource en eau.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'apport de la télédétection pour la quantification des pompages, et de comparer les résultats obtenus à des méthodes basées sur des enquêtes terrain, plus classiques mais exigeant des ressources humaines et matérielles très importantes (environ 10 162 sites de pompage recensés dans la plaine du Haouz).

La première méthode consiste à utiliser la télédétection pour estimer la consommation en eau des cultures à partir de la cartographie de l'occupation du sol, puis à la comparer aux apports en eau de surface au niveau de la plaine (ORMVAH) pour en déduire une estimation de la fraction pompée. La deuxième méthode repose sur l'analyse des autorisations de pompage délivrées par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH) et l'Agence de Bassin Hydrologique du Tensift (ABHT).

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1 Le contexte physique

La plaine du Haouz s'étend sur une superficie de 6 000 km² au centre du Maroc autour de la ville de Marrakech (Latitude nord 32°, Longitude est 8°). Elle est limitée au nord par le massif montagneux ancien de faible altitude des Jbilet, au sud par la chaîne du Haut-Atlas s'élevant jusqu'à 4 165 m (mont Toubkal), à l'ouest par le plateau d'Essaouira-Chichaoua qui la sépare de l'océan Atlantique, et à l'est par les premiers reliefs du Moyen-Atlas (Figure 1). Son réseau hydrographique est constitué par deux systèmes, principalement l'oued Tensift à l'ouest qui reçoit tous les affluents du Haouz central et

occidental, et les oueds Tessaout et Lakhdar à l'Est qui font partie du bassin versant de l'Oum Rbiaa. Ces affluents sont caractérisés par un écoulement faible intermittent avec des variations saisonnières importantes. Seules les grosses crues arrivent jusqu'au Tensift, les autres étant captées par l'irrigation traditionnelle en montagne et sur les piémonts à la sortie des montagnes. Le climat du Haouz est semi-aride, caractérisé par des précipitations de l'ordre de 250 mm par an et d'importants écarts de température entre l'hiver et l'été avec des températures moyennes journalières variant entre 5 et 35 degrés celsius. L'évapotranspiration de référence (Penman Monteith) enregistrée à Marrakech est de l'ordre de 1 600 mm par an (ER-RAKI, 2007).

Les dépôts néogènes et plioquaternaires issus du démantèlement de la chaîne atlasique abritent une nappe libre

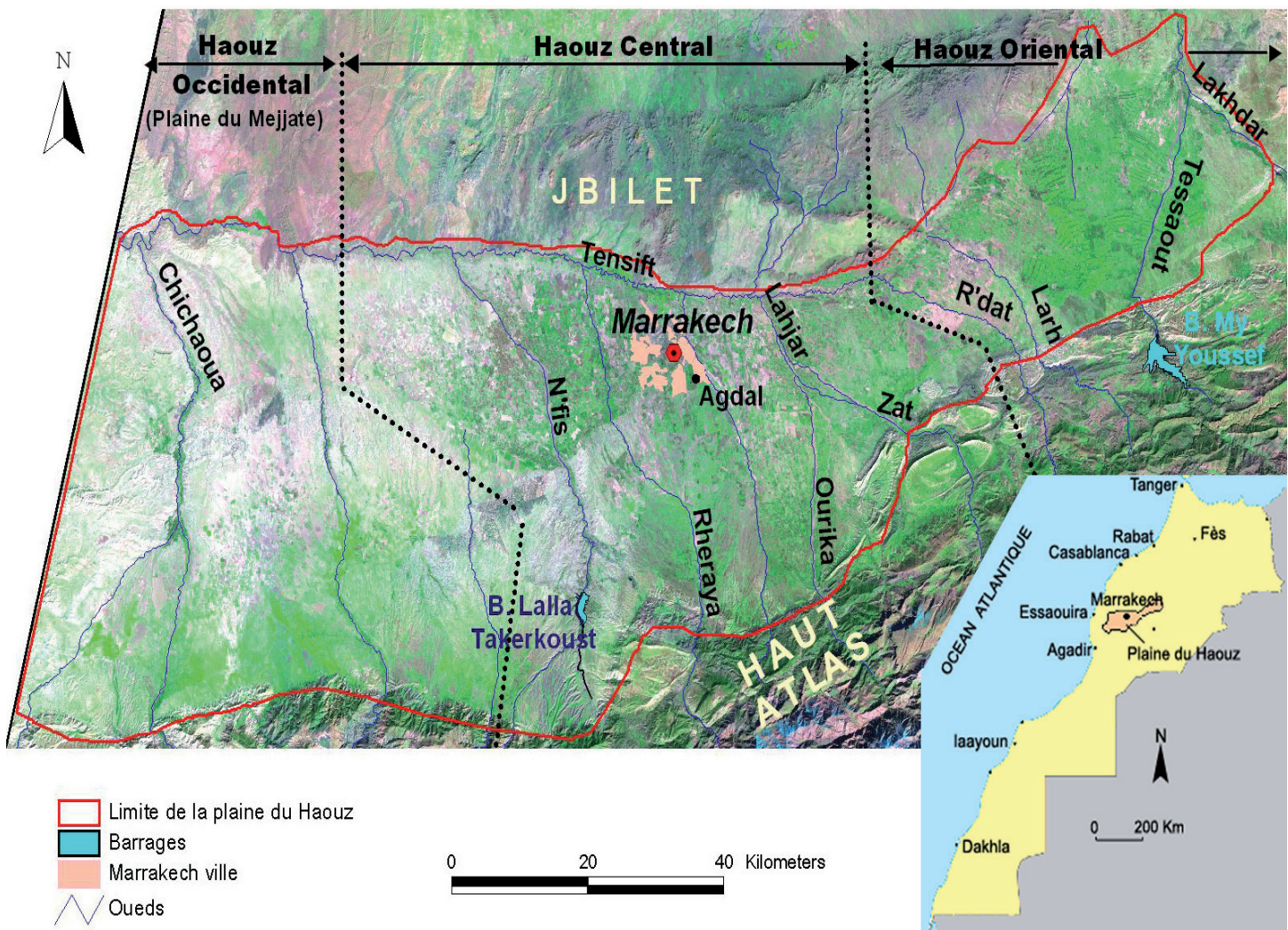


Figure 1. Situation géographique de la plaine du Haouz et réseau hydrographique. Composition colorée landsat TM canaux 7, 4, 3 (R, V, B), résolution 30 m. Le vert représente la végétation irriguée en plaine, et la végétation naturelle dans le Haut-Atlas.
Geographic location of the Haouz plain and the stream network. Landsat TM color composition 7, 4, 3 (=R, V, B), 30 m resolution. The green color represents irrigated crops in the Plain, and natural vegetation in the Haut-Atlas.

et généralisée sur l'ensemble de la plaine allant de 10 à 20 m au nord et pouvant atteindre 70 m au sud. Les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe sont très variables et reflètent la complexité de la structure profonde de la plaine et de la variabilité lithologique des formations plioquaternaires (BEAUCHAMP et PETIT, 1983; SINAN, 1986). Les réserves de la nappe sont estimées entre 7 et 9 milliards de m³ d'eau (SINAN *et al.*, 2003) pour une recharge annuelle moyenne estimée à 465 Mm³ (communication interne ABHT). Trois ouvrages de retenue des eaux superficielles ont été réalisés entre 1935 et 1987 pour alimenter la zone d'étude : le barrage Lalla Takerkoust, le Barrage My Youssef et le Barrage My Hassan 1^{er} (ALEXANDRE, 2002). Ces barrages régularisent un volume d'eau d'environ 665 Mm³ destiné essentiellement à l'irrigation et dans une moindre mesure à l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville de Marrakech. Ces barrages ont servi à la mise en place de périmètres irrigués modernes gérés par l'ORMVAH qui s'étendent sur 102 000 ha, dont 50 000 ha pour le Haouz central et 52 000 ha pour la Tessaout amont. Outre ces périmètres modernes, de nombreux périmètres traditionnels sont présents sur les piedmonts de l'Atlas. Ils sont alimentés par les oueds de montagne *via* un réseau de canaux traditionnels (seguias). Les volumes d'eau utilisés pour l'irrigation au niveau du bassin du Tensift étaient estimés à 1 330 Mm³•an⁻¹ en 1990 et passeraient à 1 670 Mm³•an⁻¹ en 2020 (DEBBARH et BADRAOUI, 2002). La consommation d'eau potable en 2000 était de 80 Mm³ par an - dont 12,6 Mm³•an⁻¹ prélevés directement de la nappe (SINAN *et al.*, 2003) - et devrait passer à 110 Mm³•an⁻¹ en 2010, suite au développement de la ville de Marrakech (ALEXANDRE, 2002).

Du fait des sécheresses répétées de ces dix dernières années, l'eau de surface disponible dans les barrages et à la sortie des oueds ne couvre plus les besoins de l'irrigation. Les agriculteurs qui en ont les moyens recourent donc massivement aux pompages dans la nappe, ce qui a provoqué un abaissement important de son niveau.

2. 2 Production agricole et besoins en eau

D'après les statistiques de l'ORMVAH, 51 % des sols irrigués de la plaine sont destinés à la céréaliculture, 38 % à l'arboriculture, 9 % à la production de fourrage (luzerne et bersim) et 2 % au maraîchage qui alimente la ville de Marrakech. Concernant l'arboriculture, l'olivier en représente 78 %, l'abricotier 7 %, les agrumes 4 %, l'amandier 4 %, la vigne 3 %, le pommier 2 %, les 2% restants étant occupé par diverses espèces. Toute la partie non irriguée de la plaine, dite zone de « bour », est occupée par du blé pluvial qui ne se développe que lors des années suffisamment pluvieuses.

Les besoins en eau de ces différentes cultures sont estimés par l'ORMVAH d'après le [tableau 1](#). Ces valeurs sont celles issues de l'application de la méthode FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Bien qu'ils soient majoritairement sempervirents, les arbres présentent des besoins en eau qui varient selon l'espèce et la saison, selon le climat (humidité, température, vent, rayonnement) mais aussi selon les caractéristiques du couvert végétal (notamment l'indice foliaire). Ainsi, pour l'olivier, le besoin maximal en eau est enregistré entre mars et juin (période de croissance foliaire maximale). Au niveau du site expérimental « Agdal » du projet SudMed près de Marrakech, la consommation en eau des oliviers mesurée sur le terrain (par mesure de flux turbulents) est de l'ordre de 9 250 m³•ha⁻¹•an⁻¹ (ER-RAKI *et al.*, 2007 b). Cette différence importante avec les valeurs ORMVAH (6 750 m³•ha⁻¹•an⁻¹) s'explique par le fait que le verger observé est ancien et particulièrement développé et bien irrigué par rapport à la moyenne de la plaine, et que l'herbe se développe entre les travaux périodiques du sol.

La culture céréalière la plus importante est le blé. Il présente un cycle d'environ six mois, la période d'irrigation allant du début de l'hiver au printemps. La valeur mesurée de la consommation en eau du blé dans le cadre de SudMed à l'aide de mesure de flux turbulents, sur une parcelle bien irriguée est de l'ordre de 5 000 m³•ha⁻¹•an⁻¹ (HADRIA *et al.*, 2005).

Tableau 1. Matrice de confusion en pourcentage.
Table 1. Confusion matrix in percent.

	Observations terrain				
	Classes	Arbres	Sol nu	Annuelles	Total
Classification	Arbres	77,84	7,84	9,05	32,91
	Sol nu	3,67	64,68	21,03	30,04
	Annuelles	18,49	27,48	68,97	36,77
	Total	100	100	100	100

Une estimation de la consommation d'eau réalisée à partir d'images satellitaires et de l'application de méthode FAO, pour une zone de 2 800 ha, a fourni une valeur moyenne de $3\,700\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (DUCHEMIN *et al.*, 2006) qui traduit les conditions réelles pour une année sèche ou la disponibilité de l'eau était limitante.

À partir de ces différentes valeurs théoriques de besoins en eau et des consommations en eau relevées ponctuellement, nous tenterons d'estimer une valeur moyenne de consommation pour l'ensemble de la plaine, et de lui associer un intervalle de variation. Le développement de la technique du goutte à goutte permettrait d'optimiser l'usage de l'eau, mais son application peine à se généraliser étant donné son coût. De même, l'utilisation de méthodes de rationalisation des apports comme la méthode FAO ne se développe guère pour l'instant.

3. CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL

Pour cette étude, trois images Landsat TM correspondant à différents états végétatifs des cultures ont été acquises, en février et août 2000 - année bien arrosée - et en février 2002, année sèche au cours de laquelle seules les cultures irriguées se sont bien développées. Le choix de Landsat est lié, d'une part, au fait qu'une seule scène couvre toute la plaine et, d'autre part, à leur coût bien moindre que les images SPOT correspondantes. De plus, étant donnée l'échelle spatiale à laquelle on travaille, la résolution spatiale du capteur TM est largement suffisante.

Dans un premier temps, nous avons effectué une classification pour chaque date, puis nous avons combiné ces trois classifications pour déterminer de nouvelles classes. Dans un deuxième temps, les zones irriguées ont été mises en évidence pour les trois dates par sélection des classes initiales, puis combinées à la classification finale (ABOURIDA *et al.*, 2003a).

3.1 Classification et combinaison des trois dates

Nous avons débuté par un examen visuel de l'occupation du sol sur les compositions colorées TM7, TM4, TM3 (R, V, B) aux trois dates disponibles. En nous appuyant sur notre connaissance du terrain et sur la réponse spectrale de chaque classe sur l'image, nous avons pu distinguer de manière approximative pour chaque date les classes suivantes : les arbres (vert sombre), les annuelles (vert très clair), les arbres avec sous-couche d'annuelles (vert moyen) et les sols nus (**donner une couleur**). Malgré la simplicité de cette typologie, elle est satisfaisante par rapport à notre objectif qui est d'obtenir

des classes de consommation d'eau. Différentes méthodes de classification sont disponibles pour identifier l'occupation du sol dans les images satellitaires (RICHARDS, 1986; DAVIS et DAVIS, 1978). Étant donné que les classes à mettre en évidence étaient partiellement distinctes visuellement, nous avons pu délimiter, sur l'image, de nombreuses parcelles d'entraînement pour réaliser des classifications supervisées à chaque date, en utilisant les six bandes TM (toutes sauf le thermique). Il a été possible, après examen visuel des premiers résultats, de modifier le jeu de parcelles d'apprentissage pour corriger les erreurs de classement observées. Ces ajustements sont répétés jusqu'à obtention d'une classification satisfaisante pour chaque date.

Toutefois, pour certaines classes, le risque d'erreur est important. Les arbres comportant des annuelles en sous-couche ont une signature spectrale très proche des annuelles. Par ailleurs, les annuelles peu développées se distinguent mal des sols nus, et les annuelles irriguées peu développées se confondent avec les annuelles pluviales dites « bour ». Les classifications effectuées à chaque date comportent ainsi des incertitudes, mais nous faisons l'hypothèse qu'en combinant trois dates, on augmente la quantité d'information utilisée, ce qui renforce la précision des classes identifiées. On distingue ainsi après combinaison quatre modes d'occupation du sol : arbres (olivier dominant), arbres + annuelles (association très commune dans la plaine de Haouz), annuelles et sol nu. Les quatre classes obtenues pour chaque date fournissent 64 combinaisons possibles. Certaines de ces combinaisons sont cohérentes et comportent des classes compatibles. Par exemple, la combinaison (sol nu, annuelles, sol nu) a une signification évidente, il s'agit de la classe annuelles. Pour les combinaisons comportant des ambiguïtés, on affecte la classe qui semble la plus plausible en tenant compte des erreurs possibles pour une ou plusieurs dates. Ainsi, pour la combinaison (annuelles, sol nu, arbres + annuelles), on peut hésiter entre les classes résultantes (arbres + annuelles et annuelles). Le choix de la classe finale (arbres + annuelles) reviendrait à considérer des erreurs pour les deux premières dates, dont une confusion entre sol nu et arbres qui est peu probable. En revanche, le choix de la classe finale annuelles revient simplement à considérer une erreur pour la dernière date, qui correspond à la confusion fréquente entre arbres + annuelles et annuelles, ce qui est plus probable. C'est donc cette dernière classe, annuelles, qui sera retenue pour cette combinaison. En suivant un raisonnement analogue, lorsque la classe arbres est associée à une autre date aux classes annuelles ou arbres + annuelles, on définit la classe arbres + annuelles.

Cette résolution des combinaisons, bien que subjective, se base sur une appréciation des probabilités d'erreur dans les combinaisons.

La matrice de confusion (Tableau 1) a été réalisée pour la classification finale à partir de parcelles observées sur le terrain en avril 2002. La visite ayant été réalisée à une seule période,

et les annuelles sous arbres à une date donnée n'étant pas bien représentatives de l'ensemble de la saison, nous n'avons considéré que trois classes, arbres, annuelles, sol nu. Cette matrice montre une précision de l'ordre de 78 % pour les arbres, 69 % pour les annuelles et 65 % pour les sols nus. La confusion a surtout lieu entre annuelles et sols nus, ce qui n'est pas très surprenant car une seule date d'observation terrain n'est pas bien représentative pour des végétations temporaires. De plus, notre classification est une synthèse entre 2002 et 2000, alors que la tournée terrain correspond seulement à 2002 (année sèche).

3.2 Identification des surfaces irriguées

La complexité des modes d'irrigation dans la plaine du Haouz fait qu'on ne peut pas se baser simplement sur un zonage spatial *a priori* pour identifier les zones irriguées. L'identification des zones irriguées va donc se baser sur une analyse de l'occupation du sol. Sur la carte résultante, les classes arbres et arbres + annuelles peuvent être considérées comme systématiquement irriguées. Par contre, pour distinguer les annuelles irriguées des annuelles pluviales, il nous a fallu revenir aux images initiales pour créer des masques irrigué / non irrigué pour chaque date.

- Pour l'image du 3 février 2000, la classification initiale a permis de différencier les annuelles irriguées des annuelles pluviales de type « bour », bien développées dans la plaine à cette date suite aux précipitations hivernales, grâce à une différence significative de signature spectrale. On n'a pas pris en considération les arbres, car ils se confondent localement avec des annuelles pluviales sur certains sols sombres. Par contre, les arbres + annuelles ont été retenus. On notera que les classes arbres ou arbres + annuelles d'une année apportent une information supplémentaire par rapport à la combinaison finale car elles n'ont pas toujours été retenues en arbres dans la combinaison. Par exemple, (arbres, sol nu, sol nu) donne comme classe résultante annuelles, étant donné qu'on suppose alors que la classe arbres correspond à des annuelles identifiées à tort comme des arbres.
- Pour le 13 août 2000, on a retenu les classes arbres, arbres + annuelles et annuelles, ces dernières étant toutes irriguées à cette date. On ajoute une classe correspondant à certaines annuelles récoltées, identifiables par leur réponse spectrale typique après récolte. Ces parcelles sont facilement repérables par leur coloration cyan sur la composition colorée utilisée TM7, TM4, TM3 (R, V, B).
- Pour l'image du 8 février 2002, année sèche au cours de laquelle les besoins en eau de la plupart des cultures sont couverts par l'irrigation, on retient la classe arbres + annuelles et annuelles. On écarte également les arbres en

raison des confusions possibles avec les annuelles pluviales peu développées sur sols sombres.

Ainsi, la somme des informations issues des classifications à différentes dates nous a permis d'obtenir une caractérisation améliorée de l'utilisation du sol en cinq catégories (Figure 2) : arbres, annuelles, annuelles irriguées, arbres + annuelles, sol nu. Des études antérieures ont montré que même avec des données satellitaires plus importantes - des séries annuelles d'une dizaine d'images Landsat TM ou SPOT réparties sur la saison agricole - on ne parvenait pas à une meilleure typologie, en raison de la complexité de l'occupation du sol (SIMONNEAUX et FRANÇOIS, 2003). Par ailleurs, bien que grossière, cette typologie simplifiée est suffisante pour l'estimation de besoins en eau des cultures (SIMONNEAUX *et al.*, 2007).

4. BILAN HYDROLOGIQUE DE L'IRRIGATION

4.1 Évaluation par télédétection des volumes d'eau pompés

4.1.1 Estimation de la consommation en eau

Le calcul des volumes d'eau utilisés au niveau de la plaine tient compte des besoins en eau de chaque culture. Étant donné qu'au sein d'une classe on trouve des cultures différentes, il a fallu estimer une composition végétale moyenne pour les différentes classes afin de leur associer un besoin en eau moyen.

Les cultures annuelles occupent 62 % des sols irrigués de la plaine et sont constituées de 82 % de céréales, 15 % de fourrages et 3 % de maraîchage. Les céréales étant constituées à plus de 85,6 % de blé, nous retiendrons, pour cette classe, les besoins de cette espèce pour laquelle nous disposons de plusieurs estimations. L'ORMVAH utilise la valeur de $5\,250\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, proche de la valeur $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ mesurée par HADRIA *et al.* (2005) en condition d'eau non limitante, alors que DUCHEMIN *et al.* (2006) ont estimé $3\,700\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en conditions réelles pour une année sèche. Ces deux valeurs nous semblent correctement décrire l'intervalle de variation de la consommation d'eau réelle des céréales ($3\,700$; $5\,250$) $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $4\,475\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Pour le fourrage et le maraîchage, nous considérerons les valeurs utilisées par l'ORMVAH, soit respectivement $12\,220\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et $11\,790\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Pour obtenir une estimation globale de la consommation d'eau de la classe annuelle, nous calculons la moyenne des consommations des différentes cultures qui la constituent en les pondérant par leurs surfaces relatives. On obtient ainsi

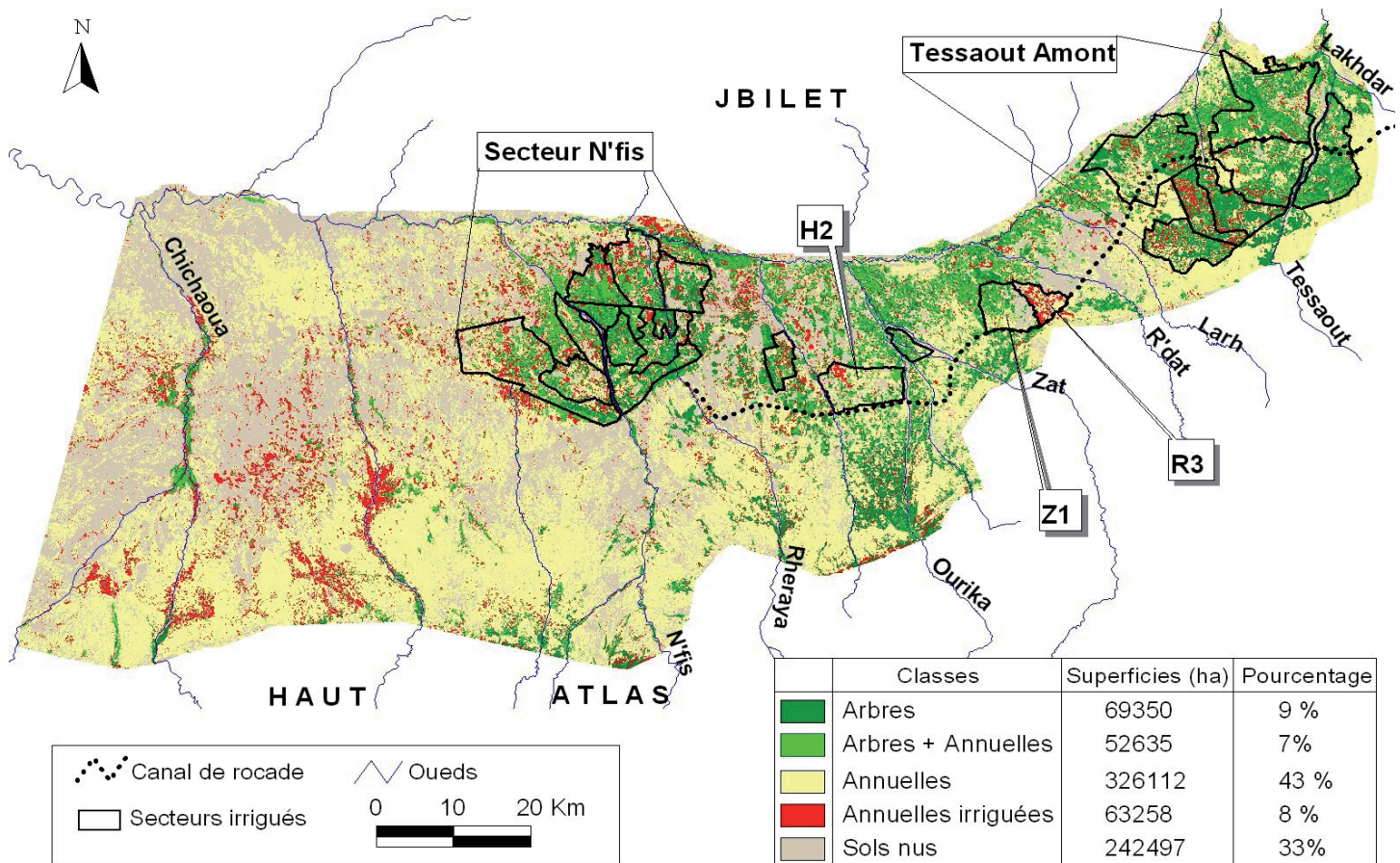


Figure 2. Carte d'occupation du sol obtenue par combinaison des classifications supervisées de trois images landsat TM de dates différentes. Les cultures irriguées font apparaître les secteurs modernes en plaine, et les périmètres traditionnels à la sortie des oueds de montagne.
Land use map obtained by combining supervised classifications of Landsat obtained on three separate dates. Irrigated crops show the modern sectors in the Plain and traditional perimeters at the mouth of mountains wadis.

l'intervalle (5 198; 6 473) $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, pour une valeur moyenne de 5 836 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

Pour la classe arbres, en considérant les pourcentages d'espèces cités précédemment (voir point 2.2) et les estimations moyennes de la consommation d'eau de chaque espèce utilisées par l'ORMVAH (Tableau 2), nous obtenons une valeur d'environ 6 470 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les arbres.

La consommation de la classe mixte arbres + annuelles est toujours inférieure à la somme des besoins de chaque espèce, du fait de la concurrence pour l'eau et la lumière. Il existe un effet de compensation entre les deux strates, avec une part importante pour les annuelles dans le cas de jeunes plantations, qui se réduit au fur et à mesure que les arbres se développent et inhibent la croissance des annuelles. La valeur proposée par ER-RAKI *et al.* (2007) (9 250 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) correspond à des oliviers anciens bien développés, denses, avec irrigation

Tableau 2. Besoin en eau annuel des cultures utilisé par l'ORMVAH dans la plaine du Haouz.

Table 2. Annual water requirement of crops used by the ORMVAH in the Haouz Plain.

Type de cultures	Cultures	Besoin en eau ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$)
Arboriculture	Olivier	6 750
	Agrumes	10 500
	Pommier	6 000
	Abricotier	5 250
	Amandier	5 250
	Vigne	3 000
Annuelles	Blé	5 250
	Orge	4 500
	Mais	7 200
	Luzerne	12 800

non limitante, et un couvert d'annuelles au sol une partie de l'année. On considérera que cette valeur correspond à la borne supérieure de la consommation d'un couvert arbres + annuelles, sachant que pour une plantation plus jeune, la part des annuelles augmente mais ne compense que partiellement la moindre évapotranspiration des arbres.

Afin de définir un intervalle de variation pour les classes comportant des arbres, nous considérerons globalement les deux classes arbres et arbres + annuelles, en estimant que la consommation de l'ensemble est bornée par les consommations moyennes des classes arbres et arbres + annuelles, soit 6 470 et 9 250 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Tableau 3).

Sur la base de ces valeurs et à partir de la carte d'occupation du sol établie au niveau de la plaine (Figure 2), nous avons pu déterminer les surfaces des différentes cultures irriguées et estimer les besoins totaux moyens à 1 328 $\text{Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$, compris dans l'intervalle (1 118; 1 538) $\text{Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ (Tableau 3).

Ces consommations en eau sont des moyennes qui cachent de fortes disparités, à la fois dans le temps et entre les parcelles. Pour la majorité des parcelles, les périodes d'excès d'eau consécutives aux apports par irrigation gravitaire (méthode traditionnelle d'épandage de l'eau par écoulement naturel sur la parcelle) provoquent des pertes par évaporation et infiltration profonde. Inversement, on observe fréquemment des périodes de stress hydrique, car la dotation en eau de surface de l'ORMVAH ne comble pas toujours les besoins en eau des cultures dans les superficies irriguées et il faut compléter par d'autres apports en eau pour une irrigation correcte. Les moyens de compensation sont inégaux entre les gros et les petits exploitants. Les premiers disposent de superficies importantes

et de nouvelles techniques d'irrigation (aspersion, goutte à goutte) et ont recours aux forages. Ils présentent une certaine indépendance vis-à-vis des restrictions que peut subir la dotation de l'ORMVAH au cours de l'année. Les petits exploitants disposant de superficies irriguées réduites - qui représentent la majorité des irrigants - n'ont pas toujours la possibilité de recourir aux pompes et voient leurs cultures manquer d'eau. En l'absence d'estimations précises, nous faisons l'hypothèse que les variations mentionnées par rapport à la consommation idéale - liées à l'évaporation du sol et aux périodes de stress - se compensent au moins partiellement au niveau de la saison et de l'ensemble de la zone.

4.1.2 Estimation des apports d'eau souterraine

Nous considérons, ici, un bilan d'irrigation qui tient en compte l'irrigation gravitaire ORMVAH (I), l'évapotranspiration (ET), les précipitations (P) et les pompes (Po).

$$ET = Po + I + P \quad (1)$$

Nous utiliserons, pour réaliser ce bilan, les chiffres de l'année 2000, année qui correspond le mieux à l'estimation de l'ET réalisée à partir de la carte d'occupation du sol. L'analyse de données d'irrigation par secteur obtenues auprès de l'ORMVAH a permis de reconstituer les volumes alloués. Les apports issus des barrages (Canal de Rcade, Barrage Moulay Youssef, Barrage Lalla Takerkoust) sont de 342 $\text{Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$. Les apports par seguias - canaux traditionnels, souvent en terre, dérivant l'eau des oueds issus de la montagne - sont

Tableau 3. Besoin annuel en eau des cultures. (Les superficies irriguées sont déterminées à partir de la classification. Les consommations minimales et maximales sont expliquées dans le texte).

Table 3. Annual water requirement of crops The irrigated areas are obtained from the classification. Minimal and maximum consumption are explained in the text.

Classes	Superficies irriguées (ha)	Consommation en eau ($\text{m}^3 \cdot \text{Ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$)			Consommation Totale en eau en ($\text{Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$)		
		Minimale	Moyenne	Maximale	Minimale	Moyenne	Maximale
arbres	69 351	6 470	7 860	9 250	449	545	641
Arbres + annuelles	52 635	6 470	7 860	9 250	340	414	488
Annuelles irriguées	63 258	5 198	5 836	6 473	329	369	409
		Total			1 118	1 328	1 538

estimés à $233 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ (Estimation de l'ABHT), soit un total de $575 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ d'apport d'eau de surface. En appliquant le coefficient d'efficacité moyen de 20 % utilisé par l'ORMVAH (BERNERT et PROST, 1975) pour le réseau final de distribution aux parcelles, on obtient un volume de $460 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ effectivement distribué aux cultures.

L'apport moyen annuel des précipitations pour l'année agricole considérée a été de l'ordre de 233 mm. Nous avons appliqué à la pluie un coefficient d'efficacité moyen de 0,9 obtenu à partir des méthodes proposées par l'USDA (VAN LAERE, 2003). Ainsi, pour une surface de végétation irriguée de 185 244 ha, obtenue à partir de la classification, l'apport des précipitations est d'environ $387 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$. Le total des apports par les eaux de surface et la pluie au niveau de la plaine est donc de l'ordre de $847 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$.

Ces apports ne permettent pas de satisfaire la demande estimée en eau des cultures, soit $1\,328 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ ($1\,118$; $1\,538 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$). Une première estimation des prélèvements d'eau souterraine est donc fournie par la différence entre ces deux chiffres et donne un volume moyen prélevé net de l'ordre de $481 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ compris dans l'intervalle (271 ; $691 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$).

4.2 Évaluation des pompages à partir d'enquêtes terrain

Pour évaluer les volumes d'eau prélevés dans la nappe, on procède classiquement à partir d'enquêtes sur le terrain, méthode qui nécessiterait ici de gros moyens matériels et humains étant

donné le nombre important des stations de pompages dans la zone d'étude. Pour chaque station, le prélèvement peut être calculé par quatre méthodes. La méthode directe consiste en la détermination des débits prélevés comme étant le produit des débits instantanés mesurés et la durée annuelle déclarée du fonctionnement de la pompe. Une deuxième méthode estime les volumes prélevés en se basant sur la quantité d'énergie consommée annuellement et le rendement de la pompe. Une troisième méthode se base sur l'utilisation des volumes d'eau des bassins remplis durant l'année. Enfin, une quatrième s'appuie sur la détermination des cultures pratiquées au niveau des superficies desservies par le pompage et du volume d'eau utilisé pour leur irrigation. La valeur du prélèvement retenue pour une station est généralement estimée par le croisement des différentes méthodes mise en œuvre.

Pour cette étude, ne pouvant réaliser d'enquêtes, nous avons choisi de nous baser sur les relations statistiques existant entre les autorisations de pompage accordées par les organismes gestionnaires et les prélèvements réels. Ces valeurs ne sont pas concordantes pour diverses raisons. D'un côté, on observe de nombreux forages non autorisés, ou des forages qui dépassent le débit accordé. D'un autre côté, les pompages ayant reçu une autorisation ont très souvent des débits inférieurs, soit par ce que le puits est abandonné, soit parce que le rabattement de la nappe ne permet pas à l'utilisateur d'atteindre le débit initialement prévu. Malgré ces discordances, l'expérience montre que l'on observe une relation entre débits autorisés et réels assez stable variant lentement dans le temps (Figure 3) et peut donc servir de base à des extrapolations. Une fois cette relation établie, on peut à partir des déclarations de pompage à

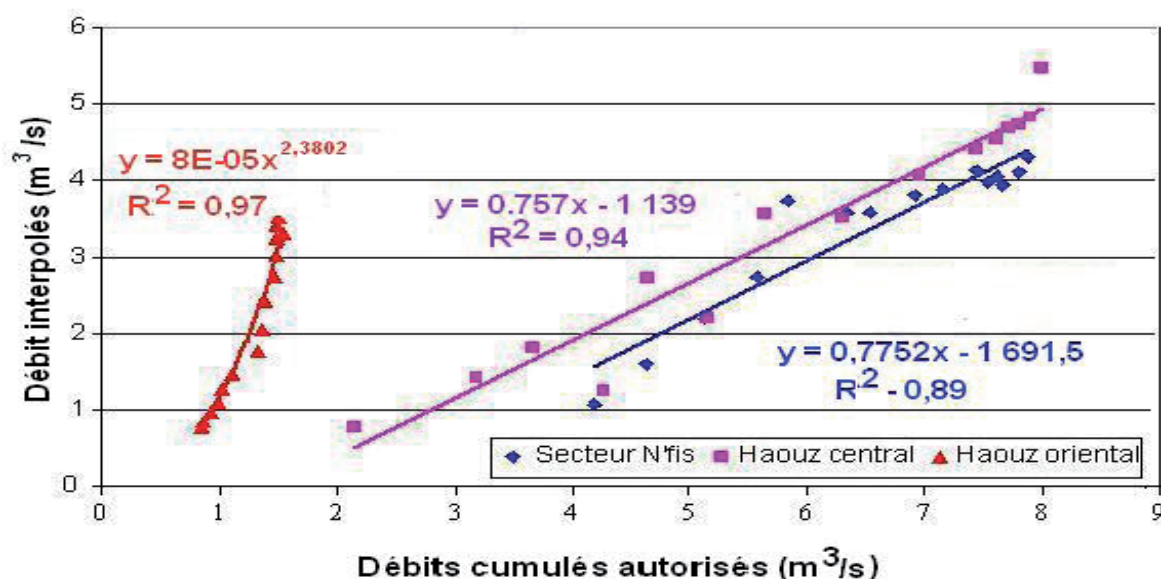


Figure 3. Relations statistiques entre débits réels interpolés graphiquement et débits autorisés par les organismes gestionnaires (RAZOKI, 2001).
Statistical relationships between the actual pumping as interpolated graphically, and the pumping authorized by the water management authorities (RAZOKI, 2001).

n'importe quelle date, obtenir une estimation des prélèvements réels.

Dans notre contexte, l'étude de cette relation a été rendue possible grâce aux travaux antérieurs de la DRPE (1988) et de RAZOKI (2001). Un rapport de la DRPE publié en 1988 utilise les résultats de deux enquêtes sur les prélèvements réels réalisées en 1971 (BERNERT et PROST, 1975) et 1986 (DRPE, 1988). Ce travail montre que les prélèvements réels de 1986 sont corrélés avec les demandes d'autorisations de cette année, moyennant des corrections pour le secteur N'fis, le secteur central et le secteur oriental. Puis, à partir des valeurs de 1971 et 1986, des estimations des débits réels prélevés annuellement au niveau de la nappe durant la période 1971-1986 ont été réalisées par interpolation graphique entre ces deux dates selon une évolution parallèle à celle des autorisations des pompages. Ensuite, à partir de ces interpolations graphiques sectorielles, RAZOKI (2001) a déterminé pour chaque secteur des relations paramétriques entre les débits réels interpolés graphiquement et les débits autorisés pour la même période 1971-1986 (Figure 3).

Afin d'estimer les prélèvements pour l'année 2000, nous avons réalisé l'inventaire des autorisations de pompage depuis 1935 en prenant la totalité des trois zones - alors que les études précédentes se cantonnaient à certains secteurs - grâce à des fichiers collectés auprès de l'ABHT, de l'ORMVAH et de la DRPE. Sur la base de ces déclarations, nous avons appliqué les relations établies par RAZOKI pour extrapoler les débits réels sur ces secteurs jusqu'en 2001 (Figure 4). Les prélèvements réels estimés ainsi montrent une croissance importante jusqu'en

1981, date à partir de laquelle se produit un infléchissement au niveau des trois secteurs. Cette diminution est liée, en premier lieu, à la réduction des débits autorisés par l'ORMVAH et en deuxième lieu, à l'aménagement de secteurs irrigués à partir des eaux des barrages. On peut citer l'exemple du secteur aménagé N'fis rive droite où l'apport d'eau des barrages a même permis d'inverser la tendance et de faire remonter le niveau de la nappe de 0,5 à 1 m•an⁻¹ entre 1986 et 2002 (ABOURIDA *et al.*, 2003b).

En utilisant les débits extrapolés (Figure 4), on a évalué le débit prélevé en 2000, pour l'ensemble du Haouz de Marrakech (Haouz central, oriental et N'Fis) à 438 Mm³•an⁻¹ (Tableau 4). Au niveau du Haouz occidental (Plaine du Mejjate) les prélèvements par pompages, destinés à l'irrigation, ont été estimés à environ 57 Mm³•an⁻¹ (C.S.E.C, 2001), ce qui donne un prélèvement total au niveau de la plaine estimé à 495 Mm³•an⁻¹.

4.3 Discussion

Les deux méthodes utilisées donnent des résultats proches et l'estimation à partir des enquêtes est bien dans l'intervalle issu de l'analyse de l'occupation du sol. Ces chiffres correspondent aussi très bien à la valeur moyenne annoncée en 2005 par l'ABHT, soit 520 Mm³•an⁻¹ (LIMAM, 2005).

La méthode basée sur la télédétection nécessite des approximations concernant l'évapotranspiration, celle-ci étant

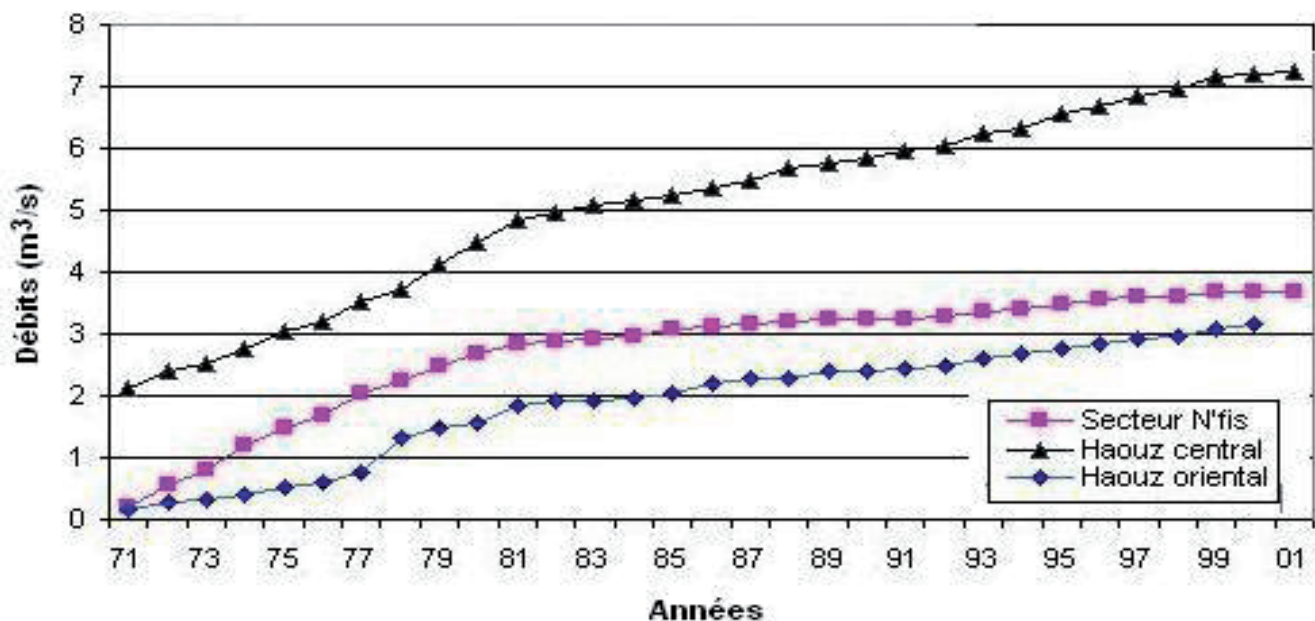


Figure 4. Débits réels par secteur extrapolés pour la période 1987-2001 à partir des relations empiriques établies.
Actual pumping by sector extrapolated for the 1987-2001 period using established empirical relationships.

Tableau 4. Débits réels cumulés pour l'an 2000, estimés en utilisant les formules d'interpolations déterminées au niveau de chaque secteur.

Table 4. Actual water pumping flows summed for the year 2000, as estimated using the interpolation formulae given on each sector.

Secteurs	Débits réels calculés (m ³ •s ⁻¹)	Débits réels calculés (Mm ³ •an ⁻¹)
N°fis	3,688	116
Haouz central	7,045	222
Haouz oriental	3,167	100
Total	13,901	438

en réalité plus variable que les chiffres utilisés, compte tenu de la variabilité des couverts et des modes de conduite des cultures. Par ailleurs, la télédétection ne permet pas toujours de caractériser de manière détaillée l'occupation du sol, surtout dans un contexte comme le nôtre de grande complexité des classes et de leurs réponses spectrales. Dans notre cas, nous avons constaté que même avec une typologie peu détaillée, on parvient à représenter correctement les grands groupes de consommation d'eau.

L'estimation des volumes d'eau de surface est également sujette à caution, car même si l'ORMVAH fournit des chiffres assez précis jusqu'à la sortie de son réseau bétonné, le trajet final de l'eau jusqu'à la parcelle, réalisé en général par des seguias en terre, est affecté par un coefficient d'efficacité difficile à évaluer précisément. Le même problème se pose pour les seguias prélevant l'eau dans les oueds de montagne.

La méthode d'estimation des pompages, basée sur les enquêtes de terrain et les déclarations des autorisations de pompage, donne des résultats cohérents avec la précédente. Elle demande aussi des hypothèses relativement fortes, puisque la relation empirique entre pompages réels et déclarations suppose une relative stabilité des conditions d'extraction de l'eau. Or, depuis une vingtaine d'années, la politique établie par les autorités locales a visé une stabilisation de l'évolution des pompages en réduisant le nombre d'autorisations accordées et en limitant les débits autorisés au niveau de la plaine pour ne pas entraîner un épuisement de la nappe. Malgré ces changements, la relation empirique utilisée semble toujours valide puisque l'estimation obtenue concorde avec celle issue de la méthode par télédétection et avec la valeur donnée par l'ABHT.

5. CONCLUSION

Les ressources en eau, limitées au niveau des zones arides et semi-arides, entraînent une exploitation excessive des eaux souterraines, avec des risques de tarissement qui affectent la durabilité de l'activité économique afférente à cette ressource. Une gestion rationnelle de la nappe passe par la connaissance des différents flux en entrée et en sortie. Ainsi, la connaissance des prélèvements pour l'irrigation est en générale accessible au prix d'enquêtes de terrain coûteuses.

Cette étude montre que l'utilisation d'une cartographie actualisée de l'occupation du sol au moyen d'images satellitaires permet une estimation des prélèvements, à condition de connaître également les apports en eau de surface. On obtient ainsi un volume d'eau pompé de l'ordre de 481 Mm³•an⁻¹, pour l'année 2000, proche de l'estimation de la même variable obtenue par extrapolation à partir des autorisations de pompage déclarées (495 Mm³•an⁻¹), et proche également de la valeur moyenne fournie par l'ABHT pour 2005 (520 Mm³•an⁻¹). Même si cette bonne concordance doit certainement à une part de chance - compte tenu des nombreuses incertitudes qui ont été combinées à toutes les étapes des calculs - ce résultat est encourageant et laisse penser que les estimations obtenues ne sont pas trop éloignées de la vérité. Une validation précise des valeurs des pompages réels nécessiterait des moyens logistiques extrêmement importants, et le croisement de diverses méthodes plus approximatives constitue donc une alternative intéressante.

La méthode proposée ici est potentiellement généralisable à d'autres zones, dans la mesure où la méthode FAO est applicable partout, et à condition que les images satellitaires permettent d'accéder à une occupation du sol suffisante pour ce type d'application. L'évapotranspiration estimée permet ensuite de réaliser des bilans hydriques globaux à condition de disposer d'informations sur les autres termes clés du bilan que sont la pluie et l'irrigation.

REMERCIEMENTS

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme SudMed (Fonctionnement et ressources hydro-écologiques en région semi-aride (Tensift, Maroc) : caractérisation, modélisation et prévisions), mené en partenariat entre l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, France) et l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM, Maroc). Nous remercions l'Agence de Bassin Hydrologique du Tensift (ABHT) et l'Office Régionale de Mise en Valeur Agricole (ORMVAH) qui ont bien voulu mettre à notre disposition toutes les données nécessaires

à cette étude. Ce travail a bénéficié du soutien financier du Comité mixte inter-universitaire franco-marocain (CMIFM) dans le cadre d'un programme PAI (2006-2008), et du projet PLEIADes du sixième programme cadre de la communauté européenne.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- ABDELLAOUI A. (1989). *Développement et télédétection des ressources naturelles au Maghreb central. Télédétection en francophonie*. AUPELF-UREF (Éditeurs), John Libbey Eurotext, Paris, p. 3-16.
- ABOURIDA A., S. ERROUANE, C. LEDUC et G. CHEHBOUNI (2004). Impact de la modernisation agricole sur l'évolution piézométrique de la nappe phréatique du Haouz (Maroc central). *Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, Rabat, 19-23 avril 2004.
- ABOURIDA A., S. ERROUANE, V. SIMONNEAUX, G. CHEHBOUNI et A. CHEGGOUR (2003a). Determination of the water volumes used for irrigation in the Haouz plain by remote sensing. *International IEEE Geoscience and remote sensing symposium (IGARSS'03)*, juillet, 21-25, Toulouse, France, vol. IV, pp. 2948 - 2949.
- ABOURIDA A., B. RAZOKI, S. ERROUANE, C. LEDUC et J.P. PROST (2003b). Impact de l'irrigation sur la piézométrie du secteur N'fis au Haouz Central de Marrakech (Maroc). *Proceedings of an international symposium "Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions"*, Montpellier, avril 2003, IAHS Publ. N° 278, pp. 389-395.
- ALEXANDRE O. (2002). *L'extension de l'espace hydraulique du Haouz central. Incompatibilité entre grande hydraulique et développement des territoires de montagne*. TEO-CERMOSEM, UMR 5038 CNRS, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 14 p. http://www.inbo-news.org/divers/megeve/eau_montagne_2002/Pdf/Alexandre.pdf (consulté le 23 octobre 2007)
- ALLEN R.G., L.S. PEIRERA, D. RAES et M. SMITH (1998). *Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage*, paper 56, Rome, FAO, 465 p. M-56. ISBN 92-5-104219-5.
- BEAUCHAMP J. et J.P. PETIT (1983). Sédimentation et taphrogenèse triasique du Maroc : L'exemple du Haut-Atlas de Marrakech. *Bull. Centres de Rech. Explo. Prod. Elf Aquitaine*, 7, 389-397.
- BERNERT G. et J.P. PROST (1975). Le Haouz de Marrakech et le Bassin du Majjate. *Note et Mém. Du serv. Géol.*, 231, 239-432.
- C.S.E.C. (2001). *Plan directeur pour le développement des ressources en eau du bassin du Tensift, 9^e session*. Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, Direction de l'Hydraulique, Rabat, Maroc, # de pages.
- DAVIS, S.M., D.A. LANDGREBE, T.L. PHILLIPS, P.H. SWAIN, R.M. HOFFER, J.C. LINDENLAUB et L.F. SILVA (1978). *Remote sensing: the quantitative approach*. McGraw- Hill, New York, NY, USA, 405 p.
- DEBBARH A. (1997). Irrigation et développement durable : aspects environnementaux. *Options Méditerran.*, A, 31, Séminaires Méditerranéens.
- DEBBARH A. et M. BADRAOUI (2002). *Irrigation et environnement au Maroc : situation actuelle et perspectives. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation*. Actes de l'Atelier du PCSI, Montpellier, France, # de pages.
- DRPE (1988). *Étude du plan intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou, Bouregreg, Oum-Er-Rbia et Tensift*. Direction Régionale de Planification des Eaux, Sous-mission III B. 147 p.
- DUCHEMIN B., R. HADRIA, S. ER-RAKI, G. BOULET, P. MAISONGRANDE, A. CHEHBOUNI, R. ESCADAFAL, J. EZZAHAR, J. HOEDJES, H. KARROUI, S. KHABBA, B. MOUGENOT, A. OLIOSO, J.C. RODRIGUEZ, V. SIMONNEAUX et F. TIMOUK (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Center of Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agric. Water Manage.*, 79, 1- 27.
- ER-RAKI S., G. CHEHBOUNI, N. GUEMOURIA, B. DUCHEMIN, J. EZZAHAR et R. HADRIA (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agric. Water Manage.*, 87, 41-54.

- ER-RAKI S. (2007). *Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection*. Thèse de doctorat, Univ. Cadi Ayyad Marrakech, Maroc, 128 pp.
- HADRI R., S. KHABBA, A. LAHROUNI, B. DUCHEMIN, A. CHEHBOUNI, J. CARRIOU et L. OUZINE (2005). Calibration and validation of the STICS crop model for managing wheat irrigation in the semi-arid Marrakech/Al Haouz Plain. *Arabian J.Sci. Eng.*, 30(2C): 1-15.
- LIMAM N. (2005). *Assemblée Générale du Réseau Méditerranéen des Organismes de Bassin - Marrakech* (Maroc), 23-26 mai 2005. http://www.inbo-news.org/remoc/marrakech2005/24mai2005/session2-1/Tensift_riob.pdf (consulté le 23 octobre 2007).
- LOYER J. Y., J. ESTRADA AVALOS et I. SANCHEZ COHEN (2001). Gestion des eaux et des sols dans le Nord aride du Mexique. *Science et changement planétaire / Sécheresse*. 12, 1, p 25-30.
- RAZOKI B. (2001). *Mise en place d'un système de gestion de base de données pour la gestion des ressources en eaux souterraines de la plaine du Haouz (Meseta occidentale, Maroc)*. Thèse de doctorat, Univ. Cadi Ayyad Marrakech, Maroc, 166 pp.
- RICHARDS J.A. (1986). *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. Springer-Verlag, Berlin, 281 p.
- SIMONNEAUX V. et P. FRANÇOIS (2003). Identifying main crops classes in a irrigated area using high resolution image time series. *International IEEE Geoscience and remote sensing symposium (IGARSS'03)*, Toulouse, France, July, 21-25, vol.1, pp. 252-254.
- SIMONNEAUX V., B. DUCHEMIN, D. HELSON, S. ER-RAKI, A. OLIOSSO et A.G. CHEHBOUNI (2007). The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *Int. J. Remote Sens.*, 29, 95-116.
- SINAN M. (1986) *Paramètres hydrogéologiques et géoélectriques en milieu alluvial fortement hétérogène*. Thèse de doctorat, Univ. des Sciences et Techniques, Montpellier, France, 397 pp.
- SINAN M., R. MASLOUHI et M. RAZACK (2003). Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc, 2nd FIG Regional Conference, 2-5 december, Marrakech, Morocco. http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS11/TS11_3_sinan_et_al.pdf (consulté le 23 octobre 2007).
- VAN LAERE P.E (2003). *Mémento de l'irrigation*, Collection "Manuels Techniques" Ingénieurs Assistance Internationale - Ingénieurs sans Frontières. http://www.isf-iai.be/fileadmin/user_upload/manuels/Memento_irrigation.pdf, 15 p. (consulté le 23 octobre 2007).