

Modélisation multicouche du système aquifère du bassin de Tadla et le plateau des phosphates

[Modeling multi-aquifer system of Tadla basin and plateau of phosphates]

Tammal Mohamed, Kili Malika, El Gasm El Houssine, Mridekh Abdelaziz, and El Mansouri Bouabid

Laboratoire des Géosciences des Ressources Naturelles, Equipe d'Hydroinformatique,
Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail,
Campus Maamora, B.P 133. 14 000, Kénitra, Maroc

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The area of the plateau of phosphates, and the plain of Tadla which extends over an area of 12300 km² in Morocco central, is very well known for its interests industrial, economic and social very important. The groundwater resources in waters that is more vulnerable to overexploitation and/or to the alteration. The aquifer system is present in the coverage meso-Cenozoic and quaternary which has deposited on the Paleozoic formations. The modeling of the hydrodynamic functioning of this multilayered system allows the understanding and monitoring of the hydrogeological balance sheets, it is in the heart of the management of resources and their preservation. This work aims at the finite difference modeling the multi-layered complex of the plateau of phosphates and the plain of Tadla, the application adopted for the realization of the modeling is the GMS (Groundwater Modeling System of Aquaveo) with the Modflow code (U.S. Geological Survey) which have proved flexible enough for the design and the manipulation of the modeling. The conceptual model is composed of 4 bunk aquifers. The rivers of Oum Errabia, Derna, Laabid and Tassawout rivers form the main drains in the model, as-the climate inputs combined with the surplus water after irrigation of the perimeters of Tadla, without evaluated by the model of the hydrological balance "Wetspass" and form the main resource of the recharging. From the results of the timing of the model of the aquifer system "in whole" it may be pointed out its flexibility to reproduce the water operation of a complex system and multi-layered. The Oum Errabia, Derna, Laabid and Tassawout rivers form the main drains in the model, inputs are represented by climate apport combined with the surplus water after irrigation of the perimeters of Tadla without evaluated by the hydrological balance model "Wetspass". From the results of the calibration of the "entirely" aquifer system model we can see flexibility to reproduce the hydrological functioning of a complex and multi-layered system.

KEYWORDS: Hydrogeology, Aquifer, Modflow, Turonian, hydrogeological balance.

RESUME: Le domaine du plateau des phosphates et la plaine de Tadla qui s'étend sur une superficie de 12300 Km² au Maroc central, est très connu pour ses intérêts industriel, économique et social très importants. Les ressources souterraines qui s'y trouvent sont de plus en plus vulnérables à la surexploitation et/ou à l'altération. Le système aquifère est présent dans la couverture méso-cénozoïque et quaternaire qui s'est déposée sur les formations paléozoïques.

La modélisation du fonctionnement hydrodynamique de ce système multicouche permet la compréhension et le suivi des bilans hydrogéologiques, elle est dans le cœur de la gestion des ressources et de leur préservation.

Ce travail vise la modélisation en différences finis du complexe multicouche du plateau des phosphates et la plaine de Tadla, l'application adoptée pour la réalisation de la modélisation est le GMS (Groundwater Modeling System d'Aquaveo) avec le code Modflow (de l'U.S. Geological Survey) qui se sont avérés assez souple pour la conception et la manipulation de la modélisation. Le modèle conceptuel est composé de 4 aquifères superposés. Les rivières d'Oum Errabia, Derna, Laabid et Tassawout forment les principaux drains dans le modèle, quant-aux apports climatiques conjugués aux surplus d'eau issue de l'irrigation des périmètres de Tadla, sans évalué par le modèle du bilan hydrologique « Wetspass » et forment la principale

ressource de la recharge. A partir des résultats du calage du modèle du système aquifères «en entier » on peut remarquer sa flexibilité pour reproduire le fonctionnement hydrique d'un système complexe et multicouche.

MOTS-CLEFS: Hydrogéologie, Aquifère, Modflow, Turonien, Bilan hydrogéologique.

1 ZONE D'ÉTUDE, OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

1.1 ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude fait partie du domaine du Meseta occidentale marocaine, plus précisément des deux domaines géomorphologiques du plateau des phosphates et de la plaine de Tadla. Le domaine est limité au nord par la formation primaire du Zeïr, à l'est et au sud-est par la chaîne Atlasique (Moyen Atlas), Au Sud et au sud-ouest par le haut Atlas et le bourgeonnement de la plaine de Bahira, et à l'ouest par le domaine primaire du Rehamma (fig.1). Hydrologiquement le domaine étudié fait (majoritairement) partie du bassin versant d'Oum Errabia. La partie nord du domaine appartient au bassin versant de Bouregreg. La ligne de partage des eaux entre ces deux bassins passe de l'est vers l'ouest près de la ville de Khouribga. La situation géologique est encore plus complexe, le domaine est composé d'une série du crétacé supérieure qui se repose sur des terrains paléozoïques, avec parfois des intercalations de faciès d'âge triasique, la série crétacé est marquée par la présence des étages de l'Infra-cénomaniens, du Turonien ou Cénomano-turonien et du Sénonien [14]. Une formation d'éocène riche en phosphate se repose sur les terrains identifiés du Crétacé et forment le plateau des phosphates. Au sud, une plaine mio-plio-quaternaire s'est déposée dans un synclinal pour former la plaine de Tadla. Les précipitations mensuelles atteignent leur maximum pendant les mois de janvier et février; après une diminution au mois de mars, un deuxième pic se manifeste au mois d'avril [16] et [19].

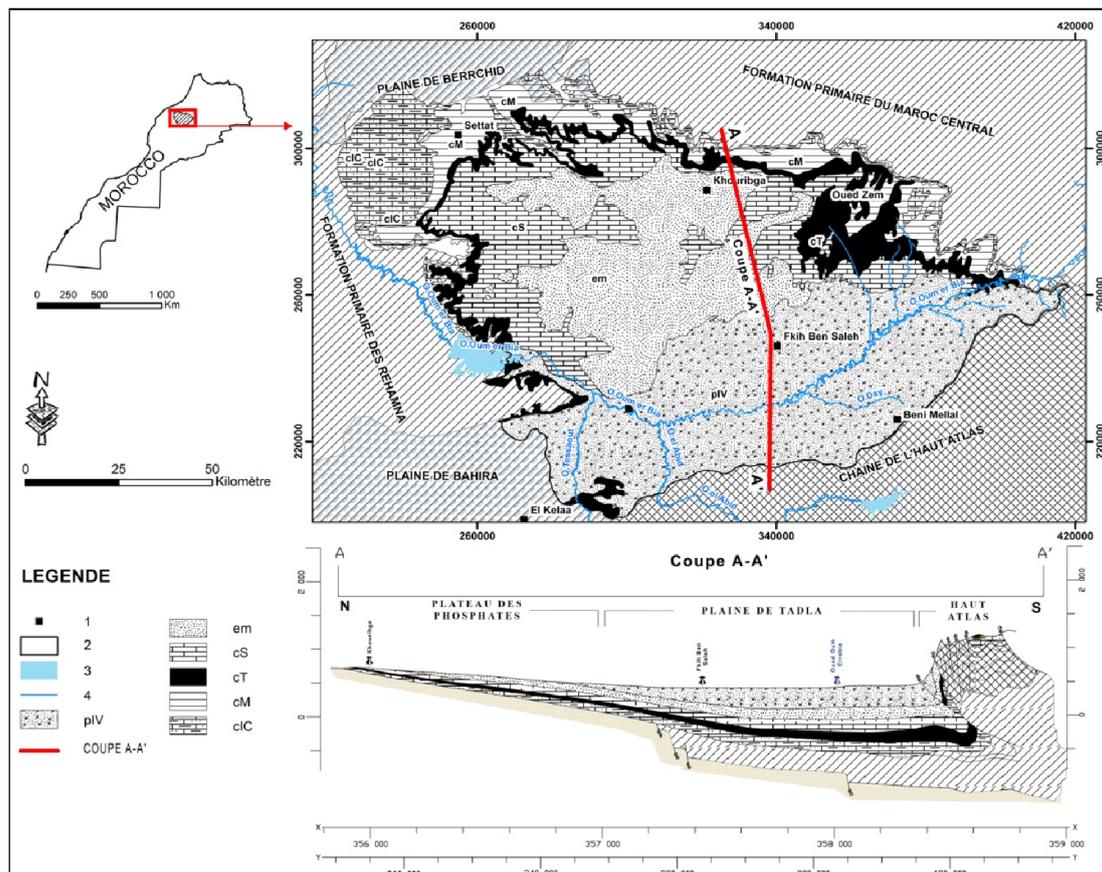


Fig. 1. Esquisse de la carte géologique au 1/500000 [21] et coupe sur de la zone du plateau des phosphates et la plaine de Tadla. 1 : ville principale ; 2 : Limite de la zone d'étude ; 3 : Barrage ; 4 : Rivière ; pIV : Mio-Plio-Quaternaire ; em : Eocène moyen ; cS : Sénonien ; cT : Turonien ; cM : Cénomaniens ; cIC : Infra-Cénomaniens.

De point de vue lithologique, les terrains du Crétacé sont d'une prédominance calcaire et marneuse, la formation Maastrichtienne riche en sable phosphatés et en phosphates sableux [4], tandis que les terrains quaternaires de Tadla sont composés de matériaux de nature argilo-sableux et conglomératique [2], [20], [22]. L'hydrogéologie est marquée par les nappes du Cénomano-turonien, du Sénonien, de l'Eocène, des Beni Amir et Beni Moussa dans le plio-quaternaire de Tadla. La recharge est partagée entre apports latéraux [11], [12], recharge superficielle et drainance des autres unités hydrogéologiques.

Les domaines irrigués de Tadla, d'une superficie de 107000 ha, sont constitués par les périmètres des Beni Amir, Beni Moussa et Dir. Ils sont gérés majoritairement par l'Office Régionale de Mise en Valeur Agricole de Tadla (ORMVAT). Cet organisme est responsable de la gestion de l'irrigation et le suivi des cultures [15]. L'irrigation dans la plaine du Tadla est assurée par les grands barrages d'El Hansali (capacité de 800 millions de m³) sur l'oued Oum er-Rbia et Bin el Ouidane (1,5 milliard de m³) sur l'oued El Abid. La construction des équipements hydrauliques du périmètre des Beni Amir a commencé en 1932 et la mise en culture progressivement à partir de fin 1936, alors que le périmètre des Beni Moussa a été mis en service à partir de 1952 [24]. Ce domaine est complété par des zones diffuses de pompage sur environ 18 600 ha et par des périmètres traditionnels (9 100 ha) au piedmont de l'Atlas à l'Est des Beni Moussa (domaine du Dir) [26]. La gestion de la totalité des ressources en eau dans le bassin versant est assurée par l'agence du bassin versant hydraulique d'Oum Errabia (ABHOER).

1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La superposition verticale des différents aquifères confère au domaine le nom de « complexe aquifère ». Du fait de l'anthropisation d'une bonne partie du domaine étudié, notamment l'installation des domaines irrigués de la plaine de Tadla à partir des années 30, le fonctionnement hydrique naturel du complexe aquifère a été extrêmement affecté, impliquant des remontées spectaculaires des nappes (notamment les nappes phréatiques libres du domaine de Tadla). Ainsi, il a été toujours difficile de quantifier et de justifier le fonctionnement de chaque nappe dans ce système, voir le fonctionnement global dû aux échanges entre les différentes nappes.

La problématique exposée ci-dessus nous a orientés vers les objectifs suivants:

- Identifier et délimiter les origines des ressources en eau et la nature de leurs interactions,
- Etablir une géométrie générale du fonctionnement hydrique,
- Quantifier la recharge efficace du système étudié,
- Réaliser un modèle mathématique qui reproduit ce fonctionnement,
- Quantifier les ressources et les réserves.

2 IDENTIFICATION DES RESSOURCES EN EAU

Les systèmes aquifères sont composés de plusieurs unités gardant (le plus longtemps possible) leur intégrité et leur équilibre. Ces unités peuvent être classées en : unités de ressources représentées par nappes proprement dite, les unités d'apport qui permettent la recharge du système et unités de décharge. Ces unités peuvent avoir un fonctionnement individualisé, comme elles peuvent interagir en fonctionnement complexe, c'est cette dernière situation qui est prédominant dans le cas du complexe aquifère de la plaine de Tadla et le plateau des phosphates.

Les unités et composantes du système aquifère étudié peuvent être présentées sommairement comme suit :

- Les formations aquifères sont composées des nappes de Cénomano-turonien, de la nappe du sénonien, la nappe de l'éocène, la nappe des Beni-Amir et la nappe des Beni Moussa, ces formations superposées désignent les unités de ressources,
- Le réseau hydrographique qui inclut Oued Oum Errabia, Oued Laabid, Oued Darna, Oued Tassaout, et le reste du réseau hydrographique représente, dans ce cas d'étude une unité de recharge et de discharge compte tenu des inter-échanges entre les formations hydrogéologiques et le réseau hydrographique,
- Les précipitations forment l'unité de recharge dans cette modélisation, combinées au surplus infiltré des eaux d'irrigation, une quantification par « Wetspass » permet de déterminer la lame d'eau réelle qui sera infiltrée vers la nappe et pouvoir de percolation [17],
- L'irrigation des domaines de Tadla, notamment les domaines des Beni moussa, des Beni Amir et de Dir sera évalué en tant qu'unité de recharge,
- Les apports des domaines juxtaposés (Haut Atlas, Bahira, Plaine de Berrchid,...), ainsi que les drainances verticales des ressources en eau [13].

3 CARACTÉRISTIQUES ET GÉOMÉTRIE DES AQUIFÈRES

La modélisation du complexe aquifère du plateau des phosphates et de la plaine de Tadla inclue l'établissement d'un modèle conceptuel représentant les quatre formations aquifères, la géométrie de ce modèle a été figée à partir de 71 sondages géologiques et pétroliers réalisés dans la région, les conditions aux limites du modèle sont de type à potentiel imposé aux contacts avec les cours d'eau, à flux imposé aux zones de drainance latérale et à flux nul dans les limites stérile du modèle. Les paramètres géométriques des « layers » du modèle sont issus à partir des données de sondage, géophysiques et des cartes topographiques. Les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, anisotropie, ...) sont issus des essais de pompages (Fig.2).

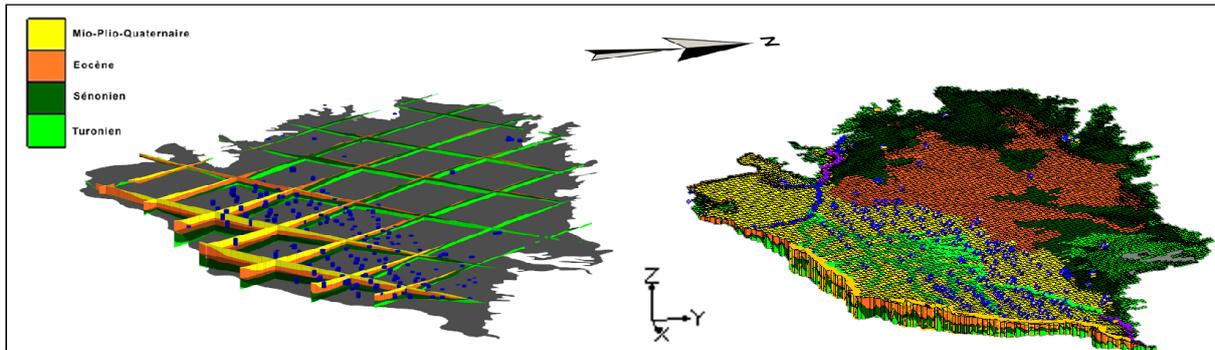


Fig. 2. Géométrie du modèle mathématique du complexe aquifère du plateau des phosphates et de la plaine de Tadla

L'architecture adoptée est en différence finie, implanté sur le modèle « Modflow » de l'U.S. Geological Survey sous l'interface GMS, l'équation de la diffusivité est résolue dans chaque cellule du modèle [25], elle est de la forme suivante (Eq. 1) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{Eq. 1})$$

Où :

- K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les conductivités hydrauliques au long des axes, x, y, et z (les directions principales d'anisotropie sont les mêmes que les axes du référentiel Oxyz [m/s],
- H est la charge hydraulique [m],
- W est le terme source ou perte par unité de volume [1/s],
- S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique [1/m]. En nappe libre, en intégrant cette équation sur la verticale, le coefficient d'emmagasinement S est remplacé par la porosité de drainage (w_d),
- t est le temps [s].

Les caractéristiques hydrodynamiques (Tableau. 1) sont introduits au modèle sous forme de grille de données « raster », Le tableau suivant représente le sommaire de ces paramètres calés pour le modèle hydrodynamique de la plaine de Tadla et le plateau des phosphates :

Table 1. Présentation des paramètres hydrodynamiques exploités dans la modélisation

	Perméabilité (m/jour)				Anisotropie				Coef. d'emmagasin. (%)			
	Tur.	Séno.	Eoc.	PIV	Tur.	Séno.	Eoc.	PIV	Tur.	Séno.	Eoc.	PIV
Max	190	83	154	390	1	1	1	1	5	3	6	11
Min	2.1	0.8	6.3	2.5	1	0.8	1	0.5	5	2	2	1.4

4 QUANTIFICATION DE LA RECHARGE

La réalisation d'un modèle mathématique d'une telle fluidité vis-à-vis de la variation de la recharge implique un traitement préalable du bilan hydrologique, ceci est réalisé grâce d'un autre modèle hydrologique appelé « Wetspass » acronyme de Transfère d'Eau et de l'Energie entre le Sol, les Plantes et l'Atmosphère [7], le modèle est complètement intégré dans le SIG et permet l'estimation à long terme (régime quasi-permanent) des paramètres influençant la recharge

efficace des ressources souterraines, des ruissèlements et de l'évapotranspiration [3]. Les entrées de ce modèle incluent des grilles de données de l'occupation du sol, de la profondeur initiale de la nappe, de la précipitation, de l'évapotranspiration potentielle, de la vitesse du vent et des types de sols, ces grilles sont interconnectées dans le modèle par leurs tables d'attribue respectives. Un traitement spécifique est réalisé à fin d'ajouter les quantités d'eau issues de l'irrigation des périmètres irrigués à la grille des données de précipitation. La résolution des termes du bilan hydrologique s'effectue dans l'ordre selon les formules suivantes (Eq. 1, 2 et 3):

$$ET_{raster} = a_v ET_v + a_s ET_s + a_o ET_o + a_i ET_i \tag{Eq. 2}$$

$$S_{raster} = a_v S_v + a_s S_s + a_o S_o + a_i S_i \tag{Eq. 3}$$

$$R_{raster} = a_v R_v + a_s R_s + a_o R_o + a_i R_i \tag{Eq. 4}$$

Où : ET_{raster} , S_{raster} et R_{raster} sont respectivement l'évapotranspiration totale, le ruissellement et la recharge des nappes souterraines pour une cellule donnée du domaine modélisé. Chacun de ces paramètres dépend des ratios a_v , a_s , a_o et a_i , relatifs respectivement au ratio de la végétation, du sol nu, d'étendue d'eau et des zones imperméables.

Les résultats de Wetspass (recharge efficace & évapotranspiration) peuvent être introduits directement dans le modèle hydrogéologique [8]. L'exploitions du modèle Wetspass a permet de suivre le cycle hydrologique de la plaine de Tadla et du plateau des phosphates. Les flux d'irrigation sont également incluent dans le calcul de la lame d'eau infiltrée à travers l'analyse des données concernant 2358 forages et puits installés sur les nappes libres ainsi que les données sur 178 forages installés sur les nappes profondes [18]. Les résultats atteints permettent l'estimation avec plus de précision des valeurs de la recharge efficace, de l'interception, du ruissellement et de l'évapotranspiration. Les deux domaines étudiés : plaine de Tadla et plateau des phosphates, géo-morphologiquement très diversifiés ont été partagés en quatre sous-zones et fonction de l'origine et le devenue des eaux du cycle hydrique.

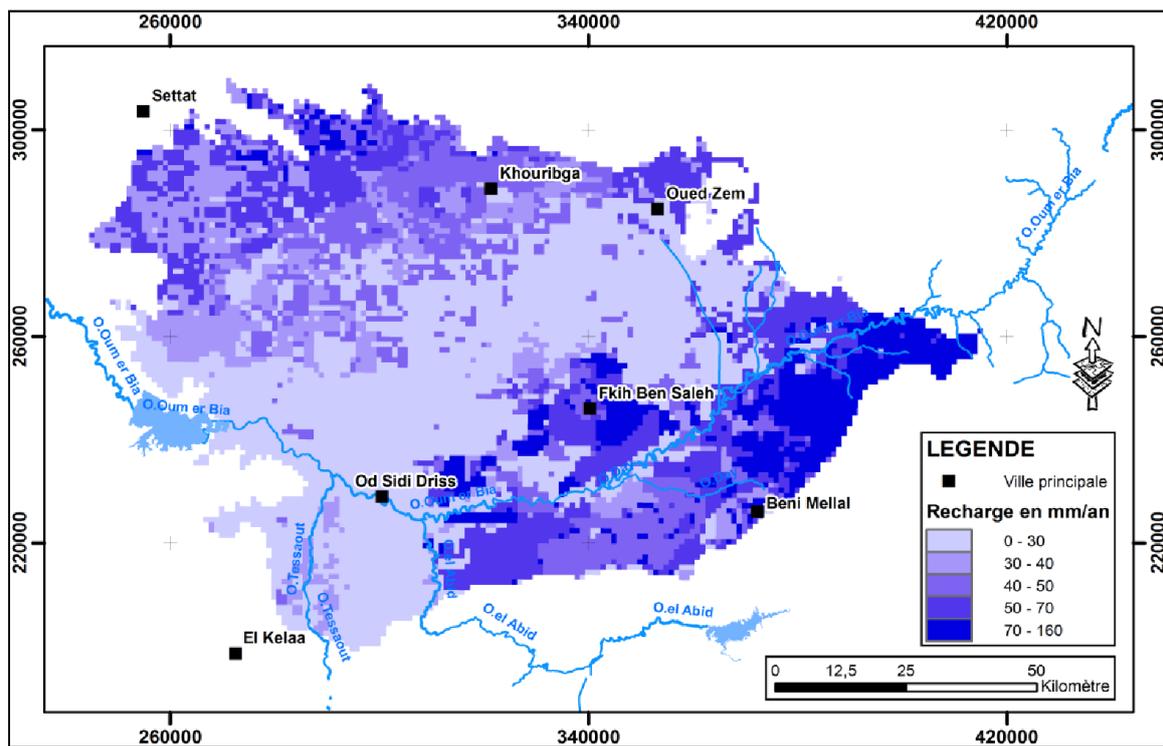


Fig. 3. Carte simulée par Wetspass de la recharge annuelle (en mm) des nappes souterraines

Ainsi, sur la base de 4200Mm³ d'apport d'eau mise en jeu annuellement dans la zone d'étude, seulement 10% (417Mm³) de cette quantité atteint les niveaux saturés du sous sol, et sera utilisé comme recharge efficace des nappes, dont 40% (166Mm³) dans le domaine du plateau et 60% (250Mm³) dans la plaine de Tadla. Sur la base de ces données, la comparaison avec les estimations établies par l'ABHOER [1] montre une différence négligeable de 1% (équivalent à 3 Mm³) du volume global. La simulation avec Wetspass a montré également la nécessité de rectifier les estimations établies dans la zone du plateau de 30% pour que ces estimations soient limitées à 166Mm³.

5 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

La réalisation et le calage d'un modèle mathématique des eaux souterraines du complexe aquifère de la plaine de Tadla et le plateau des phosphates, n'est qu'un premier objectif indispensable à la validation du modèle, l'étape la plus contraignante et de simuler des périodes critiques dans le passé et voir la réaction du modèle vis-à-vis des projections futures de la recharge climatiques et la variation des besoins en irrigation.

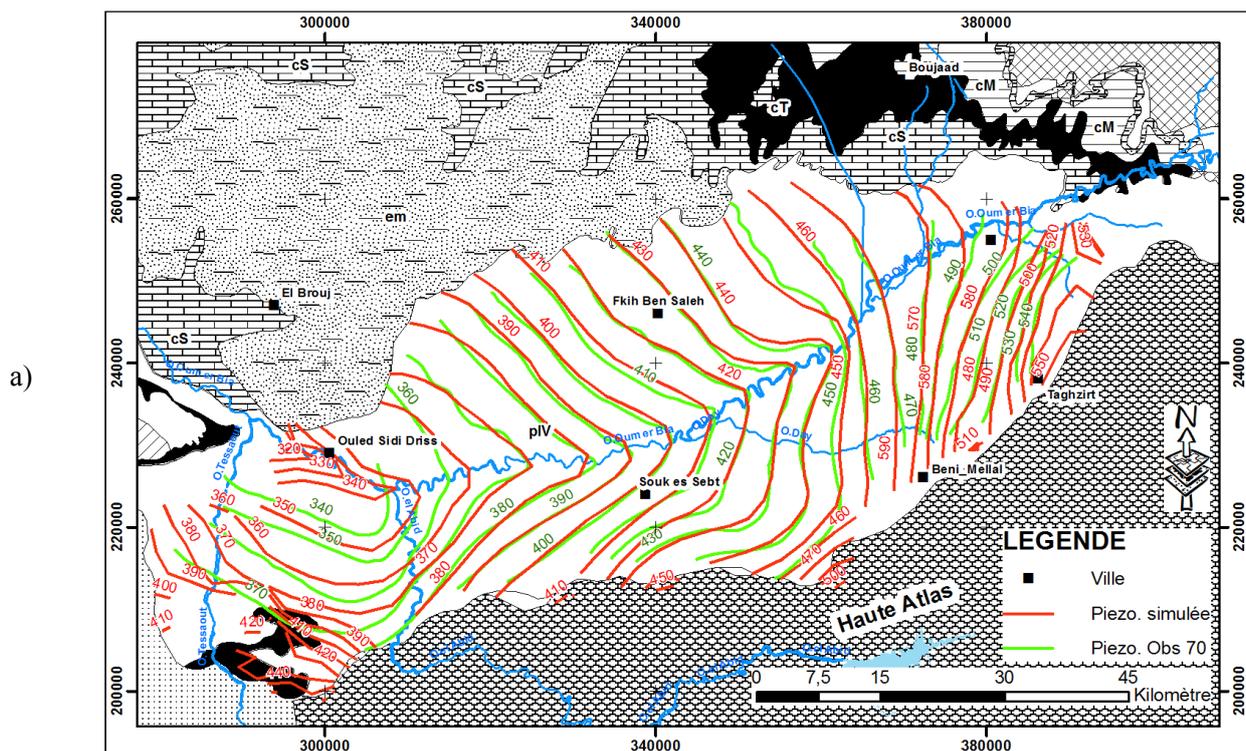
Le calage du modèle a été effectué en trois étapes successives, correspondant à trois configurations hydrodynamiques distinctes :

- Un régime hydrodynamique permanent de basses eaux, correspondant à « l'état naturel » initial du système aquifère, avant la mise en place et l'exploitation des périmètres irrigués « modernes » à la fin des années 70.
- Un régime hydrodynamique transitoire, associé à la mise en eau des périmètres irrigués dans le secteur Plio-Quaternaire (Beni Amir et les Beni Moussa).

Les travaux hydrogéologiques réalisés dans la zone d'étude, ont été menés principalement par [5] et [6] et les travaux de [9] et [10]. Ces travaux ont permis de dresser plusieurs cartes hydrogéologiques qui constituent la base des esquisses de comparaison.

6 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats (Entrées-sorties) des deux phases de calage du modèle introduites précédemment en état permanent et transitoire sont illustrés dans la fig.4 ci après :



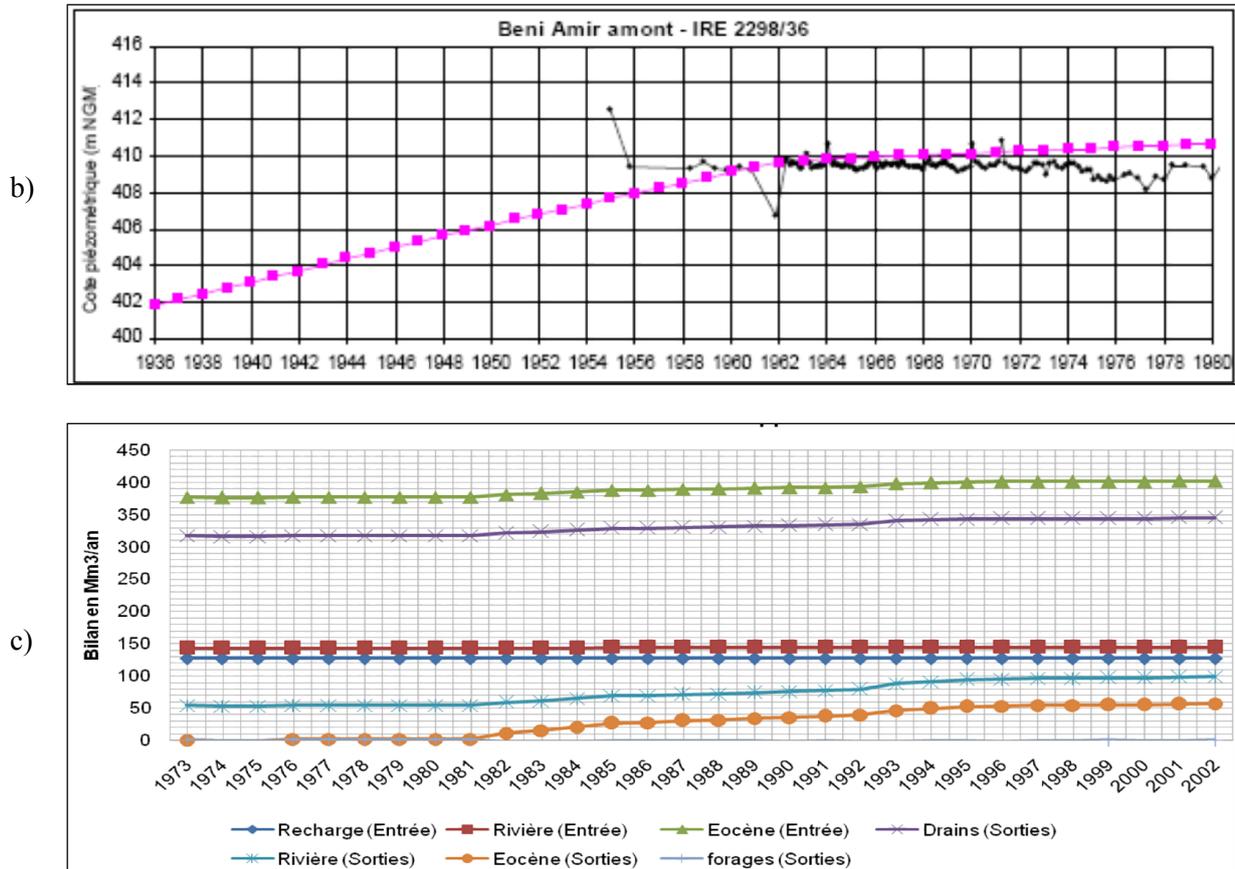


Fig. 4. Résultats du calage permanent et transitoire du modèle mathématique du complexe aquifère du plateau des phosphates et de la plaine de Tadla : a) comparaison des courbes isopièzes mesurées et simulées dans la Tadla ; b) comparaison du suivi piézométrique (piézomètre n° IRE2289/36) ; c) suivi du bilan de la nappe turonienne au cours de la période 73-03.

D'après des résultats du calage du modèle pour « l'état naturel », nous avons remarqué que pour les nappes phréatiques et dans les secteurs où l'on dispose de références piézométriques avant la mise en irrigation des périmètres, à savoir dans les Beni Moussa et le Dir, une excellente adéquation a pu être obtenue entre piézométrie mesurée et piézométrie simulée (Fig.3-a), et ceci avec un champ de perméabilités parfaitement vraisemblable. Reste une forte incertitude qui pèse, en particulier, sur toute la zone située au Nord de l'Oum Errbia, puisque le modèle n'y a pas été calé lors de cette première étape, faute de mesure piézométrique antérieure à la mise en service du périmètre irrigué des Beni Amir. Pour l'Eocène et le Turonien : des incohérences géométriques [23] ponctuels ont engendrés des problèmes de dénoyage pour plusieurs mailles ; la solution consiste à considérer les aquifères profonds comme entièrement captifs, c'est-à-dire saturés sur l'ensemble de leur épaisseur y compris en zone libre. Cette hypothèse n'a aucune influence sur les bilans hydrologiques de l'ensemble du modèle. Ailleurs, le tracé des courbes isopièzes est très cohérent avec les esquisses de 1975, que ce soit pour le Turonien ou pour l'Eocène.

En deuxième étape de calage transitoire, comme pour les Beni Moussa, le processus de calage a amené à introduire une bande peu à très peu perméable le long de l'Oum-er-Rbia, et à affecter des perméabilités importantes à la partie centrale du périmètre pour reproduire la piézométrie très plate relevée en hautes eaux. L'observation de la superposition des chroniques piézométriques mesurées et simulées dans chacun des 14 piézomètres de suivi qui sont implantés dans les Beni Amir amont (Fig.3-b) et dans les Beni Amir aval montre qu'après une longue période de montée, correspondant à la mise en eau progressive du périmètre (simulée de 1939 à 1954), les niveaux atteignent des paliers très proches de ceux qui ont été effectivement mesurés entre 1970 et 1975. En ce qui concerne les nappes profondes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, le bilan global (Fig.3-c) des échanges entre ces unités et les autres ressources disponibles est sensiblement affecté plutôt par le changement de la recharge climatique que par la mise en place et l'installation des domaines irrigués notamment dans la partie nord du modèle avec une allure générale en déclin sur toute la période modélisée.

7 CONCLUSION

Le modèle hydrodynamique élaboré pour le système aquifère du bassin de Tadla et plateau des phosphates a permis de limiter favorablement les incertitudes liées au bilan climatique ; recharge pluviométrique et évapotranspiration. Par ailleurs, ce modèle simule très convenablement des situations piézométriques diverses et contrastées, telles que le régime piézométrique naturel, les fortes remontées de nappe induites par la mise en eau des périmètres irrigués, et les baisses piézométriques significatives mais temporaires résultant de séquences pluviométriques déficitaires. Toutefois, vu le contexte hydrogéologique très particulier de ce système certaines incertitudes subsistent quant au modèle conceptuel. En effet, une très grande partie du domaine concerné correspond à des périmètres irrigués où, par nature, les flux hydrauliques échappent à la mesure et sont difficiles à quantifier : infiltrations agricoles hypothétiques, pompages privés très nombreux et incontrôlables, évapotranspiration importante et immatérielle, débits drainés jaugés épisodiquement, biaisés par les pompages et les rejets directement effectués dans les fossés de drainage. Il sera indispensable de continuer à utiliser le modèle avec tendance de l'améliorer au fur et à mesure de simuler des impacts diversifiés liés aux nouveaux aménagements et à des scénarios climatologiques exceptionnels, isolés ou répétitifs.

RÉFÉRENCES

- [1] ABHOER, *Etude d'actualisation du PDAIRE de la zone d'action de l'Agence de l'Oum Errbia : note de synthèse*, CACG / ADI, Novembre 2008.
- [2] H. Akeskouss, *Classement des terres en vue de la conservation de l'eau et du sol dans une zone semi-aride, application dans la région de Ben Ahmed : Mémoire de fin d'études*, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 160 pages, 1985.
- [3] M. A. Al Kuisi, and A. El-Naqa, "GIS based Spatial Groundwater Recharge estimation in the Jafr basin, Jordan – Application of WetSpas models for arid regions", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 30, no. 1, pp. 96-109, 2013.
- [4] C. Arambourg, J. Signeux et F. M. Bergonioux, *Les vertébrés fossiles des phosphates de l'Afrique du Nord : Notes et mémoire*, Ser. géol. Maroc, no 92, 396 pages, 1952.
- [5] C. Archambault, *Reconnaissance de la nappe captive du Turonien et alimentation en eau potable du centre de Kasba-Tadla par le forage 1914/37. Perspectives d'avenir et programme de reconnaissances complémentaires : Rapport indépendant*, MTPC/DH/DRE, 44 pages et 6 figures, 1971.
- [6] C. Archambault, *Piézométrie des aquifères du Plateau des Phosphates et du Tadla : Rapport indépendant*, MTPC/DH/DRE, 33 pages et 13 cartes. ,1972.
- [7] O. Batelaan and F. De Smedt, "WetSpas: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling", *IAHS*, no. 269, 2001.
- [8] O. Batelaan, and S. Woldeamlak, *ARCVIEW interface for WetSpas: Guide*, Vrije Universiteit Brussel, Belgique, 2007.
- [9] E. Bolelli, *Les plaines et les plateaux du domaine marginal de l'Atlas : 2. Beni Amir-Beni Moussa. Hydrogéologie du Maroc : Notes & Memoires*, Serv. géol. Maroc, no 97, pp. 197-204, 1952.
- [10] E. Bolelli, *Plateau des Phosphates, Hydrogéologie du Maroc : Notes & Memoire*. Serv. géol. Maroc, n° 97, pages 197-204, 2 figures, 1952.
- [11] L. Bouchaou, et al, "Origin and residence time of groundwater in the Tadla basin (Morocco) using multiple isotopic and geochemical tools", *Journal of Hydrology*, no. 379, pp.323–338, 2009.
- [12] M. Combe, *Modèle mathématique préliminaire de la nappe captive du Turonien du Tadla, orientations de la campagne de reconnaissances 1973-1974*, MTPC/DH/DRE, 10 pages, 1973.
- [13] S. El hassania et al, "Approche physico-chimique des eaux des principales sources du piémont du moyen atlas de Beni Mellal (Maroc)", *ScienceLib*, Vol. 3, no 110605, 2011.
- [14] S. Ettazarini, *L'altération des sédiments et sa relation avec les circulations des eaux souterraines et météoriques dans la série Méso-cénozoïque du bassin phosphatier des Ouled Abdoun (Maroc) : Thèse de spécialité Ressources naturelles*, 284 pages, 2002.
- [15] A. Hammani et al, *Exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué de Tadla (Maroc) Etat des lieux et éléments de méthodologie pour contribuer à une réflexion sur une gestion intégrée et durable des eaux souterraines et de surface*, Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 2006.
- [16] Y. Hsissou, *L'aquifère des calcaires du Turonien du bassin de Tadla (Maroc). Alimentation locale et lointaine à partir de l'Atlas*, Thèse UFA de Sciences et Techniques, Université Franche-Comté en Sciences de la terre, France, 196 pages, 1991.
- [17] M. Kili, B. El Mansouri and J. Chao, "Bilan hydrique des sols et recharge de la nappe profonde de la plaine du Gharb (Maroc)", *Sécheresse*, no. 19 (2), pp. 145-151, 2008.

- [18] M. Kuper et al, *Stratégies d'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraine pour l'irrigation : Le cas du périmètre irrigué du Tadla au Maroc. Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant*, Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 2-3 décembre 2003.
- [19] A. Labyed et M. Geanah, *Etude des aquifères du plateau des phosphates : Mémoire de fin d'études*, EMI, 109 pages, 1979.
- [20] MARA (Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire), *Étude pédologique au 1:100000 de la région de Settat-Ben Ahmed : Rapport*, marché n°46/82 DPA/42, Rabat, 239 pages, 1985.
- [21] MEM (Ministère d'énergie et des mines), *Carte géologique aux 500000^{ème}, feuille Rabat*, 1978.
- [22] A. Merzouk et al, "Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones semi-arides : apport de la télédétection", *Télédétection et sécheresse*, Édition AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris. pp. 163-171, 1990.
- [23] A. Najine et al, "Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin de Tadla (Maroc) : Implications hydrogéologiques", *C. R. Geoscience*, no. 338, pp. 676–682, 2006.
- [24] P. Préfol, *Prodige de l'irrigation au Maroc. Le développement exemplaire du Tadla, 1936-1985*, Nouvelles Editions Latines, Paris, France, 266 pages, 1986.
- [25] U.S. Geological Survey, *Evapotranspiration from Wetland and Open-Water Sites at Upper Klamath Lake, Oregon, 2008–2010*, U.S. Department of the Interior, USA, 2013.
- [26] H. Zaz, *Bilan de la gestion des ressources en eau dans le périmètre irrigué du Tadla : Rapport ORMVAT*, Fquih Ben Salah, Maroc, 70 pages, 1996.