

# MODÉLISATION NUMERIQUE DE L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA NAPPE DE BERRECHID (MAROC)

*Naiïma El Assaoui*

*Fouad Amraoui*

Université Hassan II/Faculté des Sciences Ain Chock/ Laboratoire Géosciences Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement, Casablanca, Maroc

*Bouabid El Mansouri*

Université Ibn Tofail/ Faculté des Sciences/ Kénitra, Maroc

---

## Abstract

Morocco takes part of the arid countries where groundwater resources play a vital role for their socio-economic development. The important increase in the water demand for various uses, coupled with the negative effects of the climate changes stresses increasingly these groundwater reserves and weakens them. At the river watershed Bouregreg, both the quantity and the quality of groundwater are strongly decreased during last decades, especially at the Berrechid aquifer where the level of water, decreases continually in the piezometers during the period: 1980-2008, reaching 20 m in some places. The objective of this study is to analyze the impacts related to both the climate changes and the increase of water demand on the aquifer hydrodynamic to improve management and planning groundwater resources.

Thus, a numerical model to simulate the aquifer hydrodynamics is proposed. It is based on MODFLOW, using GMS interface. The analysis of the impact of the climate changes on groundwater resources mobilized is based on Intergovernmental Panel one Climate Changes (IPCC) approach in terms of scenarios.

The constraints imposed to the numerical model were based on three scenarios of IPCC, taking account of the aquifer's recharge variation. The results show the continuing trend of declining groundwater levels with a variation between 1m and 25m.

---

**Keywords:** Numerical model, Berrechid aquifer, Modflow, Climate Change, IPCC' scenarios

---

## Résumé

Le Maroc fait partie des pays arides où les ressources en eau souterraines jouent un rôle vital pour leur développement socio-économique. L'accroissement rapide des besoins en eau pour différents usages, couplé aux effets néfastes des changements climatiques stresse de plus en plus ces réserves souterraines et les fragilise. Au niveau du bassin hydraulique du Bouregreg, la quantité et la qualité des eaux souterraines ont fortement diminué au cours des dernières décennies, en particulier au niveau de la nappe de Berrechid. Cette dernière, a connu d'après les investigations in situ au niveau des piézomètres durant la période:1980-2008, des baisses continues de niveau atteignant 20 m par endroits. L'objectif de cette étude est d'analyser les impacts liés aux changements climatiques et à l'augmentation de la demande en eau sur le fonctionnement hydrodynamique de la nappe pour mieux appréhender la problématique de sa gestion et de sa planification.

Ainsi, un modèle numérique de simulation de l'hydrodynamique de la nappe est proposé. Il se base sur le modèle MODFLOW, à travers l'interface GMS. L'analyse de l'impact des changements climatiques sur les réserves d'eau souterraines mobilisables se base sur l'approche de l'Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) en termes de scénarios.

Les contraintes imposées au modèle numérique ont été basées sur trois scénarios d'IPCC, tenant compte des variations de la recharge de la nappe. Les résultats obtenus montrent le maintien de la tendance à la baisse des niveaux piézométriques avec une variation entre 1m et 25m selon les endroits.

---

**Mots clés:** Modèle numérique, nappe de Berrechid, Modflow, GMS, Changements Climatiques, scénarios IPCC

## Introduction

D'après la classification du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le Maroc est un pays caractérisé par un climat aride à semi-aride, qui est soumis à une forte vulnérabilité naturelle aux changements climatiques (inondations, sécheresse, désertification, etc.). Ces changements climatiques, interagissent avec les conditions socio-économiques et environnementales de tout système hydrique (Bates et al., 2008). La demande en eau augmente considérablement pour répondre à différents besoins en eau, notamment l'alimentation en eau potable ou l'irrigation des terrains agricoles. Cette dernière est de loin l'activité qui consomme la plus grande part des ressources en eau dépassant dans bien des cas 70%. Cependant, les ressources en eau sont de plus en plus rares à cause du stress hydrique et des changements climatiques.

Au Maroc d'après l'évolution des pluies enregistrées durant la

période (1945-2010), on constate de longues périodes sèches suivies de courtes périodes humides enregistrant parfois des pics élevés liés au passage d'orages, causant ainsi d'importantes inondations.

Le premier volume du cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013; IPCC, 2014 ; IPCC, 2015) confirme la nature des impacts futurs dus aux changements climatiques, notamment :

- Une augmentation de la température moyenne du globe de 1.5 ° C à la fin du siècle
- Des changements non uniformes au niveau du cycle mondial de l'eau, avec une tendance générale à l'augmentation au niveau des variations des précipitations entre d'une part les régions humides et les régions sèches et d'autre part entre les saisons humides et les saisons sèches.

Le quatrième rapport du programme international des changements climatiques (IPCC, 2007). Les variations de la température, les irrégularités des précipitations et l'augmentation du niveau de la mer sont inévitables. Ces changements climatiques conjugués à l'anthropisation et à l'imperméabilisation des sols présentent des conséquences néfastes sur l'alimentation en eau des nappes superficielles ou profondes.

La nappe de Berrechid peu profonde, a réservoir principalement plio quaternaire, libre dans sa majeure partie, fait partie des aquifères marocains les plus vulnérables aux changements climatiques. Plusieurs études (ABHBC, 2004 ; El Assaoui et al., 2010) ont démontré la nette baisse des réserves en eau souterraines sous l'effet de la sécheresse et des prélèvements en eau, qui sont de plus en plus importants sous l'effet du développement urbain, agricole et industriel de la région.

Il est donc important d'étudier l'influence des changements climatiques dans le futur, en se basant sur des scénarios issus de modèles climatiques, pour mieux appréhender la problématique de la gestion et de la planification des eaux souterraines de la nappe de Berrechid à Moyen terme et à Long terme.

### **Revue Bibliographique**

Au niveau de la simulation de l'hydrodynamique des aquifères, MODFLOW, développé par l'US Geological Survey (USGS) (EMRL, 1999 ; Mc Donald et al., 2000 ; EMRL, 2004 ; Harbaugh et al., (2005)), s'impose comme un standard international (NGCLC (2001), Ekkehard et al., 2005 ; Carneiro J. et al., 2010 ; Healy R.W., 2010 ; Wels Ch. et al., 2012 ; Kumar, 2013 ; Aniekan E. et al., 2014).

Certains travaux de recherche ont mis en évidence les effets négatifs des changements climatiques sur les ressources en eau souterraines (Loacica H.A. et al., 2003 ; Allen D. et al., 2004 ; Milly et al., 2005 ; Hetzel F. et al., 2008 ; IPCC, 2008 ; Moustadraf J. et al., 2008 ; Dragoni et al., 2009 ; Nyenje

P.M et al., 2009 ; Burton et al., 2010 ; Barron OV et al., 2011 ; Jackson Ch.R. et al., 2011 ; Gosbie et al., 2011 ; Goderniaux P et al., 2011 ; Kumar, 2012 ; Taylor R.G, 2013 ; Kidmose J. et al., 2013).

### **Analyse des données**

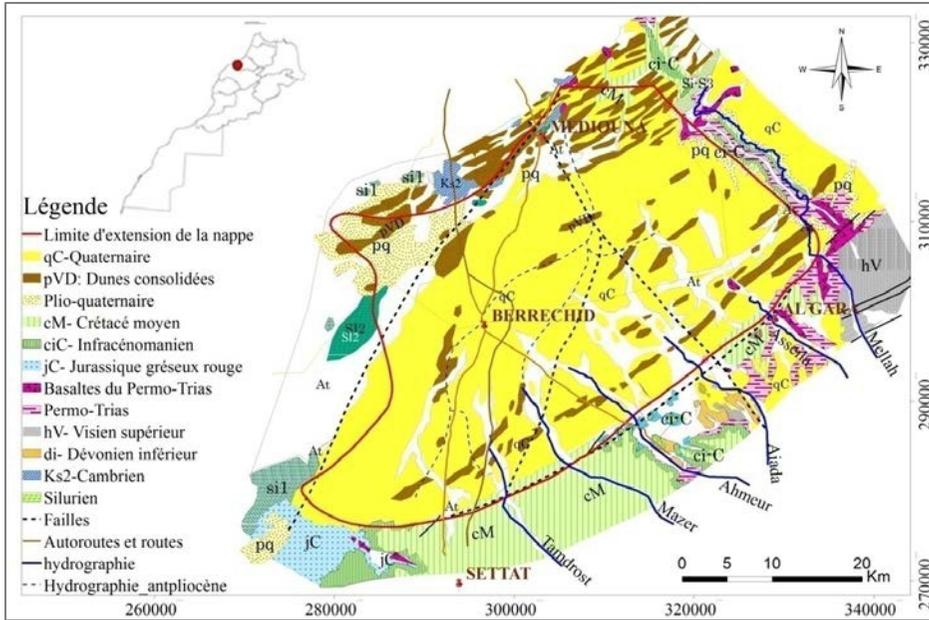
Les données utilisées sont de plusieurs natures: géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques, hydrologiques et climatologiques. Elles se présentent sous forme de cartes ou de fiches de données. L'ensemble de ces informations collectées sont traitées et regroupées dans une base de données, puis organisées dans un système d'information géographique (SIG), ce qui permet d'élaborer des cartes thématiques (El Assaoui et al., 2010).

### **Géologie générale**

La carte géologique (Figure 1) a été reproduite avec plus de détails à partir des données géologiques de la nappe de Berrechid. Celles-ci sont extraites des documents existants, de la carte géologique au 1/500000, de l'analyse de l'image ETM+ de Landsat 7 (El Assaoui et al., 2009) et des forages de reconnaissance.

La plaine repose sur une série de terrains géologiques âgés du Primaire au Quaternaire (Figure 1). Elle se présente sous forme d'un bassin subsidient de la Meseta, limité au Sud et au Sud-Est par des calcaires marneux du Crétacé et ailleurs par des formations Primaires constituées de schistes et de quartzites. Le remplissage est formé par des grés marins et dunaires du Pliocène. Il constitue le niveau intéressant de la couche aquifère de Berrechid.

La plaine de Berrechid présente une morphologie assez régulière. Les courbes de niveau sont orientées NE-SW sur la majeure partie de la plaine. Les altitudes varient de 350 m à la limite avec le plateau de Settât à 140 m au Nord de la plaine au niveau de la zone de la transition vers la Chaouia. La pente topographique est inférieure à 0.2% au centre et peut atteindre 0.8% dans le Sud-Est, au niveau de la limite du Sud au contact du plateau de Settât.

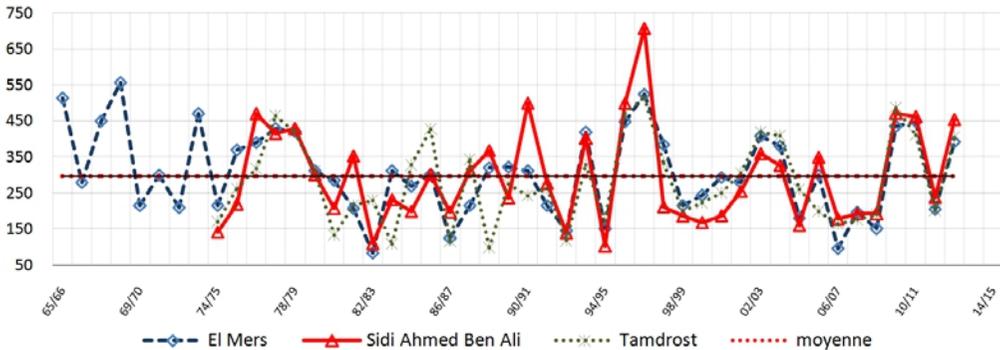


**Figure 1:** Situation et Géologie de la nappe de Berrechid extraite par analyse des images ETM+ de Landsat et de la carte géologique au 1/500000

### Climatologie

Les données climatiques se basent sur l’actualisation des précipitations mensuelles et annuelles au niveau des stations El Mers, Sidi Ahmed Ben Ali et Tamdrost. Les données utilisées s’étalent sur une période de 50 ans (de 1965 à 2014).

La pluviométrie annuelle moyenne sur l’ensemble des stations choisies varie entre 100 et 700 mm, selon que la situation est en année sèche ou en année humide (Figure 2). La moyenne annuelle des précipitations sur la plaine de Berrechid varie entre 280 et 310 mm/an. La température présente de grands écarts entre l’hiver et l’été, avec une moyenne des maximas de 24,9°C et une moyenne des minimas de 9,6°C (ABHBC, 2004).



**Figure2:** Evolution de la pluviométrie annuelle en (mm) au niveau des stations El Mers-Sidi Ahmed Ben Ali et Tamdrost

## Hydrologie

Le réseau hydrographique est endoréique. Il traverse la plaine dans sa partie sud et sud-est par des cours aval qui descendent du plateau, traversant la plaine sur moins de 20km et se perdent au centre de la plaine. Les plus importants sont du Sud-Ouest au Nord Est: Tamdrost, Mazer, Ahmeur, Aïda et Asseïla (Figures 1 et 3). Leur intérêt réside dans le fait qu'ils contribuent à l'alimentation de la nappe par les apports qui surviennent en période des crues. Cette tendance est confirmée par les remontées rapides observées dans plusieurs piézomètres et qui se manifestent juste après le passage des crues.

## Piézométrie

Nous avons considéré les données de 40 piézomètres (21 puits et 19 forges) dont 29 disposent d'une mesure allant jusqu'en 2008 (Figure3). L'analyse de l'ensemble de l'information piézométrique est effectuée en caractérisant l'évolution des piézomètres aussi bien à l'échelle interannuelle que saisonnière (El Assaoui et al., 2009).

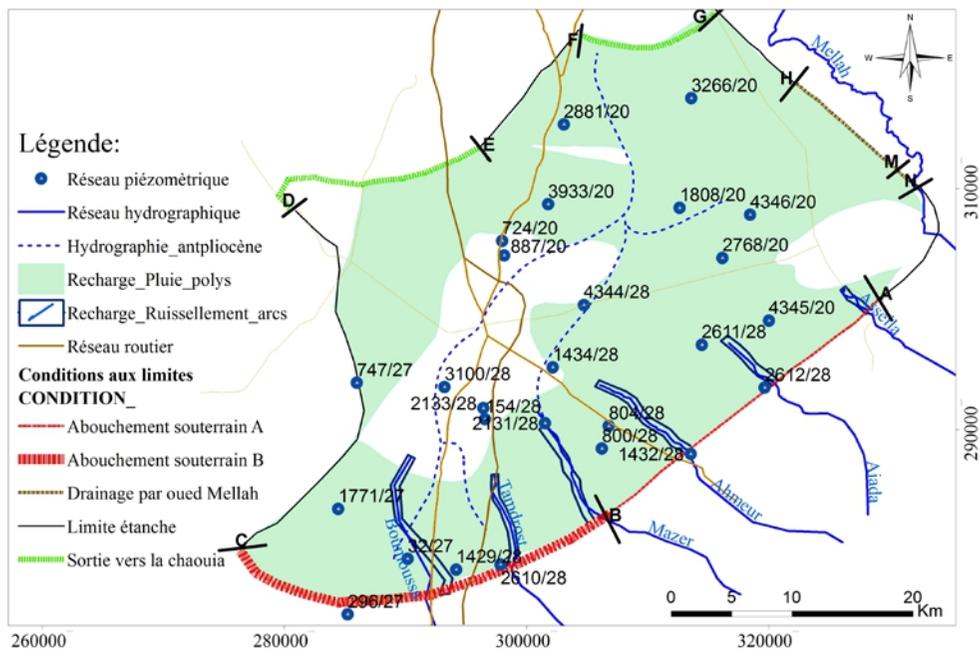
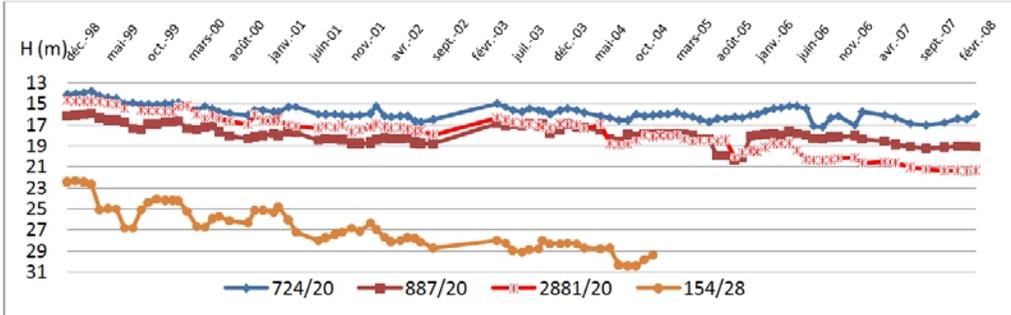


Figure 3 : Réseau de suivi piézométrique; réseau hydrographique; zones de recharge et conditions aux limites du modèle

Une variation saisonnière est observée sur l'ensemble des piézomètres (Figure 4). Elle se manifeste par une remontée pendant la période pluvieuse, suivie d'une baisse jusqu'à la fin de l'été. Ce qui montre la sensibilité de la nappe à la recharge naturelle, qui constitue sa principale source d'alimentation. On constate une tendance généralisée à la baisse dont l'ampleur est variable

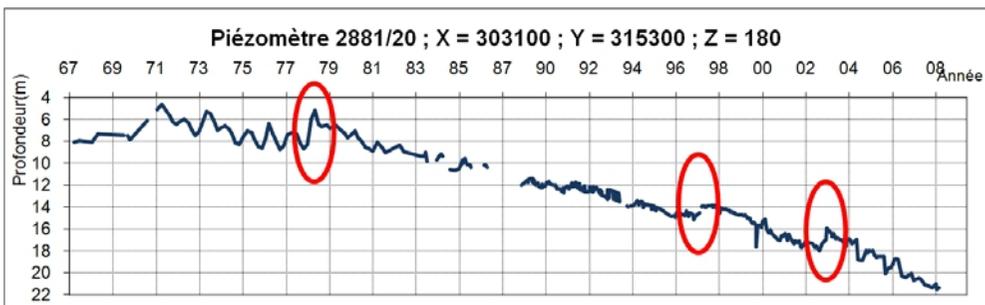
selon la région considérée. Elle est importante au Sud de Berrechid dans le périmètre de Lahssasna et Sidi El Meki qui est une zone d'irrigation par pivots ainsi qu'à Sidi El Aïdi correspondant au champ captant d'alimentation en eau potable.



**Figure 4 :** Piézométrie de la nappe au niveau de la zone de Berrechid

On constate en général, sur toute la zone d'étude, que les périodes de baisses et de remontées se succèdent. Les remontées sont courtes et rapides en réponse à des épisodes de recharge par pluviométrie et surtout par des crues de courte durée, tandis que les baisses s'effectuent sur des périodes assez longues. Des séquences de remontées sur la majorité des piézomètres correspondant aux années 1970/1971, 1978/1979, 1995/1996, 2003/2004 (Figure 5) et la plus importante est celle de Septembre 2008 et Aout 2009 ayant permis une recharge de 1m au niveau de la nappe de Berrechid.

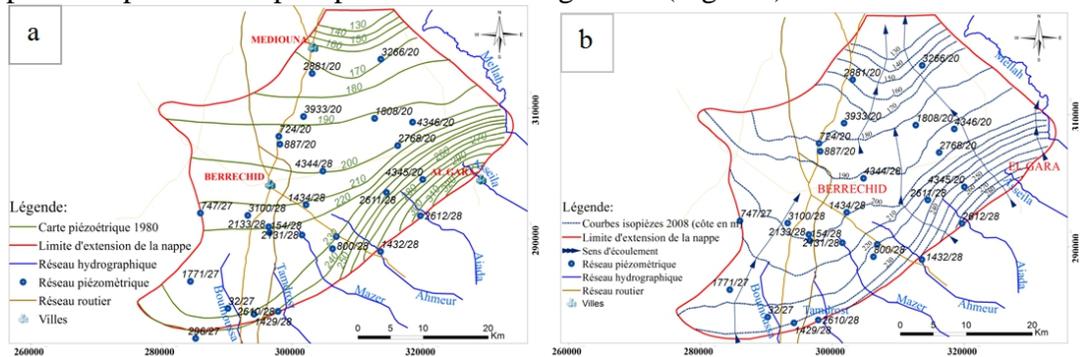
Depuis 1980, le rabattement résultant de cette baisse quasi générale de la nappe dépasse par endroits les 5 m pouvant atteindre 20m au niveau du piézomètre 154 qui est à sec. Le piézomètre 2881/20 (Figure 5) a connu une remontée importante de 3,60 m à 1968/1971. De 1968 à 1979 la piézométrie est plutôt stable autour de 7 m, avec alternance de périodes de remontée et de baisse à amplitudes égales. Depuis 1979 à 2008, l'on assiste à une baisse générale du niveau piézométrique, le rabattement total est de 14 m. l'amplitude de fluctuation saisonnière est de 2m de 1968 à 1979, inférieure à 2 m depuis 1979 sauf celle de 2003 qui est égale à 2 m



**Figure5:** Piézomètre en baisse continue avec des fluctuations saisonnières.

Nous avons établi une carte piézométrique traduisant l'état actuel 2008 de la surface piézométrique (Figure 6b), en se basant sur les données de l'enquête relative aux prélèvements et sur celles du réseau de surveillance. Cette dernière comparée à la carte piézométrique de référence 1980 a servi aussi bien pour clarifier l'évolution de la surface piézométrique, que pour le calage transitoire du modèle numérique (El Assaoui et al., 2009).

L'ensemble des cartes (Figures 6a et 6b) montrent que la structure générale de l'écoulement reste la même. Cet écoulement se fait du SW au NE dans la zone SW de la plaine, du SE vers le NW dans la zone SE, tandis qu'au Nord de Berrechid l'écoulement a une tendance à s'incurver pour prendre la direction S-N. La direction est similaire à la tendance générale de la topographie. Les niveaux d'eau sous le sol varient régulièrement du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Ils sont de l'ordre de 30 à 40 m au pied du plateau de Settat plus en aval. Ils sont beaucoup plus faibles de l'ordre de 5 m à 10 m au voisinage de Mediouna. L'alimentation de la nappe se fait par infiltration directe des eaux de pluie, par les eaux du ruissellement et par abouchement à partir du plateau des phosphates sur une large zone (Figure3).



**Figure 6 :** (a) Carte piézométrique 1980 ; (b) Carte piézométrique (Aout 2008) présentant le sens d'écoulement

## Elaboration du Modèle Numérique de simulation hydrogéologique: résultats et discussions

Le modèle numérique élaboré a pour objectif l'aide à la gestion future des ressources en eaux souterraines de la nappe de Berrechid en permettant la simulation de différents scénarios liés aux changements climatiques. Sa mise en œuvre s'est basée dans un premier temps à simuler l'hydrodynamique de la nappe, en calant le modèle hydrodynamique MODFLOW-GMS. Dans un deuxième temps, le modèle calé a été confronté à trois scénarios de l'IPCC, pour représenter les effets des changements climatiques probables sur l'aquifère. L'objectif recherché est de mieux appréhender l'impact de ces changements climatiques sur le comportement de l'aquifère et sur la recharge en particulier

## **Nature, mur et toit de l'aquifère**

Deux surfaces sont nécessaires pour définir la géométrie de l'aquifère dans la conception du modèle mathématique. Il s'agit du toit et du substratum de l'aquifère.

La reconstitution géométrique du modèle lithologique de la nappe s'est basée sur une base de données de 980 forages disposant d'une coupe géologique. Les 320 forages retenus disposent de données relatives aux épaisseurs des principales formations géologiques, à la nature des différents horizons traversés et aux niveaux piézométriques de l'aquifère traversé (El Assaoui et al., 2009).

Les dépôts plio-quadernaires constituent le réservoir aquifère principal dans la plaine de Berrechid. La plupart des coupes lithologiques des forages indiquent un faciès de calcaires gréseux, avec rarement l'existence de conglomérats de base. Ces dépôts se présentent sous forme d'un prisme sédimentaire elliptique dont le grand axe est orienté SW-NE. L'épaisseur varie de l'affleurement des zones orientales et occidentales à 40 m au centre du bassin. La nappe circule également dans les marno-calcaires du Cénomaniien, dans le trias et dans les formations primaires.

La géologie du substratum est constituée, selon les endroits, par les marno-calcaires cénomaniennes, les argiles rouges infra cénomaniennes, des basaltes triasiques dans une zone limitée de 110 km<sup>2</sup> au Nord d'El Gara et le socle schisteux au S-E et au N-W. Le toit de l'aquifère est généralement constitué par des formations de limons argileux rouges, dont l'épaisseur varie entre 20 et 40 m au cœur de la plaine et diminue progressivement vers l'Ouest et l'Est du bassin.

## **Les apports et les sorties de la nappe**

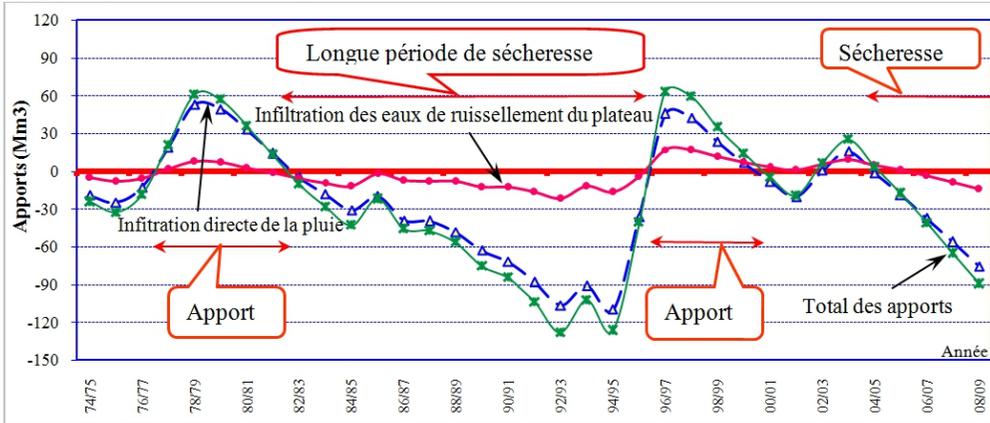
### ***Les apports moyens et leur évolution***

L'alimentation naturelle de la plaine de Berrechid est assurée par les apports par les infiltrations de la pluie efficace, les apports par infiltration des eaux de ruissellement en provenance du plateau de Settat et les abouchements souterrains du plateau de Settat vers la plaine.

La pluie efficace est la somme du ruissellement superficiel et de l'infiltration, permet d'évaluer la recharge naturelle des aquifères à nappe libre. Elle est calculée à partir de la pluie en en soustrayant les fractions qui sont prises par évaporation et par transpiration. Il importe donc de bien connaître au préalable la partie réellement évapo-transpirée.

Les stations météorologiques déjà citées (paragraphe 2.2) ont été utilisées pour l'estimation de la recharge (infiltration efficace) qui est calculée selon la formule de Thorntwaite. (ABHBC, 2004) L'évapotranspiration est estimée selon la formule de Turc (Turc, 1951).

Les apports à la nappe sont assez variables dans le temps. Ceux de l'infiltration directe sur la plaine ou des ruissellements du plateau, sont fortement liés à la pluviométrie. Les coefficients de variation pour les deux composantes sont de 150 et 100 (figure 7). Il est évident qu'en termes de recharge de la nappe d'une année à l'autre, les variations de la lame efficace influent considérablement sur le volume d'eau disponible et par conséquent sur le potentiel de la nappe. Si des périodes de sécheresse se prolongent comme c'était le cas durant les années 80 et 90, les estimations des ressources exploitables devraient être revues à la baisse. Le régime des apports paraît ainsi irrégulier et variable.



**Figure 7:** Evolution des cumuls des écarts par rapport à la moyenne des apports

### **Les sorties de la nappe**

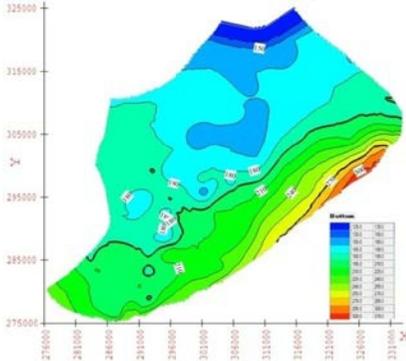
Les sorties de la nappe se font essentiellement par pompage pour l'irrigation et l'Alimentation en Eau Potable (AEP) ainsi que par déversement vers la Chaouia Côtière et l'Oued Mellah. Les entrées et les sorties de la nappe concernent principalement les infiltrations et les pompages.

### **Modélisation numérique de l'hydrodynamique de la nappe**

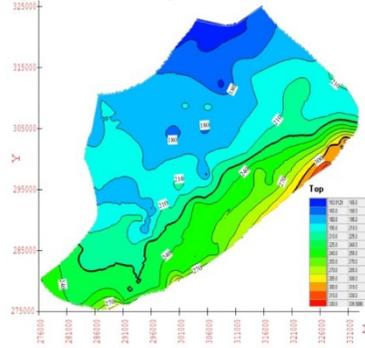
La modélisation mathématique des écoulements souterrains au niveau de la nappe est basée sur MODFLOW, développé par l'USGS (United States Geological Survey) (Mc Donald et al., 1988; Harbaugh, 2005). Le code de calcul utilisé aux différences finies en trois dimensions, fonctionne sous l'interface GMS «Groundwater Modeling System» (EMRL, 1999 ; EMRL, 2004).

Le domaine d'étude représentant l'aquifère est supposé monocouche. Les simulations étudiées considèrent aussi bien le régime permanent que le régime transitoire. La zone d'étude présente une superficie de 1509 Km<sup>2</sup>. La grille de calcul aux différences finies, présente des mailles carrées de 250 m. La grille de calcul se compose de 24329 mailles actives.

Après génération du maillage du modèle, les données stockées ont été transférées dans les couches graphiques du modèle conceptuel à chacune des mailles de la grille. Les fichiers des côtes altimétriques du toit de l'aquifère et de son substratum ont été importés à partir de la Base de Données du Système d'Information Géographique (SIG). Ils sont interpolés sous GMS et transférés vers le maillage de MOFLOW. (Figure 8 et Figure 9).



**Figure 8:** Courbes isohypses en (m) du substratum de l'aquifère



**Figure 9:** Courbes isohypses en (m) du mur de l'aquifère

### Conditions aux limites

Les limites du modèle ont été définies sur la base des arguments suivants : la limite amont (Abouchements souterrains A et B) section (AC), les sorties vers la chaouia (DE, FG) et l'oued Mellah (HN), les hauteurs piézométriques ont été imposées (Condition de Dirichlet) (Bear 1979 ; Bear et al., 1992). Ce type de condition permet un échange de flux (entrant ou sortant) dans le modèle. Les limites Ouest (sections CD), Nord (EF), Est (section GH) et Sud-Est (section NA) (Figure3) du modèle correspondent à des limites étanches ou topographiques (Condition de Neumann) (Bear, 1979 ; Bear et al., 1992) avec un flux nul (Figure 3).

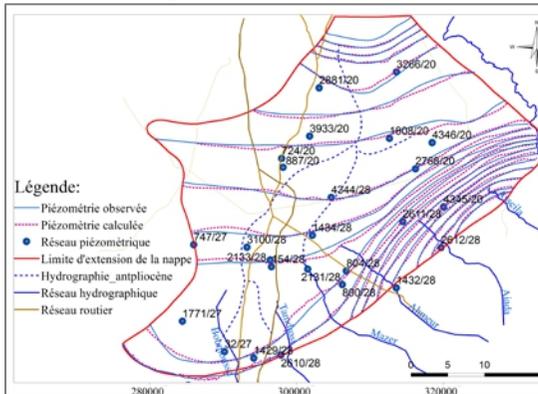
La piézométrie mesurée lors de l'année 1980 (Figure 6a) a été considérée pour le calage de l'écoulement en régime permanent et comme condition initiale de l'écoulement en régime transitoire.

### Simulation de l'hydrodynamique de la nappe

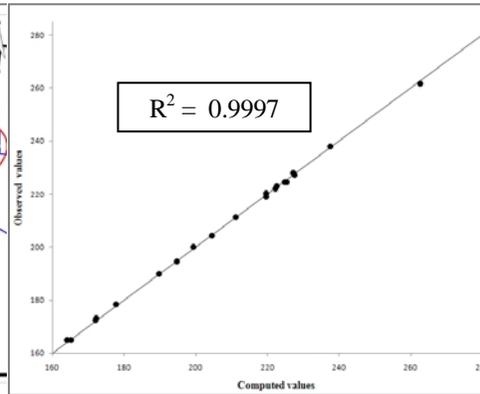
Le calage du modèle en régime permanent a été réalisé sur la base des données recueillies durant l'année hydrologique 1978/1980 par le fait que le bilan global de la nappe en cette année est équilibré. Les simulations pendant cette phase sont basées sur les infiltrations pluviales, les infiltrations par ruissellement et sur les prélèvements recensés. Ce calage a été réalisé en comparant les valeurs piézométriques calculées et celles mesurées au niveau

de plusieurs puits contrôlés par l’Agence. Un nombre important d’essais de pompage a été réalisé dans la région pour dégager les valeurs de la conductivité hydraulique des formations géologiques de la région d’étude (ABHBC, 2004). Elles varient dans une fourchette de  $5 \cdot 10^{-6}$  à  $10^{-2}$  m/s. Ces variations sont dues principalement aux changements latéraux de faciès. Elles ont été ajustées dans le modèle pour mieux reproduire les mesures observées de la piézométrie.

La figure 10 montre une bonne concordance entre la piézométrie mesurée et la piézométrie simulée avec un champ de perméabilité parfaitement semblable (figure 11)



**Figure 10 :** Piézométries observée et calculée pour l’année de référence 1980



**Figure 11 :** Courbe de calibration (Charge calculée en fonction de la charge mesurée)

Ce calage en régime permanent a permis d’établir le bilan global de la nappe par l’évaluation de ces différentes composantes qui sont présentées dans le tableau 1:

Termes du bilan		Volume en Mm <sup>3</sup> /an
Entrée	Infiltration de la pluviométrie	14.817
	Infiltration des eaux du ruissellement des oueds	6.202
	Abouchements souterrains du plateau du Settât	24.675
	<b>Total</b>	<b>45.694</b>
sorties	Prélèvements par pompage	34.81
	Sorties vers la Chaouia	9.74
	Drainage vers oued Mellah	1.13
	<b>Total</b>	<b>45.679</b>
Entrée - sortie	0.018	
Erreur en %	0.039	

**Tableau 1:** Bilan hydrique calculé en régime permanent

Les débits globaux échangés calculés par le modèle sont comparables avec ceux calculés dans les études précédentes (ABHBC, 2004). Les quantités d’eau entrant calculées par le modèle sont de l’ordre de 125150 m<sup>3</sup>/jour. Elles se répartissent en: 46,96% proviennent de la recharge (infiltration efficace, le retour des eaux d’irrigation et l’infiltration au niveau

des oueds) et de 54,64 % issues des aquifères du Sud. Quant aux flux d'eau sortants du système, ils se répartissent en: 76,2 % correspondent aux prélèvements par les ouvrages d'exploitation et 23,8 % contribuent au stock des eaux souterraines et s'écoulent hors du modèle par la frontière Nord.

Le calage en régime transitoire du modèle met en œuvre le modèle calé en régime permanent sur une longue durée où intervient l'effet du paramètre temps. Il a été basé sur les données relatives à la période s'étalant de 1979 à 2004 avec un pas de temps de calcul annuel. Les perméabilités de l'aquifère sont celle déduites du calage en régime permanent. La recharge (les apports par infiltration) a été calculée pour chaque année. Les prélèvements par pompage agricole sont simulées avec une tendance croissante et ceux pour l'AEP sont recueillis auprès de l'ONEP et introduits ponctuellement dans le modèle. Ces prélèvements ont été estimés pour la même période en se basant sur les informations recueillis auprès de l'Agence.

Lors de la modélisation en régime transitoire, la distribution des coefficients d'emmagasinement est tenue en compte. Nous avons testé les réactions de plusieurs couples de valeurs de coefficients d'emmagasinement libre et captif pour chaque maille du modèle, en comparant pour chacun des deux coefficients considérés, les évolutions de la nappe au niveau des piézomètres de référence. Le modèle affecte automatiquement le coefficient d'emmagasinement adéquat dépendamment que la nappe soit libre ou active.

Le calage consiste à simuler en transitoire le rabattement de la nappe, en réglant itérativement la distribution des coefficients d'emmagasinement et les termes du bilan correspondant aux infiltrations et aux prélèvements jusqu'à l'obtention d'une bonne concordance entre la piézométrie observée et celle calculée.

Les résultats obtenus lors du calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire (Figure 12), entre la piézométrie mesurée et celle simulée, sont en bonne concordance tant, au niveau de la tendance, qu'au niveau numérique. Les épisodes de sécheresse ou pluvieuses ainsi que l'effet des pompages sont reproduits de façon satisfaisante. Les coefficients de conductivité hydraulique obtenus lors du calage varient en fonction des zones de la nappe. Toutefois ces résultats montrent des écarts ponctuels entre les valeurs simulées et celles observées sur le terrain dans certains cas, comme :

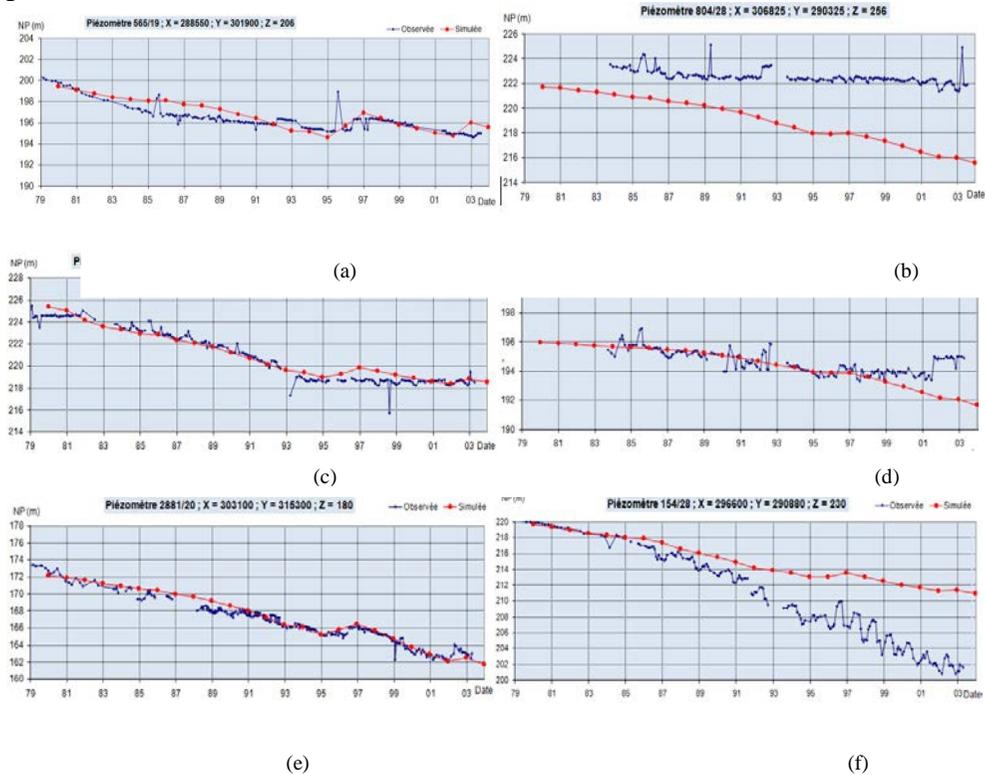
La zone centrale au niveau de la commune de Lahssasna et Sidi El Aïdi connue par l'irrigation par pivots (El Assaoui et al. 2009). Cette zone montre une baisse notable du niveau piézométrique due à l'effet des prélèvements pour l'irrigation et l'eau potable (forage 154/28)

Dans la zone où la nappe est captive, les piézomètres ont baissé de façon régulière puis se sont stabilisés à un certain niveau (Forage 1771/27) (Figure 12). Ceci s'explique par le fait que c'est la porosité efficace qui régit la capacité de stockage et déstockage de la nappe.

Au niveau du forage 800/28, on observe une variation faible du niveau piézométrique, due à sa situation proche de la zone Sud de la réalimentation de la nappe (Figure 12).

De ce fait, l’abaissement du niveau piézométrique est remarquable sur tous les points d’observation pris en considération et montre la tendance préoccupante du déficit continu de la réserve mobilisable de la nappe. Cet abaissement peut s’expliquer par la diminution des précipitations (recharge efficace) et par l’augmentation des pompages qui sont non planifiés dans la zone d’étude. On constate globalement une baisse moyenne du niveau piézométrique de 6 mètres de 1980 à 2003 avec un rabattement (Figure 12) pouvant atteindre 20 mètres par endroits (forage 154/28) et 1434/28.

Les figures 12 (a), (b), (c), (d), (e) and (f) représentent respectivement les piézométries observée et estimée au niveau des piézomètres 565/19, 804/28, 1771/27, 2768/20, 2881/20 et 154/28.



**Figure12** : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés dans les puits

### Effets des changements climatiques : scénarios de l’IPCC

Les scénarios de l’IPCC (GIEC (2008)) ont été considérés, pour l’évaluation de l’impact des variations de la température et des précipitations

sur l'évolution de la piézométrie de l'aquifère de Berrechid à l'horizon 2099. Selon SRES (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions) (GIEC (2008)), l'ensemble des scénarios comprend quatre familles : A1, A2, B1 et B2. Ces scénarios sont fondés sur le même canevas pour ce qui est de l'évolution démographique, sociétale, économique et technologique. Les quatre scénarios illustratifs de référence à savoir A1B, A2, B1 et B2 ainsi que deux scénarios supplémentaires pour les groupes A1F1 et A1T sont également fiables.

Dans cette étude les scénarios de l'IPCC sélectionnés sont : (1) A1B, scénario de référence de l'IPCC ; (2) B1, scénario de la variation minimale ; et (3) A1F1, scénario de la variation maximale. Le tableau 2 montre la variation des précipitations d'une saison à l'autre et la variation annuelle du scénario A1B. Dans cette étude, une moyenne de la variation des précipitations a été prise en considération.

Saison	Température réponse (°C)		Précipitation %	
	Intervalle	Moyenne	Intervalle	Moyenne
<b>Déc-Jan-Fév</b>	1.7-4.6	2.6	-16 à +6	-6
<b>Mars-Avril-Mai</b>	2.0-4.5	3.2	-24 à -2	-16
<b>Juin-Juillet-Août</b>	2.7-6.5	4.1	-53 à -3	-24
<b>Sept-Oct-Nov</b>	2.3-5.2	3.3	-29 à -2	-12
<b>Annuel</b>	<b>2.2-5.1</b>	<b>3.5</b>	<b>-27 à -4</b>	<b>-12</b>

**Tableau 2:**Exemple du scénario A1B [2]

L'augmentation de température d'une telle ampleur aura des conséquences importantes sur les ressources en eau sachant que ces dernières sont alimentées par les précipitations qui constituent une donnée d'entrée principale du bilan hydrique.

Le tableau 3 montre la diminution de la recharge en pourcentage pour les trois types de scénarios sélectionnés selon l'IPCC.

Scénario de l'IPCC	Changement de température (°C)	Diminution de la précipitation (%)	Diminution de la recharge (%)	Type du Scénario
B1	1.1	6	9	Faible
A1B	2.8	12	19	Moyen
A1F1	6.4	38	47	Extrême

**Tableau 3:**Recharge introduite dans le modèle selon les scénarios B1, A1B et A1F1.

### **Simulation de la réaction de la nappe selon les scénarios de l'IPCC**

Les hypothèses adoptées pour simuler les scénarios de l'IPCC concernent essentiellement les sites d'infiltrations et la période de simulation entre 1980 et 2025. Les prélèvements par pompage sont supposés maintenus constants et contrôlés.

La simulation consiste à recharger la zone d'infiltration directe et les polygones des cours d'eau. La figure 3, montre la recharge de la nappe et ses

sources d'alimentation pluviale ou par ruissellement. Ces zones sont d'une part la zone de l'infiltration directe de la pluviométrie qui couvre une superficie de 1229 km<sup>2</sup> où la nappe est libre, avec un taux d'infiltration des pluies efficaces de 100%. Dans la plaine, les limons couvrent une superficie de 280 km<sup>2</sup> environ et font en sorte que la nappe soit en charge. La nature endoréique de la plaine et l'absence d'un réseau hydrographique développé ainsi que la courte durée de stagnation des eaux dans la dépression font que la pluie efficace est considérée comme totalement infiltrée. D'autre part, les polygones des cours d'eau le long desquels la recharge de la nappe est assurée par l'infiltration ou par épandage des crues, on observe une partie des eaux de ruissellement provenant du plateau de Settât à un taux de 80% et un coefficient de ruissellement de 30% sur le plateau de Settât.

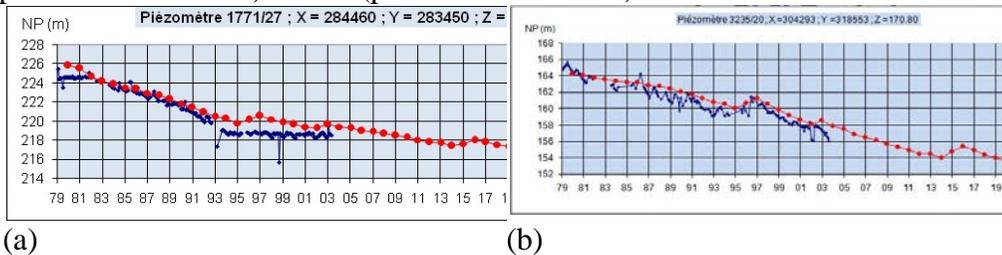
Les données de la recharge relatives aux différents scénarios des lames d'eau affectées au modèle et les superficies des polygones de recharge dans la plaine de Berrechid sont présentées dans le tableau 4 (Figure 3):

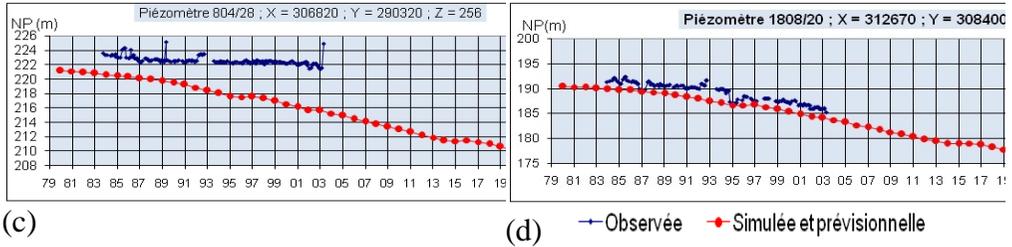
Scénarios	Infiltration (10 <sup>-10</sup> m/s)	pluviale	Infiltration des eaux de ruissellement (10 <sup>-10</sup> m/s)			
			Boumoussa	Tamdrost	Mazer	Ahmer
Superficie km <sup>2</sup>	1229.34		7.330	4.590	5.845	7.024
B1	2.04		4.63	15.60	5.64	-36.90
A1B1	1.94		4.39	14.80	5.35	-35.50
A1F1	1.72		3.90	13.20	4.76	-31.10

**Tableau 4:** Recharge de la nappe pour chaque scénario

Les résultats des simulations sont synthétisés par des graphiques d'évolutions piézométriques et des cartes d'iso-rabattement 2003-2025 pour chaque scénario de l'IPCC, afin de représenter les réactions globales de la nappe.

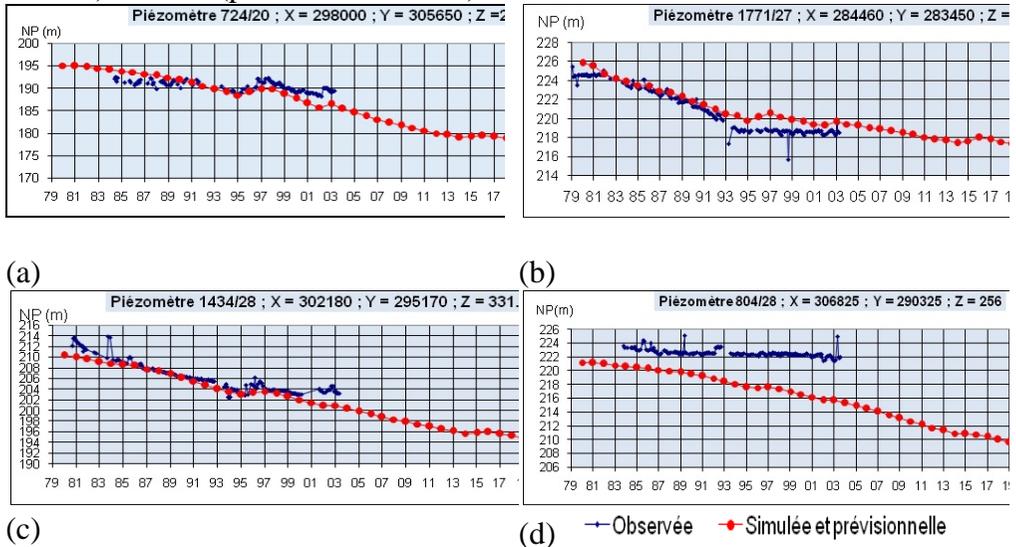
Scénario B1: Ce scénario correspond à une diminution des précipitations de 9 %. Les figures 13 (a), (b), (c) et (d) représentent respectivement les valeurs piézométriques observées et estimées des piézomètres 1771/27, 3235/20, 804/28, 1808/20. On constate une diminution continue du niveau de la nappe avec une variation entre 3 m (piézomètre 1771/27) et 7 m (piézomètre 1808/20).





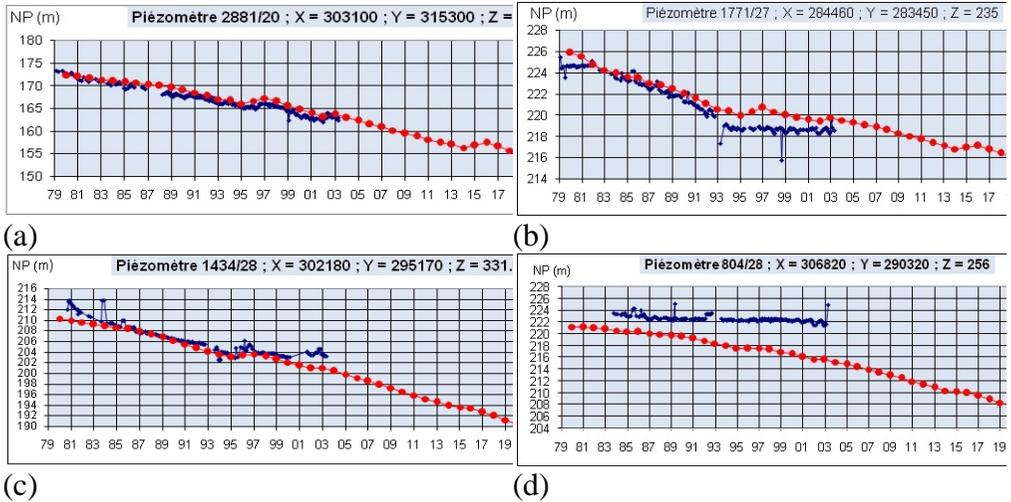
**Figure13 :** Evolution piézométrique prévisionnelle selon le scénario B1 de l'IPPC

Scénario A1B: Ce scénario correspond à une diminution des précipitations de 19 %. Les figures 14 (a), (b), (c) et (d) représentent respectivement les valeurs piézométriques observées et celles estimées des piézomètres 724/20, 1771/27, 1434/28, 804/28. On constate une diminution continue du niveau de la nappe avec une variation entre 4 m (piézomètre 1771/27) et 10 m (piézomètre 724/20).



**Figure14 :** Evolution piézométrique prévisionnelle selon le scénario A1B1 de l'IPPC

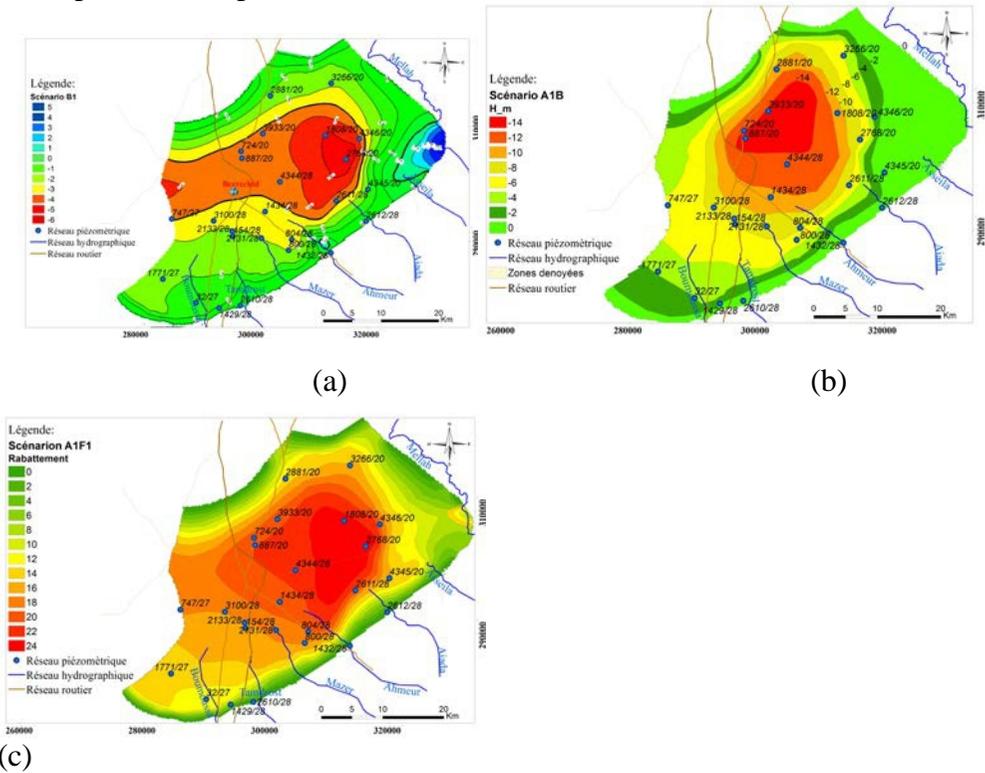
Scénario A1F1: Ce scénario correspond à une diminution des précipitations de 47 %. Les figures 15 (a), (b), (c) et (d) représentent respectivement les valeurs piézométriques observées et celles estimées des piézomètres 2881/20, 1771/27, 1434/28 et 804/28. Il est à noter que pour les trois scénarios, le piézomètre 804/28 montre un grand décalage entre les niveaux observés et simulés est dû au fait que cet ouvrage est situé au niveau de la zone d'aboutissement souterrain à partir du plateau du Settât et en même temps qu'il est éloigné des zones d'infiltration.



**Figure 15** Variation du niveau piézométrique pour le scénario A1F1

— Observée — Simulée et prévisionnelle

Les figures 16 (a), (b), (c) représentent la variation piézométrique correspondante respectivement aux scénarios B1 A1B et A1F1 de l'IPCC.



**Figure16:** Evolution de la piézométrie de la nappe de Berrechid à l'horizon 2025 en comparaison à la situation actuelle par application des scénarios B1, A1B et AF1 de l'IPCC

Les effets constatés au niveau des scénarios étudiés montrent une baisse importante et continue. Cette baisse peut atteindre respectivement aux trois scénarios B1, A1B1 et A1F1 la valeur de 6 m, 14 m voire 24m. Ces fortes baisses de la nappe vont amener au dénoyage progressif de nombreux forages.

## **Conclusion**

Le couplage de la modélisation numérique avec un suivi régulier des données relatives à la piézométrie de la nappe et à l'utilisation de ses ressources en eaux pour l'AEP ou pour l'agriculture, permet une aide à la prise de décision en termes de gestion et de planification des eaux souterraines.

Le modèle numérique considéré dans cette étude s'est basé sur MODFLOW/GMS pour la simulation de l'hydrodynamique de la nappe et sur les scénarios de l'IPCC pour tenir compte des changements climatiques. Il a permis de mettre en évidence l'impact de ces changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines.

L'étude numérique a mis en évidence une tendance de diminution du niveau de la nappe variant de 1 à 25 m au niveau des piézomètres utilisés par l'Agence du Bassin Hydraulique de Bouregreg. Les valeurs maximales ont été constatées au niveau de la zone centrale de la nappe où les prélèvements agricoles sont les plus importants.

La tendance générale, qui se dégage de l'évolution des différences de niveau piézométriques des forages par rapport aux différents scénarios de l'IPCC considérés, montre que l'effet de la diminution de la recharge, implique une diminution continue des niveaux piézométriques. Ce qui montre que les ressources renouvelables d'eau douce se réduisent considérablement.

L'étude a aussi démontré que certains endroits seront asséchés rapidement même relativement à des scénarios conservateurs en termes de changements climatiques. Il serait donc opportun d'étudier les perspectives de restauration volontariste de la nappe. Pour ce faire, plusieurs scénarios peuvent être envisagés tels par exemple la mise en place d'aménagements adéquats pour favoriser la recharge artificielle (barrages) ou par la réduction épisodique et stricte des pompages (lors des années excédentaires) ou encore par le couplage de ces deux actions.

## **References:**

- ABHBC (Agence du Bassin Hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia), "actualisation et synthèse des données hydrogéologiques de la nappe de Berrechid" (2004).
- Allen, D., Mackie, D.C., et We, M. D. "Climate change and groundwater: a

modeling approach for identifying impacts and resource sustainability in the central interior of British Columbia”, Branch science division, Environment Canada, British Columbia (2004)

Bates, B.C., Kunzewicz, Z. W., Wu, S. et Palulikov, J.P. “Climate change and water technical paper of the IPCC VI edition”, IPCC, Genève (2008)

Barron, O.V., Crosbie, R. S., Charles, S.P. et al. “Climate change impact on groundwater resources in Australia”, Waterlines report series, Number 67 (2011)

Bear, J. “Hydraulics of groundwater”, McGraw Hill 1979.

Bear, J., Beljin, M.S., et Rose, R., “Fundamentals of groundwater modeling”, EPA groundwater issue (1992)

Burton, A., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., et Klisby, C.G. “Downscaling transient climate change using a Neyman-scott rectangular pulses stochastic rainfall model”, journal of hydrology, 381(1-2), page 18-32 (2010)

Carneiro, J.F., Boughriba, M., Carreira, A., Zarhloule, Y., Rimi, A., et El Houadi, B. “Evaluation of climate effects in a coastal aquifer in Morocco, using a density dependent numerical model”, Environmental Earth Sciences (2010)

Crosbie, R.S., McCallum, J. L., Walker, G.R., et Chiew, F.H.S. “ Diffuse recharge across Australia under a 2050 climate: modeling results”, CSIRO water for healthy country national research (2011)

Crosbie, R.S., Scanlon, Mpelasoka, B.R. et al. “Potential climate change effects on groundwater recharge in the high plains aquifer”, water resources research, vol.49, (2013)

Dragoni, W. et Sukhija, B.S. “Groundwater climate change modeling”, geological society of London, 186 pages, publ. 288 (2009)

Edet, A., Abdelaziz, R., Merkel, B., Obereke, C., et Nganje, T. “ Numerical Groundwater flow modeling of the coastal plain sand aquifer”, Journal of water resources and protection, Vol. 6, page 193-201 (2014)

Ekkehard et al., “Numerical Models of Groundwater Flow and transport”, Encyclopedia of groundwater sciences, edited by Anderson M.G, John Wiley and sons (2005)

El Assaoui N., Amraoui F. et El Hajji K. “ Contribution à la gestion intégrée de la nappe de Berrechid (Maroc)”conférence ACRH, Québec, Canada (2009)

El Assaoui N. “ Utilisation des outils SIG au niveau de la gestion et la planification des eaux souterraines (nappe de Berrechid)”, Thèse de Master (SIG et gestion du territoire) (2010)

El Assaoui N. Amraoui F. et El Hajji K “Toward a better management of Berrechid basin (Morocco), and a development of a Decision Support System for groundwater management”. WSTA 9th Golf Water Conference

- “Water Sustainability in the GCC Countries” Muscat, Sultana Oman (2010)
- EMRL (Environmental Modeling Research Laboratory), “Groundwater Modeling System GMS version 3, Reference Manual”, Birmingham Young University (1999).
- EMRL, ”Groundwater modeling system (GMS) version5”, help file, Birmingham Young University (2004)
- Fowler, H.J., Benkisops, S. et Tebaldi, C. ”Modeling the impacts of projected future climate change”, Cambridge University Press (2007).
- GIEC (Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat), “ Le changement climatique et l’eau”, Document VI du GIEC, PNUE et OMM, (2008)
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Burton, A., Fowler, H. J., Orban, P. et Dassargues, A. “Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climate scenarios”, water resources research, vol. 47 (2011)
- Harbaugh, A.W., Banta, E. R., Hill, M.C. et McDonald, M.G. “MODFLOW 2000: The US geological Survey (USGS) Modular groundwater Model”, user guide, USGS (2000)
- Harbaugh, A.W. “MODFLOW 2005: The USGS modular groundwater model”, USGS techniques and methods 6, A6 (2005)
- Healy R.W., “ Estimating groundwater recharge”, Cambridge University Press (2010)
- Hetzel F. et al., “Groundwater and climate changement: challenges and possibilities”, Police advice groundwater resources and management (BGR) and Geocenter (Denmark) (2008)
- IPCC, “Climate change: impacts and vulnerability”. Report of the intergovernmental panel on climate change, fourth assessment Report, Cambridge University Press (2007)
- IPCC, “Climate change: the physical science basis”, Cambridge University Press Fifth assessment report, (2013)
- IPCC “Climate change: impacts adaptation and vulnerability: region aspects”, Cambridge University Press (2014)
- IPCC, “Climate change: synthesis Report”, Cambridge University Press (2015)
- Jackson, Ch. R., “Modeling the effects of climate change and its uncertainly on US chalk groundwater resources from an ensemble of global climate model”, Journal of Hydrology, volume 399, issues 1-2, page -28 (2011)
- Kidmose J. et al., “climate change impact on groundwater levels: ensemble modeling of extreme values”, Hydrology and earth system sciences, vol17, p.1619-1634 (2013)
- Kumar C.P. “Numerical modeling of groundwater flow using MODFLOW”. Indian Journal of Science, volume 2, Number A, (2013)

- Kumar C.P., “Climate change and its impact on groundwater resources”, International journal of engineering and sciences, Vol. 1, Issue 5, p. 43-60 (2012)
- Loaiciga, H. A., “Climate change and groundwater”, Ann. Assoc., Am., Geogr., 93(1) p 30-41 (2003)
- Margat J., “Les eaux souterraines: une richesse mondiale”, UNESCO (2006)
- McDonald, M.G., et Harbaugh, A.W. “A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: “Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey”, Book 6, Chapter A1, pp. 586 (1988)
- Milly, P. et al., “Global pattern of trends in stream flow and water availability in a changing climate”, Nature 438, p. 347-350 (2005)
- Moustadraf J., Razak, M. et Sinan, M. “Evaluation of the impact of climate change on the coastal chaouia aquifer, Morocco, using numerical modeling”, Hydrogeology Journal (2008).
- NGCLC (National Groundwater and contaminated land center), “Guide to good practice for the development of conceptual models and the selection and application of mathematical models of contaminant transport processes in the subsurface”, Report NC/99/38/2 (2001)
- Nyenge, P.M., et Batelaan, O. “Estimating the effects of climate change on groundwater recharge and base flow in the upper zsezibwa catchment, Uganda”, Hydrological sciences, V54, (2009)
- Taylor R.G et al., “Groundwater and climate change”, Nature climate change, vol. 13, Mac Millan Publishers (2013)
- Turc L. “Nouvelle formule pour le calcul du bilan de l’eau”, Comptes Rendus des Sciences de l’Académie des Sciences (1951).
- Wels Ch. Et al., “Guidelines for groundwater modeling to assess impacts for proposed natural resources development activities”, British Columbia ministry of Environment, Water Protection and sustainability branch (2012)