

## **Modélisation de l'écoulement des eaux souterraines de l'aquifères quaternaire des palmeraies de Figuig et des plaines de Tisserfine, El Arja (Haut Atlas Oriental, Maroc)**

*Youssef El Khamal*

*Ait Said Brahim*

*Hachem Aziz*

*Rabia El Fakir*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

*El Mostafa Mili, PES*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences de Meknès,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

*Radouan Mehdaoui, Docteur*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

[Doi:10.19044/esj.2022.v18n24p108](https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n24p108)

---

Submitted: 15 November 2021

Accepted: 01 July 2022

Published: 31 July 2022

Copyright 2022 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

*Cite As:*

Khamal Y.E., Brahim A.S., Aziz H., Fakir R.E., Mili E.M. & Mehdaoui R. (2022). *Modélisation de l'écoulement des eaux souterraines de l'aquifères quaternaire des palmeraies de Figuig et des plaines de Tisserfine, El Arja (Haut Atlas Oriental, Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 18 (24), 108.

<https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n24p108>

---

### **Résumé**

Le présent travail a pour objectif la modélisation hydrodynamique de la nappe Quaternaire de Figuig ; généralement la nappe circule dans des alluvions limoneuses et des calcaires travertineux du Quaternaire avec un substratum imperméable constitué des marnes du Jurassique. La zone d'étude est caractérisée par un climat désertique. La modélisation hydrogéologique a été mise en œuvre par le logiciel MODFLOW. La nappe a été simulée en régime permanent et transitoire ; elle résout l'équation gouvernante de l'écoulement des eaux souterraines en milieux poreux continus et elle calcule la charge hydraulique par simulation des éléments comme : drain, puits, oued, etc. Le modèle numérique ainsi élaboré a permis d'estimer le bilan des

aquifères des palmeraies de Figuig et de la plaine de Tisserfine-El Arja dans les deux cas : les conditions actuelles et le scénario de gestion simulant l'élimination des apports des barrages de Sfisif et de Rkiza, par l'oued Tisserfine jusqu'à l'oued Zouzfana.

---

**Mots clés :** MODFLOW, modèle numérique, écoulement souterrain, Figuig, plaines de Tisserfine-El Arja, régime permanent, régime transitoire

---

## **Groundwater flow modelling of the Quaternary aquifer of the Figuig palm groves and Tisserfine Plains, El Arja (High Eastern Atlas, Morocco)**

*Youssef El Khamal*

*Ait Said Brahim*

*Hachem Aziz*

*Rabia El Fakir*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

*El Mostafa Mili, PES*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences de Meknès,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

*Radouan Mehdaoui, Docteur*

Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences,  
Département de Géologie, Zitoune, Meknès, Maroc

---

### **Abstract**

The current study aims at providing a hydrodynamic model of the Quaternary water aquifer in Figuig; the water aquifer generally flows in a silty alluvial soil and travertine limestone of the Quaternary with an impermeable substratum of the Jurassic marl. The area of the study is characterised by a desert climate. The hydrogeological modelling was carried out using the MODFLOW software. The groundwater was simulated in permanent and transient regime; it solves the governing equation of groundwater flow in continuous porous media and calculates the hydraulic load by simulating elements such as: drain, well, river... Therefore, the digital model developed allowed us to estimate the aquifer balance of Figuig palm groves and Tisserfine-El Arja plain in the two cases: the current conditions and the management scenario simulating the elimination of the inflows from the Sfisif and Rkiza dams, through the Tisserfine wadi to the Zouzfana wadi

---

**Keywords:** MODFLOW, digital model, groundwater flow, Figuig, Tisserfine-El Arja plains, steady state, transient regime

## 1. Introduction

Les eaux souterraines des palmeraies de Figuig et des plaines de Tisserfine, El Arja constituent la principale ressource en eau, aussi bien pour l'irrigation que pour l'eau salubre. Cette ressource est plus sollicitée dans les palmeraies de Figuig où se concentre la majorité de la population. Les effets combinés de la sécheresse et de l'accroissement des demandes en eau dans cette zone ont conduit à la diminution de la quantité de cette ressource vulnérable dont la disponibilité est, jusqu'à maintenant, très limitée.

Les palmeraies de Figuig et leurs localités environnantes bénéficient de l'existence des nappes superficielles et profondes accessibles aux usagers à des profondeurs différentes ; elles dépendent des précipitations, des écoulements superficiels des oueds ayant un régime hydrologique irrégulier et des infiltrations des eaux d'irrigations (Amar et al., 2013).

Dans ce contexte, une modélisation hydrodynamique est nécessaire pour la compréhension de l'hydrodynamisme et les différents termes du bilan de l'aquifère superficiel et ce afin de savoir dans quelles mesures les potentialités en eau de cette nappe permettent-elles un développement soutenu du secteur et de répondre à la stratégie d'une gestion durable des ressources en eau de la région.

### 1.1. Situation de la zone d'étude

#### 1.1.1. Contextes climatique, géologique et hydrogéologique

La zone d'étude, située à l'extrême est du Maroc, renferme les plaines de Tisserfine, El Arja et les palmeraies de Figuig situées dans l'oasis de Figuig (Figure 1). Ces palmeraies sont irriguées par des sources, des Khetaras et des puits. L'ensemble de la zone occupe une superficie de 250 km<sup>2</sup>.

Le climat est aride, la pluviométrie moyenne annuelle est de 125 mm, la température moyenne de l'air atteint 19,3 °C.

L'oued Zouzfana et son affluent oued Rzika ont des apports qui atteignent respectivement 27 et 8,2 Mm<sup>3</sup>/an (Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, 2004).

La capacité du barrage Sfisef sur l'oued Sfisef est de 23 Mm<sup>3</sup> et celle du barrage Rzika sur l'oued Rzika est de 12 Mm<sup>3</sup> (Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, 2004).

La série stratigraphique débute par le Trias à dépôts de marnes et d'argiles rouges gypsifères. Le Lias est représenté principalement par des calcaires à silex, des dolomies ; le Bajocien par une alternance marno-calcaires sur lesquelles se sont déposées des quartzites et des grès noirs du Bathonien.

Le Quaternaire est représenté par des graviers marneux formant par endroits des zones encroûtées (Dresnay, 1963).

La plaine abrite :

- la nappe phréatique des palmeraies ;
- la nappe phréatique de la plaine de Tisserfine-El Arja ;
- la nappe profonde des calcaires fracturés et karstiques du Lias ;
- l'aquifère potentiel du Dogger.

Les eaux de la première nappe (palmeraies de Figuig) circulent dans les alluvions limoneuses, les calcaires et les cônes de déjection. La charge hydraulique varie de 925 à 840 m, l'écoulement se fait selon une direction NNW-SSE (Figure 2b). Son substratum imperméable est constitué de marnes jurassiques.

Le gradient hydraulique calculé au Nord (2,5%) est supérieur à celui du gradin Sud (1,04%) (Jilali et al., 2014).

La deuxième nappe (plaine de Tisserfine, El Arja) est composée de limons, d'alluvions et de sables. La charge varie de 1060 à 860 m. Le sens d'écoulement se fait de l'Ouest vers l'Est (Figure 2a). Le substratum comprend des marnes tertiaires.

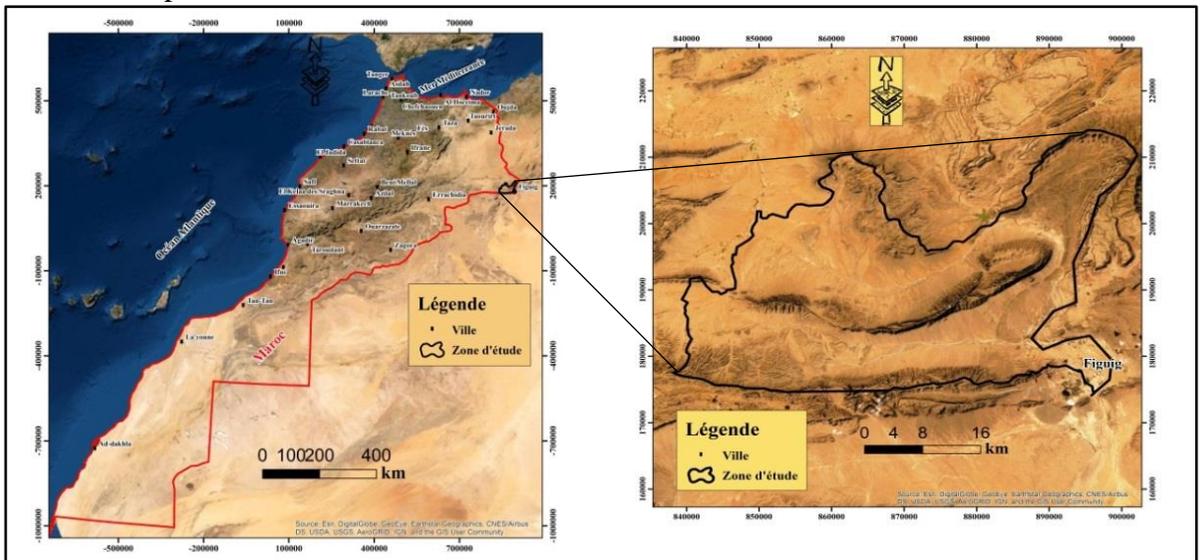
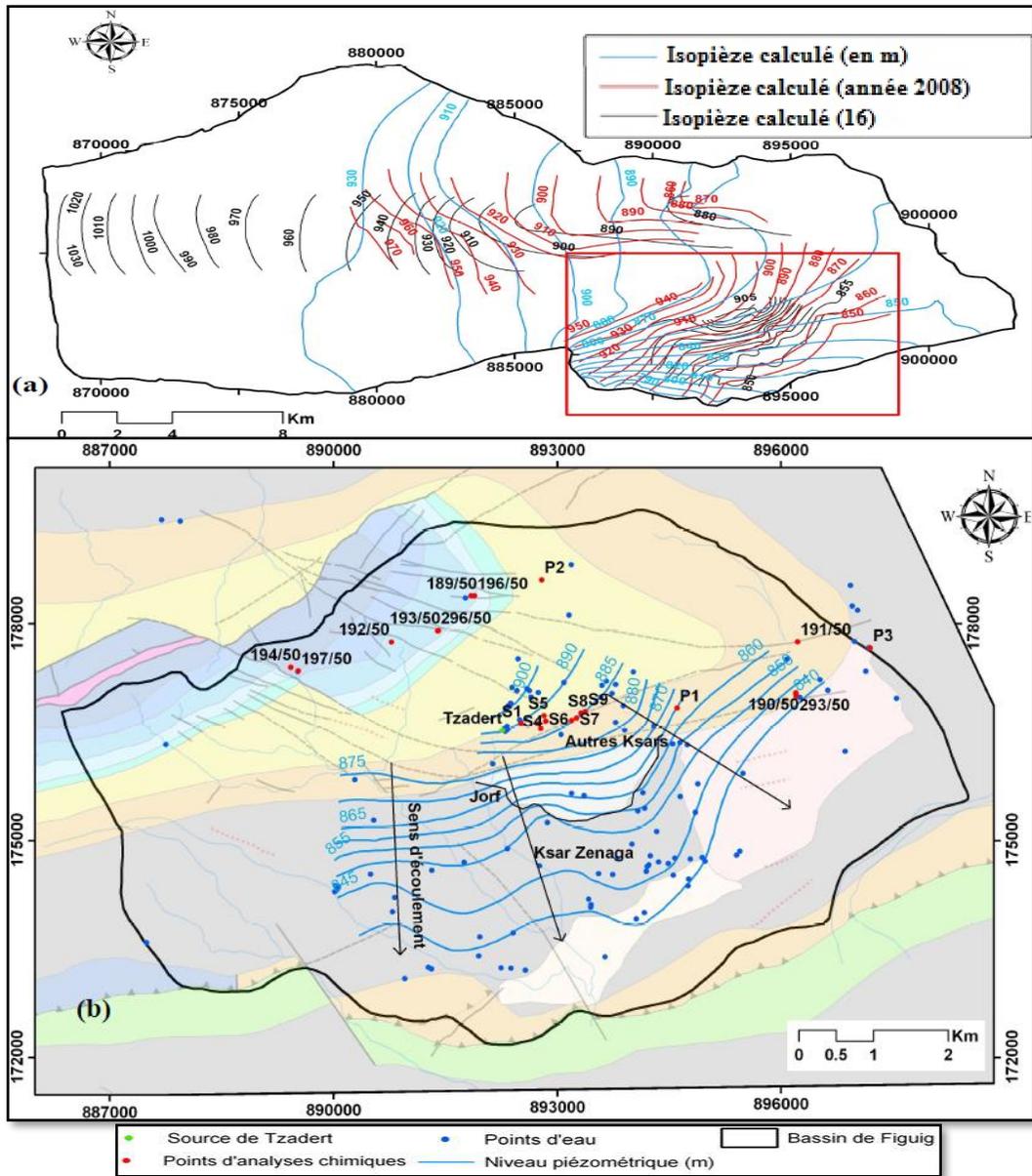


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude



**Figure 2.** Cartes piézométriques de l'année 2010: (a) plaines de Tisserfine, El Arja et (b) Figui (Jilali 2014).

## 2. Méthodologie de travail

La modélisation des eaux souterraines est réalisée par le logiciel de simulation numérique des écoulements MODFLOW, qui permet d'élaborer un modèle hydrodynamique. Ainsi, l'analyse de la carte géologique, l'emplacement des sources, des puits, des khetaras, la géométrie du réservoir, les échanges hydrauliques, les coupes lithologiques des forages

hydrogéologiques et les zones d'affleurement qui constituent le lieu de la recharge (Castany, 1998), peuvent être définis dans le modèle conceptuel.

### 2.1. Modélisation de la nappe en régime permanent

Le modèle mathématique développé par le logiciel Modflow considère que l'aquifère est hétérogène. Il est représenté par une équation d'écoulement supposant un milieu poreux et continu (1) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Où :  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  et  $K_{zz}$  sont des valeurs de la conductivité hydraulique le long de l'axe de coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ , que l'on suppose parallèle aux axes principaux de la conductivité hydraulique ( $m.s^{-1}$ ) ;  $h$  est la charge piézométrique (m) ;  $W$  est un flux volumétrique par unité de volume et représente les sources et/ou puits d'eau ( $s^{-1}$ ) ;  $S_s$  est l'emmagasinement spécifique de la matière poreuse ( $m^{-1}$ ) et  $t$  est le temps (s).

### 2.2. Le Modèle conceptuel (MC)

Le modèle conceptuel commence par la délimitation par un arc fermé de la zone d'extension de l'aquifère. Cette limite renferme les éléments suivants de l'aquifère :

- puits traditionnels et forages d'exploitation ;
- les sources et Khetaras ;
- Oueds Zouzfana et Sfissef ;
- Drains.

Les conditions aux limites choisies sont les suivantes :

- La modélisation débute au nord-ouest du flanc sud de Jbel Grouz depuis  $X=877.000$  et se déplace vers l'est pour suivre la faille qui passe près de Jbel Haimer et arrive à Zouzfana près de El Arja ;
- la boucle de l'oued Zouzfana et suit les montagnes de jbel Sidi Youssef, jbel Tarhla, Jbel Znaga, Jbel Melias puis elle suit une ligne horizontale jusqu'au point de départ.

La représentation du MC à base objet est convertie en modèle numérique à base de grille de MODFLOW. Selon (Bear et Verruijt, 1987) le bon modèle conceptuel devrait décrire la réalité de manière simple et conforme aux objectifs de modélisation et aux exigences de gestion.

### 2.3. Calage en régime permanent

Le calage c'est la modification des données calculées par les données observées. Ce calage concerne :

- La charge hydraulique dans des puits sélectionnés ;

- la conductivité hydraulique ;
- la recharge de l'aquifère ;
- le débit d'écoulement observé dans les oueds.

### **3. Résultats et discussion**

#### **3.1. Régime de la nappe**

Le régime piézométrique annuel de la nappe est irrégulier. Son évolution interannuelle et marquée, à plus court terme, par les événements pluviométriques les plus importants et aussi par les débits des sources.

#### **3.2. Discrétisation du domaine de la nappe**

La zone d'extension de l'aquifère représentée sur le modèle s'étend sur une superficie d'environ 122 km<sup>2</sup>. En effet, les limites de la nappe à modéliser sont naturelles et le domaine discrétisé comme étant monocouche. Le bassin d'alimentation couvre une surface de 652 km<sup>2</sup> qui est le bassin versant de Figuig-Tisserfine-El Arja. Les bassins amonts des oueds Sfissef et Rkiza sont considérés ne pas participer à l'écoulement souterrain de Figuig en raison de la barrière formée par Jbel Maiz (affleurement des formations argileuses du Lias).

#### **3.3. Conditions aux limites**

Les conditions aux limites appliquées à la nappe sont représentées par les sources, les puits, les oueds, les drains et les limites générales de charge (Figure 3).



### **3.4. Scénario sur la charge spécifique**

Dans ce scénario, la condition à charge imposée a été éliminée le long de l'oued Zouzfana. Ses charges spécifiques avaient des valeurs de 940 m, 840 m et 820 m. Les autres paramètres ont été conservés.

#### **3.4.1. Les résultats du modèle**

##### **3.4.1.1. Carte piézométrique de la nappe des palmeraies de Figuig**

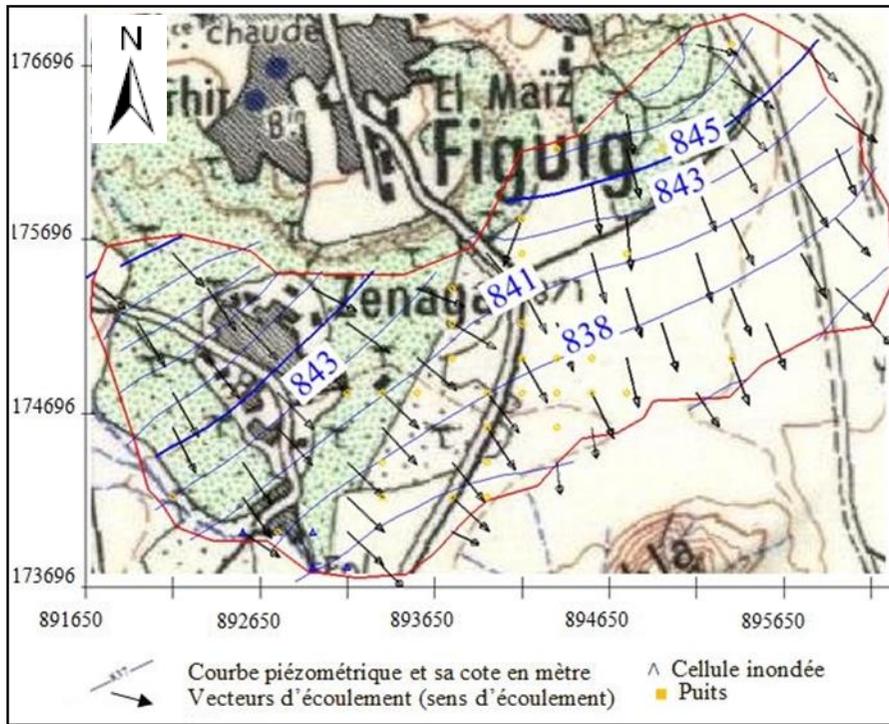
La carte a été élaborée par le modèle d'écoulement souterrain. L'altitude du niveau piézométrique, par rapport au niveau de la mer, baisse régulièrement de 958 m à 835 m ; sa valeur moyenne est de 870 m. Les lignes du courant montrent un écoulement des eaux souterraines suivant une direction NW-SE à l'ouest de la nappe et une direction NNW-SSE à l'est. Au centre, ces lignes convergent vers le sud (Jbel Tarhla) (Figure 3).

Les zones inondées se concentrent au sud-ouest de la nappe, leur nombre augmente depuis la date du démarrage de la simulation jusqu'au 01/09/1998 où le nombre des cellules inondées atteint un maximum de 18 ; puis ce nombre baisse jusqu'au 01/09/2008 et remonte légèrement pour se stabiliser relativement entre 01/09/2009 à la fin de la simulation.

#### **3.4.2. Nappe phréatique de la plaine Tisserfine-El Arja**

##### **3.4.2.1. Carte piézométrique**

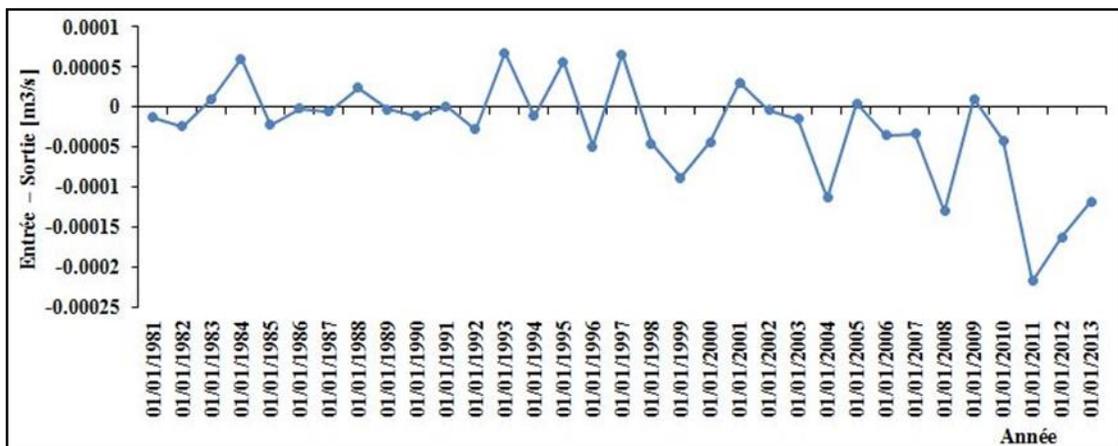
La carte piézométrique montre que la côte du niveau piézométrique baisse de 950 m à 893 m dans sa partie ouest le long de l'oued Kheneg et de Chegguet El Abid. Le sens d'écoulement est de direction est-ouest. Au sud, la charge hydraulique continue à baisser jusqu'à 881 m à l'exutoire du réseau hydrographique situé à l'ouest du Jbel Mélias où les lignes de courant convergent. Dans la région de Figuig, la côte maximale du niveau est de 895 m au nord, elle passe à 811 m au sud entre Jbel Zenaga et Tarhla. L'écoulement se fait selon une direction nord-ouest-sud-est. Au nord-est de la nappe, la charge maximale est de 937 m près Tiniet Oulad Amir. Celle-ci baisse vers l'est (830 m), le sud-est (824 m) et l'oued Zouzfana qui draine la nappe au sud-est. La charge continue à baisser jusqu'à atteindre une valeur minimale de 813 m. Dans ce point, les lignes de courant convergent. Des zones sèches dispersées apparaissent à l'est de Chegguet El Abid et au pied de Jbel Melias (Figure 3).



**Figure 3 :** Carte piézométrique du modèle de la nappe phréatique des palmeraies de Figuig du 01/09/1981

### 3.4.2.2. Bilan global obtenu par le modèle

Dans les zones irriguées sous les palmeraies, le bilan de la nappe négatif se manifeste durant une grande période de la simulation ; sa valeur minimale atteinte est de  $-2,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  (2011). Le bilan positif d'une décennie est d'une valeur maximale de  $1,05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  (1983) (Figure 4).



**Figure 4:** Bilan des zones irriguées sous les palmeraies de Figuig

La comparaison entre les entrées et les sorties du bilan global de la nappe (Figure 5) montre que les sorties sont plus importantes durant la quasi-totalité de la période de simulation, soit 23 ans. Le bilan le plus négatif est celui de l'année 2011, avec une valeur maximale de  $-1,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondant à un total des sorties de  $0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ . En effet, le stockage a été totalement épuisé, le pompage de la nappe est important par rapport à sa recharge estimée faible.

La durée où les entrées sont plus significatives que les sorties n'est que de 11 ans. Le bilan le plus positif est celui de l'année 1983, avec une valeur de  $+1,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondant à un total des entrées de  $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$ . En effet, le stockage est de l'ordre de  $4,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ , le puisage de la nappe est très faible par rapport à sa recharge jugée importante.

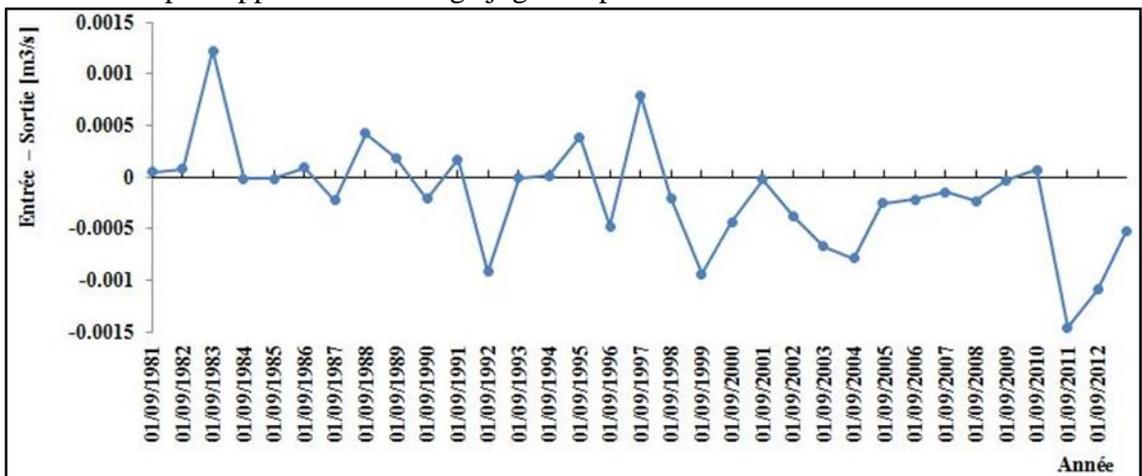


Figure 5 : Bilan global de la nappe

### 3.4.3. Scénario proposé

#### 3.4.3.1. Piézométrie

Le scénario proposé a pour objectif de montrer l'influence des réserves des deux barrages situés au nord-ouest de la plaine de Tisserfine-El Arja.

La comparaison entre le cas de la simulation réelle et celui du scénario donne les résultats suivants (Figure 6 et Figure 7) :

- La piézométrie de la nappe des palmeraies montre que les côtes moyennes annuelles ont une tendance à régresser dans le scénario depuis le démarrage de la simulation où la charge est 868,89 m jusqu'en 2013 avec une côte de 850,47 m. Dans le cas réel, la charge moyenne a une tendance en baisse peu marquée (de 870,03 m à 868,47 m). Le drainage est plus accentué vers le sud de Figui (Figure 6) ;
- Durant toute la période de simulation, la charge varie de 954,28 à 810 m dans le cas réel et de 950 à 810 m dans le scénario ;

- La charge moyenne d'un pas de temps annuel dans le premier cas est peu variable (868,88 à 850,47 m). Dans le deuxième cas, elle décroît de 870,49 à 868,03 m ;
- La morphologie de la surface piézométrique dans la partie ouest demeure invariable dans les deux cas. Au nord de Figuiç, les côtes ont baissé. Cependant plus au nord-est, celles-ci ont augmenté jusqu'à émergence de la nappe (bilan positif). Au nord de Figuiç des zones sèches à bilan nul surgissent. La côte aux sorties sud de la nappe avoisine (813 m) dans les deux cas (Figure 6 a et b).

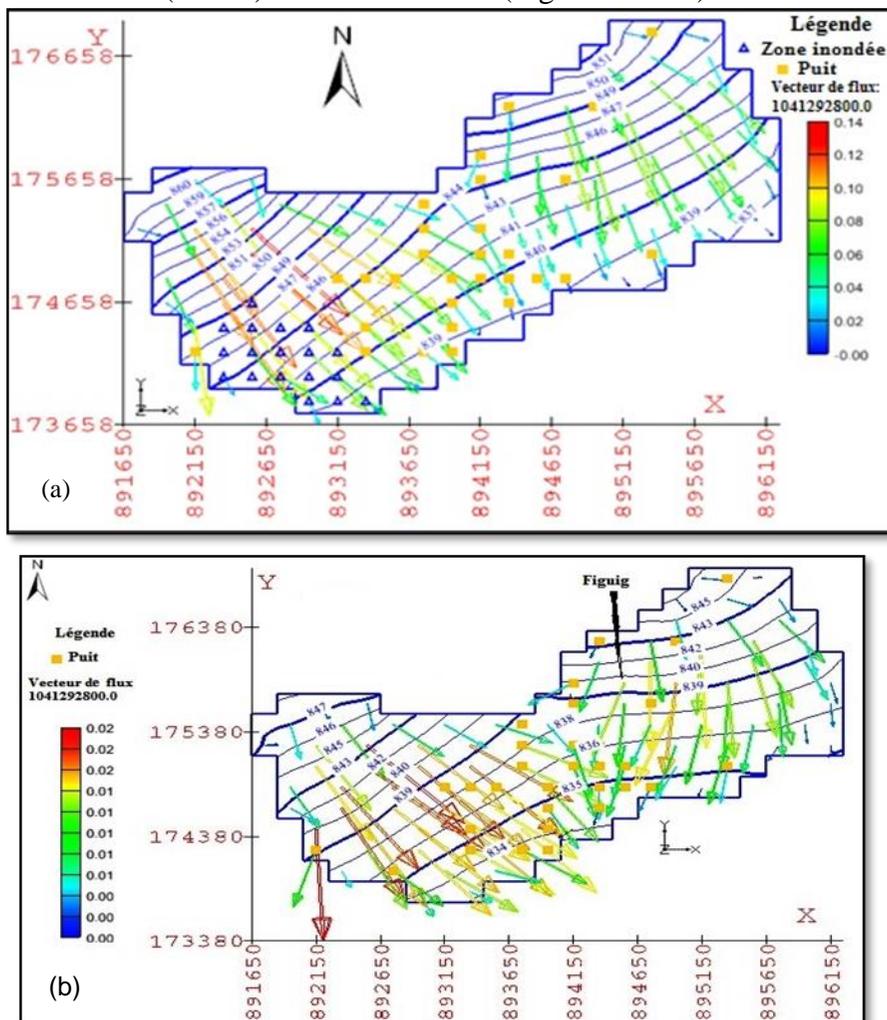
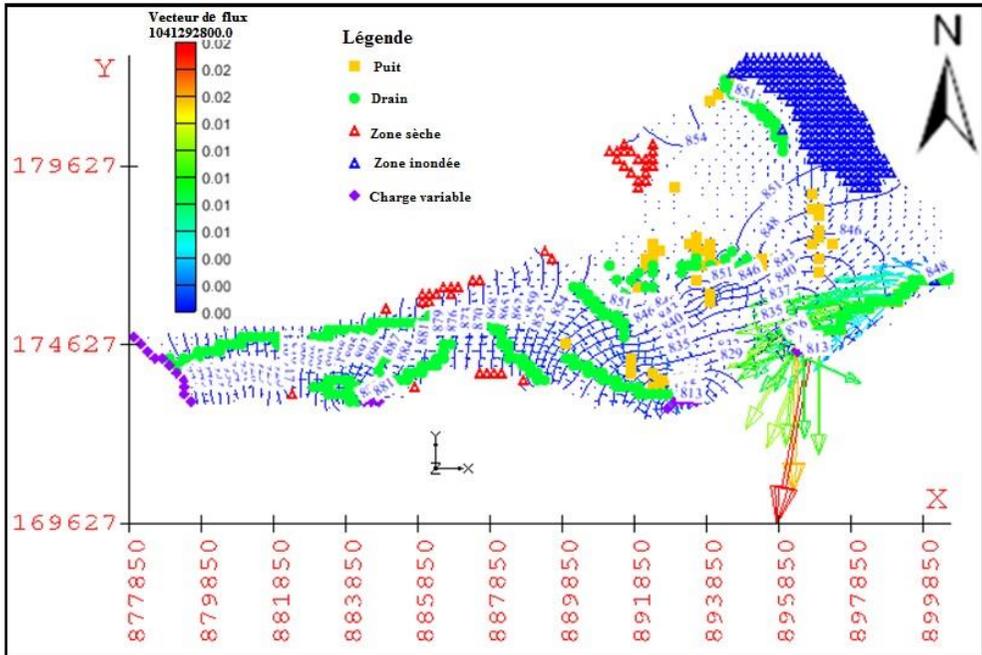


Figure 6: Carte piézométrique du modèle réel (a) et du scénario (b)



**Figure 7 :** Carte piézométrique du scénario avec modification de la CL charge spécifique

### 3.4.3.2. Bilans obtenus par le modèle

La comparaison des bilans de la 1<sup>ère</sup> nappe entre les cas réel et celui du scénario (Figure 8) montre que :

- le nombre d'années où le bilan est négatif est passé de 23 à 27 ans ;
- le bilan le plus négatif est celui de l'année 1988, avec une valeur de  $-3,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- la durée où les entrées sont plus importantes que les sorties est encore réduite à 6 ans ;
- la valeur maximale du bilan de  $+4,86 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , apparaît en 2010, au lieu de 1983 ;
- le bilan réel est supérieur au scénario durant 13 ans (1981-1984 ; 1986 ; 1988-1989 ; 1991 ; 1995 ; 1997 ; 2000-2001 et 2009).

Ces résultats correspondent à ceux rapportés par (El Kayssi et al, 2019) pour une nappe alluviale dans une zone montagneuse semi-aride dans la région de riche même si les volumes d'eau indiqués sont éventuellement différents de ceux de notre zone d'étude.

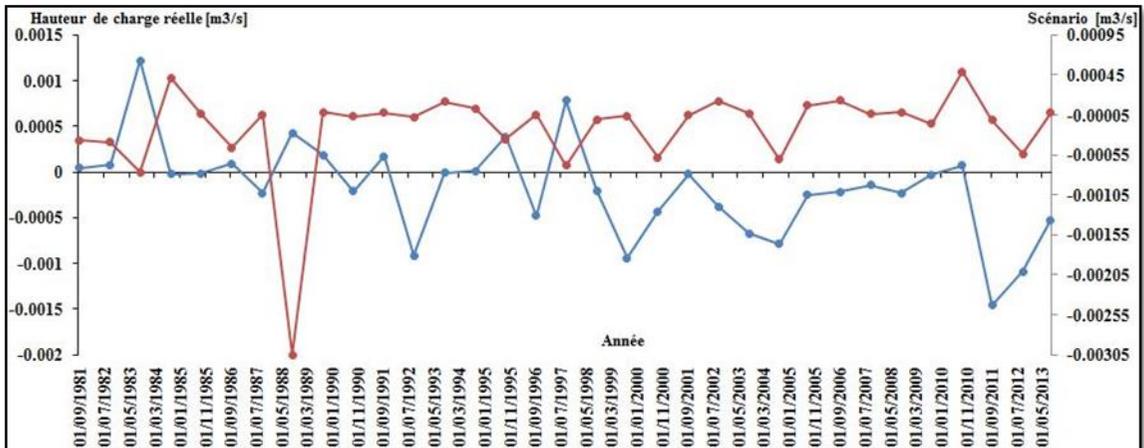


Figure 8 : Bilan du cas réel et du scénario

## Conclusion

La modélisation de l'écoulement a montré que les axes principaux du drainage sont de direction nord-sud pour les deux aquifères. Au niveau de l'oued Zouzfana, l'injection a généré un axe de drainage orienté vers le sud, entre Jbel Tarhla et Jbel Si Youssef.

Le débit de sortie le plus important de la deuxième nappe est calculé entre Jbel Tarhla et Jbel Si Youssef à oued Zouzfana 22,4 l/s.

Le bilan montre que les sorties sont plus importantes que les entrées ; sa valeur minimale est  $-1,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  en 2011.

Le scénario proposé sur la condition à charge imposée a fait apparaître une zone inondée au nord-est de la plaine et un bilan plus négatif que le cas réel.

Une répartition uniforme des débits d'injection de Zouzfana n'a pas de signification physique, elle doit être basée sur des calculs scientifiques de forages d'injection.

Les résultats montrent que les graves sécheresses qu'ont connues la région en 1991–1993, 1997–2000 et 2002–2005 et la surexploitation par pompage ont un effet négatif sur la recharge de la nappe. Enfin, une gestion intégrée des ressources en eau au sein de cette zone est nécessaire et permettrait de prévenir d'éventuels conflits liés aux utilisations variées de ces ressources (eau potable et irrigation).

## References:

1. Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya. (2004). Inventaire des prélèvements d'eau souterraine à partir des nappes de la plaine de Figuig et élaboration des cartes hydrogéologiques de gestion des nappes: 120 p. Oujda.

2. Amar M, Boualoul M, Hilali M, Jilali A. (2013). Mode de recharge du système aquifère des sources de l'oasis de Figuig, Haut Atlas Oriental (Maroc). Bordeaux: Actes du colloque, 19ème Journées Techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues : Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources, 249–253.
3. Bear J, Verruijt A. (1987). Theory and applications of transport in porous media. Modeling of groundwater flow and pollution. Dordrecht: Reidel.
4. Castany G. (1998). Hydrogéologie : principes et méthodes. Paris :Bordas, 239 p.
5. Dresnay R.D. (1963). Carte géologique du Haut Atlas oriental au 1/200 000, feuille de Bouarfa, Ich, Talzaza et Figuig. Rabat: Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc.
6. El Kayssi Y, K. I. (2019). Caractérisation et modélisation d'une nappe alluviale dans une zone montagneuse semi-aride (cas de la nappe d'Er-Rich, Haut Atlas, Maroc). La Houille Blanche, 5-6, 26–34.
7. JILALI A, RIMI A, ZARHLOULE Y, OUZZAOUIT L. (2014). Sur la structure hydrogéothermique de la région de Figuig (Haut Atlas oriental, Maroc). Rabat: Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre.