

Apport du modèle géologique 3D à l'étude de la structure de l'aquifère profond d'Aïn Béni Mathar, Maroc Oriental

Contribution of the 3D geological model to the study of the Ain Béni Mathar deep aquifer structure, Eastern Morocco.

Mostafa BOUAZZA^{1,2*}, Driss KHATTACH¹, Mohammed Rachid HOUARI¹ & Olivier KAUFMANN³

1. Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Laboratoire LGA et COSTE, Avenue Mohammed VI, B.P : 717, Oujda, Maroc
*(boazamost@yahoo.fr; houarimr@yahoo.com; dkhattach@yahoo.fr).

2. Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, BP. 703, Oujda, Maroc.

3. Faculté Polytechnique, Université de Mons, Belgique (Olivier.kaufmann@umons.ac.be).

Résumé. L'aquifère profond d'Aïn Béni Mathar est un important réservoir d'eau au Maroc. Il est formé de calcaires dolomitiques du Jurassique et mis en charge sous un recouvrement généralement argilo-marneux d'âge mio-plio-quadernaire. Vu que c'est la seule ressource en eau d'une région connue par son climat aride et la pénurie de ses eaux de surface, la nappe est de plus en plus sollicitée à des fins multiples. Il en résulte une baisse lente mais continue de son niveau piézométrique, constituant ainsi un problème non encore résolu. Les informations sur cette nappe sont encore fragmentaires et insuffisantes, en raison de sa large étendue et de sa profondeur importante. Dans le but d'améliorer la connaissance de cet aquifère, un modèle géologique 3D a été élaboré dans cette étude. Il a été construit à partir des informations fournies par les cartes géologiques et par 174 sondages mécaniques. Les forages compilés ont été analysés, encodés et intégrés dans le logiciel Groundwater Modeling System (GMS). Pour ce faire, quatre ensembles lithostratigraphiques ont été considérés : le Paléozoïque, le Trias, le Jurassique et le Mio-Plio-Quadernaire. Le modèle élaboré permet de visualiser la géométrie générale du bassin et plus particulièrement celle de l'aquifère jurassique qui s'enfonce progressivement vers le Nord et vers le Nord-Ouest où il dépasse les 800 m, au niveau la zone d'effondrement de l'Oued El Haï.

Mots-clés : Maroc oriental, Aïn Béni Mathar, aquifère profond, modèle géologique 3D.

Abstract. The deep aquifer of Ain Béni Mathar is an important groundwater reservoir in Morocco. It is composed of Jurassic dolomitic limestone and covered by a clay-marly impermeable layer of Mio-Plio-Quaternary age. Since this is the only water source in an area known by its arid climate and surface water shortage, groundwater is increasingly sought for multiple purposes. This is reflected by a slow but continuous decline of the piezometric level. It constitutes a problem that is not yet solved. The knowledge of this aquifer is still fragmentary and very insufficient, due to its wide extent and its important depth. In order to improve this knowledge, a 3D geological model was elaborated in this study. It was elaborated on the basis of geological maps and geological data extracted from 174 boreholes. Compiled wells data were analyzed, encoded and embedded with the software Groundwater Modeling System (GMS). Four litho-stratigraphical groups were considered, namely: Paleozoic, Triassic, Jurassic and Mio-Plio-Quaternary. The model allows visualizing the general architecture of the Jurassic aquifer which gradually sinks toward the North and North-West, where it exceeds 800 m in deep at the collapse area of the Oued El Haï.

Keywords : Eastern Morocco, Ain Béni Mathar basin, deep aquifer, 3D geological model.

Abridged English version

The deep aquifer of Ain Béni Mathar (Eastern Morocco) is an important groundwater reservoir (Stretta 1952, Mediouni 1969, Wardi 1997, Abderbi & Khattach 2011). It is sheltered in northern High Plateaus and extends over some 6500 km². It is situated between the Jerada Mountains to the North, Trarit to the South, the Rekkam to the West, and the Moroccan-Algerian border to the East (Fig. 1). The geology in this basin extends from Paleozoic to Quaternary (Fig. 2). The northern High Plateaus are affected by faults that led to the development of grabens and horsts. This structure evoked by Stretta in 1952, is now confirmed by many boreholes and gravimetric studies (Vanié *et al.* 2005, Abderbi & Khattach 2010) (Fig. 3) and/or vertical electric soundings (ABHM, 2005). Three structural units are highlighted: i) Oued El Haï graben, which corresponds to a low gravity with a magnitude of 13 mGal (Fig. 3); ii) Platform of Ain Béni Mathar-Tabouda, which is a horst

covered by thick (30 m) Mio-Plio-Quaternary deposits; iii) Oued Charef graben, which extends between the platform of Ain Béni Mathar-Tabouda to the North and the Trarirt Mounts to the south.

The aquifer is composed of Jurassic dolomitic limestone and covered by a clay-marly impermeable layer of Mio-Plio-Quaternary age. Groundwater is the only source of water in this area, which is known by its arid climate and surface water shortage. Water is increasingly sought for multiple purposes, this results a slow, but continuous, decrease of the groundwater level (Fig. 4). In order to improve the knowledge of this aquifer, which remains fragmentary and very insufficient, a 3D geological model was built. This model is provided by interpolation between the data points, using the Groundwater Modeling System (GMS) software. This model offers a 3D geometrical representation of surfaces limiting the geological layers. This model was elaborated on the basis of geological maps and precise geological data, extracted from 174 boreholes

(Fig. 6). The database contains depths, and age of different geological strata. Four litho-stratigraphical groups were considered: Paleozoic, Triassic, Jurassic and Mio-Plio-Quaternary. The process of modeling includes seven steps: 1) Inventory of the available boreholes; 2) Analysis of the boreholes data; 3) Selection of the boreholes; 4) Realization of the database and encoding; 5) Integration of the information in the GIS; 6) Construction of the model and 7) Exploitation of the model.

The obtained model, although not integrating faults, allows visualizing the general geometry of the basin (Fig. 7), particularly that of the Jurassic aquifer (Fig. 8). The restored cross sections by the model allowed a depth determination of the Jurassic aquifer in all localities of the

study area.

This model allows to specify the geometry of the various structures in the northern high plateaus:

i) Graben of Oued El Hai : It is the area where the depth of the Jurassic aquifer exceeds 800 m below a Mio-plio-Quaternary thick cover (Figs. 9610);

ii) Graben of Oued Charef : it is extending between the platform of Ain Béni Mathar-Tabouda in the North and Trarit Mountains in the South (Figs. 9611);

iii) Horst of Ain Béni Mathar-Tabouda : The Jurassic aquifer is at the less depth and can be intercepted at thirty meters. It forms an underground bridge between the dome of Mekam and Mounts of Sidi El Abed (Figs. 9612).

INTRODUCTION

Les Hauts Plateaux septentrionaux recèlent d'importantes réserves en eau. Il s'agit de la nappe d'Ain Béni Mathar contenue dans des calcaires dolomitiques du Jurassique et mise en charge sous un recouvrement généralement argilo-marneux d'âge mio-plio-quaternaire (Stretta 1952, Mediouni 1969, Wardi 1997, Abderbi & Khattach 2011). Elle est limitée au nord par les horsts de Jerada, à l'ouest par les deux dômes de Mekam et Rekkam, au sud par les rides de Trarit (Fig. 1).

Étant donné que cette nappe est la seule ressource en eau dans une région connue par son climat aride, elle est de plus en plus sollicitée par forages pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation, l'industrie et le pastoralisme. Compte tenu des réserves importantes liées à la grande étendue de la nappe qui est de l'ordre de 6500 km² (Wardi 1997), sa surexploitation n'entraîne qu'une baisse annuelle (quelques centimètres), mais constante de son niveau piézométrique. Ce bilan hydraulique négatif de la nappe qui en découle constitue un problème qui n'est pas encore résolu (PDAIRE 2010).

La gestion de cette nappe nécessite une bonne connaissance de l'aquifère, notamment sa géométrie. La construction d'un modèle géologique 3D à partir de données de terrain et du sous-sol peut être un apport capital pour la compréhension de l'organisation spatiale des structures du sous-sol. Cet article présente un modèle géologique 3D du bassin d'Ain Béni Mathar faisant intégrer l'ensemble des données géologiques fournies par les forages profonds et les cartes géologiques.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les Hauts Plateaux de l'oriental marocain, relèvent de la meseta maroco-oranaise qui constitue le prolongement vers l'Ouest du grand sillon des chotts algéro-tunisiens (Fig. 1). Ils recèlent l'importante nappe captive profonde d'Ain Béni Mathar. De point de vue géologique, cette dernière est contenue dans des calcaires dolomitiques du Jurassique (Lias et Dogger) et mise en charge sous un recouvrement continental formé essentiellement d'argiles et marnes du Mio-Plio-Quaternaire. Il est à signaler que les formations jurassiques formant ledit aquifère sont confirmées par des sondages mécaniques et des prospections géophysiques sous la totalité de l'étendue des Hauts Plateaux.

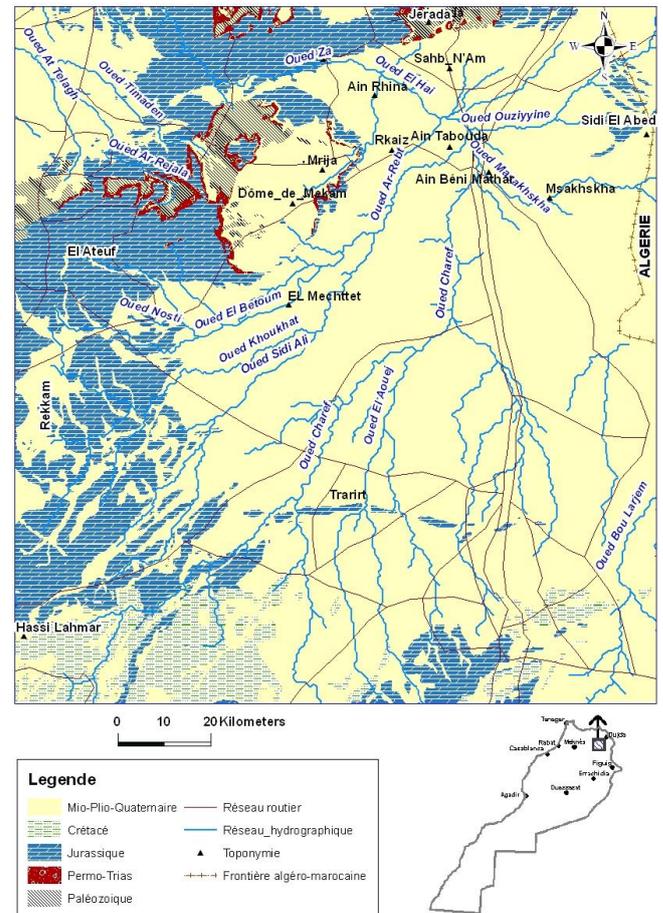


Figure 1. Carte géologique et localisation de la zone d'étude.

Figure 1. Geological map and location of the study area.

Les faciès rencontrés dans l'ordre chronostratigraphique sont : I) le Paléozoïque : formé essentiellement de séries schisteuses, éruptives ou conglomératiques attribuées au Viséen, Namurien, Westphalien et Stephano-Permien. il a été intercepté par des forages de reconnaissance à une profondeur d'environ 440 m (Forage n°: 67/18) au sud de Msakhscha. Les formations paléozoïques affleurent au droit du dôme de Mekam et des monts de Jerada; II) le Trias : Il s'agit de formations imperméables représentées par des marnes, des argiles et des coulées basaltiques. Elles affleurent au niveau de Jerada et du dôme de Mekam; III) le Lias : très perméable, sous l'effet de fractures, de fissurations ou de phénomènes de karstification. Ce sont

essentiellement des dolomies et calcaires dolomitiques, des marnes et des niveaux argileux mis en affleurement en faveur de l'érosion à Mekam, les monts de Sidi El Abed et les horsts occidentaux de Guéfait ; IV) le Toarcien : il est formé essentiellement de marnes rouges avec intercalations de dolomies ou de calcaires marneux sur une faible extension, généralement étanche. Il affleure au droit de l'Oued El Ateuf ; V) l'Aaleno-Bajocien : constitué généralement par des calcaires lithographiques et dolomies à

perméabilité variable ; VI) l'Oligo-Aquitainien : il s'agit de calcaires et de marnes de faible perméabilité ; VII) le Mio-Pliocène : quasiment imperméable, ce niveau stratigraphique est constitué par des marnes, argiles, grès, sables, galets, conglomérats et localement des calcaires lacustres ; VIII) le Quaternaire : plus ou moins perméable en fonction de sa nature lithologique. Il est formé de limons, sables, graviers, argiles, galets et de croûtes calcaires (Fig. 2).

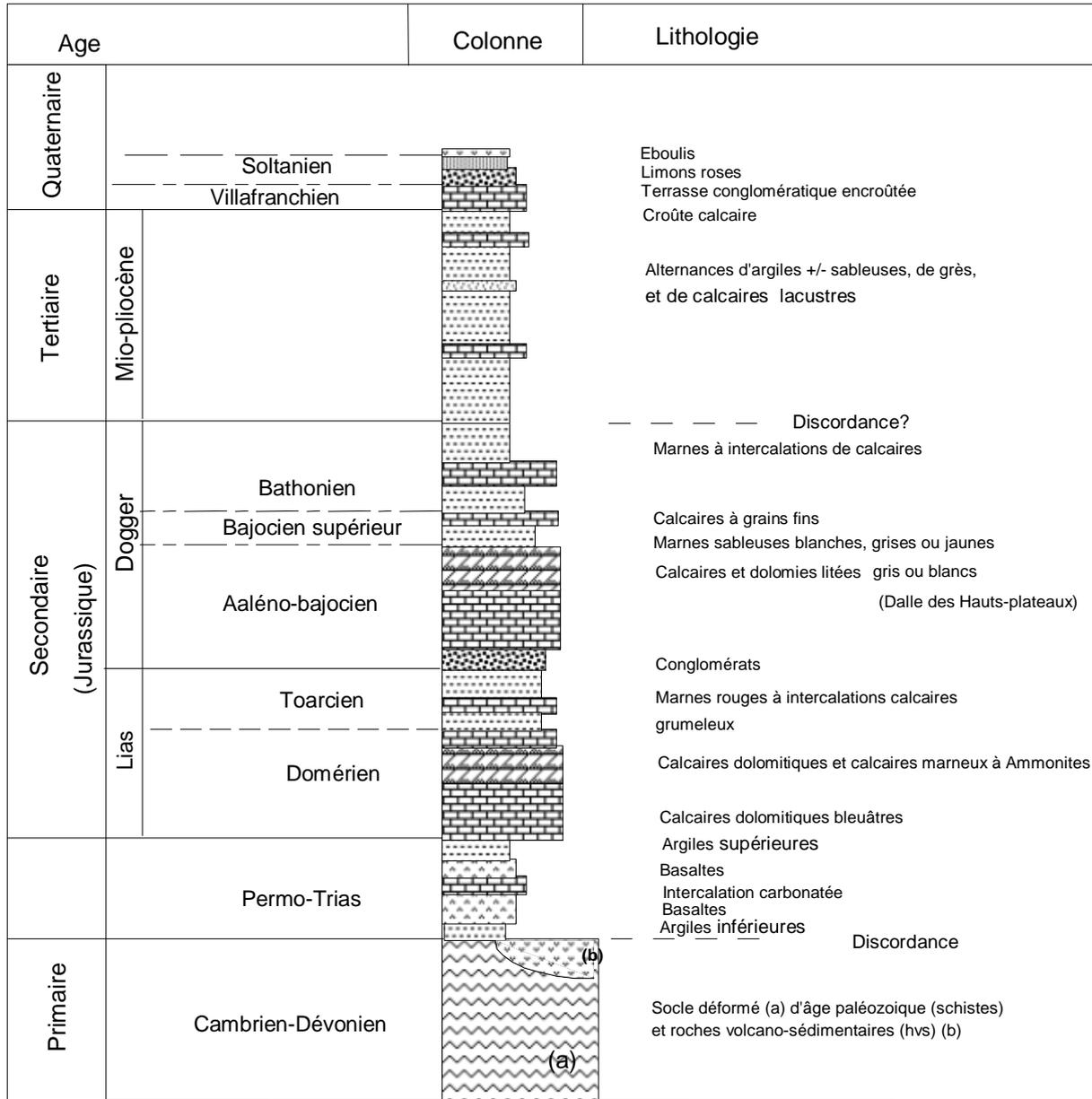


Figure 2. Log stratigraphique des Hauts Plateaux (Medioni 1969).

Figure 2. Stratigraphical log of Hight Plateaus (Medioni 1969).

Par ailleurs, les grands traits structuraux des hauts-plateaux septentrionaux ont été évoqués, il y a bien longtemps, par Stretta en 1952 et actuellement sont confirmés par de nombreux forages de reconnaissance et des études gravimétriques (Vanié *et al.* 2005, Abderbi & Khattach 2010) (Fig. 3) ou par sondages électriques verticaux (ABHM 2005). En effet, trois unités structurales

sont mises en évidence :

i) Effondrement de l'Oued El Hai : c'est le fameux graben des Hauts Plateaux où l'aquifère jurassique atteint sa profondeur maximale, sous une épaisse couverture poste-jurassique. Il correspond à un bas gravimétrique ayant une amplitude de 13 mGal (Fig. 3).

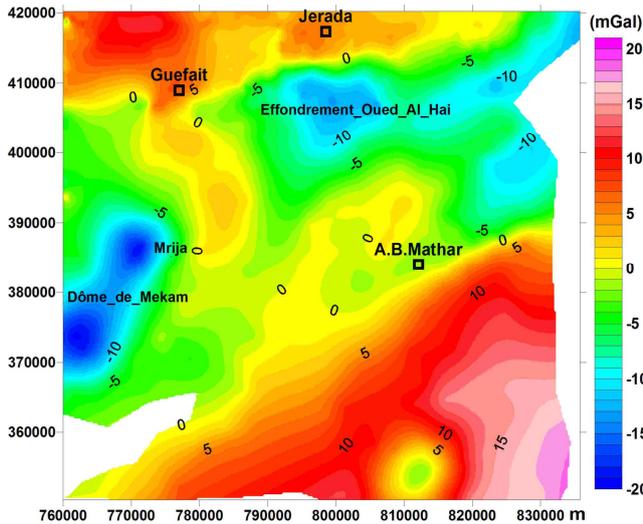


Figure 3. Gravimétrie d'Aïn Bénî Mathar, anomalies résiduelles.

Figure 3. Gravimetry of Aïn Bénî Mathar, residual anomalies.

ii) Plate-forme Bénî Mathar-Tabouda : il s'agit du horst masqué par la couverture post-jurassique au niveau duquel l'aquifère jurassique est moins profond. Il forme un pont souterrain reliant le dôme de Mekam et les monts de Sidi El Abed. Cette structure se manifeste sur la carte gravimétrique par un haut gravimétrique de faible amplitude.

iii) Effondrement de l'Oued Charef : ce graben s'étend entre la plateforme de Bénî Mathar-Tabouda au nord et les chaînons des Trarirt au sud.

CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Dans leur partie marocaine, les Hauts Plateaux septentrionaux abritent l'un des plus importants réservoirs d'eau du patrimoine hydrique national. Il s'agit de l'aquifère d'Aïn Bénî Mathar, couvrant une superficie de plus de 6500 km². En effet, ledit aquifère est confirmé sur toute l'étendue de la zone d'étude par des sondages mécaniques et des prospections géophysiques à des profondeurs variant d'une trentaine de mètres, au droit du centre d'Aïn Bénî Mathar, jusqu'à plus de 800 m au niveau de la zone d'effondrement de l'Oued El Haï, avec une puissance allant de 50 m à plus de 400 m. Ce système aquifère est formé de calcaires dolomitiques (Lias et Dogger) fissurés et différemment karstifiés, et séparés sporadiquement par l'écran marneux du Toarcien. La nappe est mise en charge sous un recouvrement quasiment étanche, constitué de sédiments terrigènes, généralement argilo-marneux du Pontico-Pliocène. Elle est pratiquement captive sur toute son étendue et artésienne au niveau du centre d'Aïn Bénî Mathar sur environ 120 km² (DRE 1987).

Par ailleurs, sous l'effet des soutirages naturels à travers les sources de Ras El Aïn et de Guéfait et soutirages artificiels par forages d'exploitation, la nappe subit un rabattement de quelques centimètres par an. La figure 4 représente la variation du niveau de la nappe enregistrée dans le piézomètre N°46/18 entre 1983 et 2011.

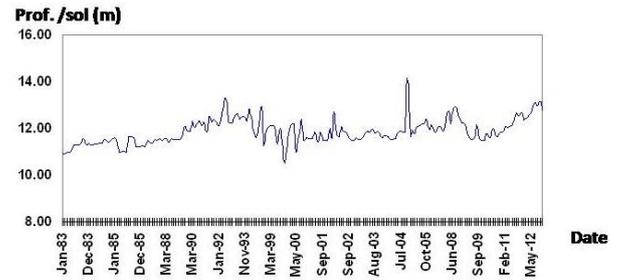


Figure 4. Evolution du niveau de la nappe d'Aïn Bénî Mathar (profondeur en mètre par rapport au sol, mesurée au niveau piézomètre n°: 46/18).

Figure 4. Evolution of the groundwater level in Aïn Bénî Mathar aquifer (depth under the ground in meter, measured at piezometer n°: 46/18).

On remarque un abaissement de la nappe au niveau de ce dernier jusqu'à 1994 puis une stabilisation entre 1994 et 2011. De ce fait et étant donné que la quasi-totalité des forages réalisés dans la zone d'étude sont soit endommagés ou équipés de système de pompage, on a pu esquisser l'allure piézométrique en utilisant les niveaux piézométriques relevés à la fin des travaux d'exécution des forages ayant lieu durant cette période de stabilisation du niveau de la nappe. Ainsi, les relevés piézométriques de 33 forages ont été desservis pour la réalisation de la carte hydrogéologique de la zone d'étude (Fig. 5). Il en ressort de cette dernière, un écoulement général de la nappe profonde du SE vers le NW. Toutefois, de forts gradients hydrauliques sont constatés à proximité des monts de Sidi El Abed et de Mekam, respectivement de l'ordre de 3,4% et 5,7%. Tandis qu'au niveau de la zone centrale Sud, qui correspond à la plateforme d'Aïn Bénî Mathar-Tabouda, le gradient hydraulique de la nappe est très faible. Cela se traduit par une concentration des eaux en provenance des reliefs bordiers vers Guéfait via le bassin intermédiaire de l'Oued El Haï. Alors qu'au droit de la zone centrale Sud, la nappe est pratiquement plate avec une tendance de l'écoulement du Sud vers le Nord.

La nappe profonde est rechargée linéairement et verticalement à travers les oueds et par infiltration des eaux de pluies au niveau des zones d'affleurement, telles que l'Ouest de Mekam, les horsts de Jerada, les monts de Sidi El Abed et vers les chaînons de Trarirt. Le volume des apports est estimé à 40 m³/an et celui restitué à travers les sources et forages d'exploitation est d'environ 50 m³/an, dont 35 m³/an pour l'irrigation et 15 m³/an pour l'alimentation en eau potable (PDAIRE 2010).

Dans les Hauts Plateaux septentrionaux, il n'existe pas de nappes phréatiques importantes, mises à part les quelques lentilles de sables ou de calcaires lacustres enclavés dans les formations continentales post-jurassiques (Medioni 1969). Néanmoins, au sud-ouest et plus précisément au droit de Hassi Lahmar, entre le Pontico-Pliocène et l'aquifère jurassique, des calcaires du Crétacé, intercalés de niveaux argileux, forment un aquifère moins profond.

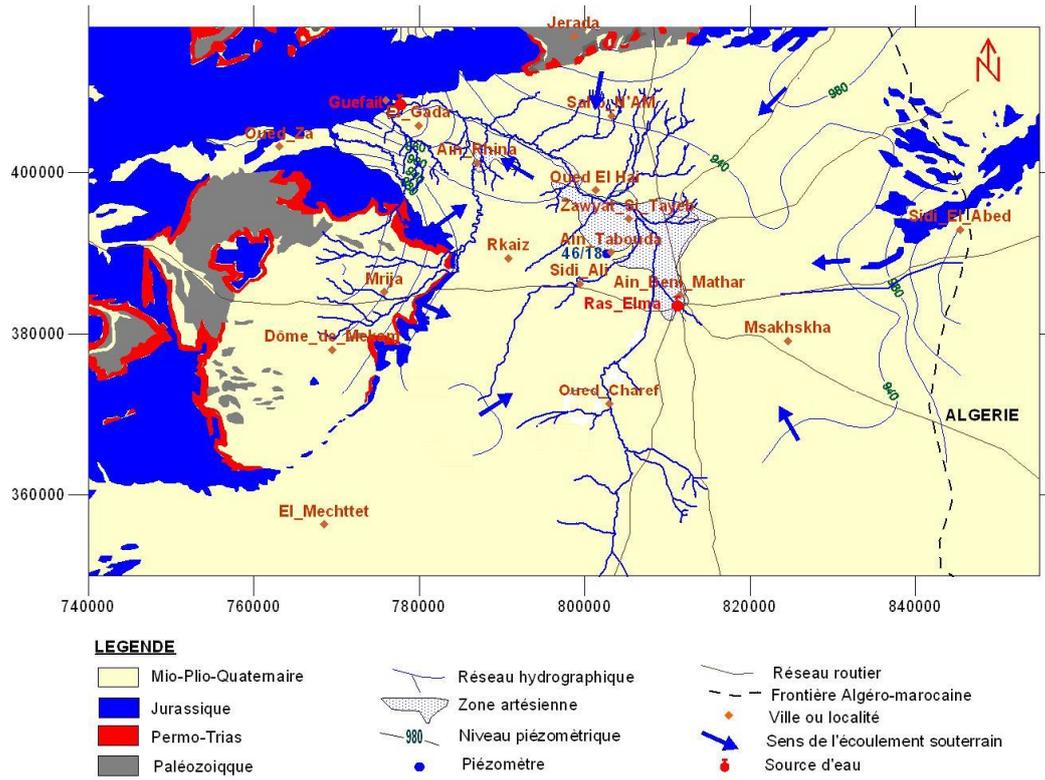


Figure 5. Carte hydrogéologique d'Ain Béni Mathar.
 Figure 5. Hydrogeological map of Ain Beni Mathar.

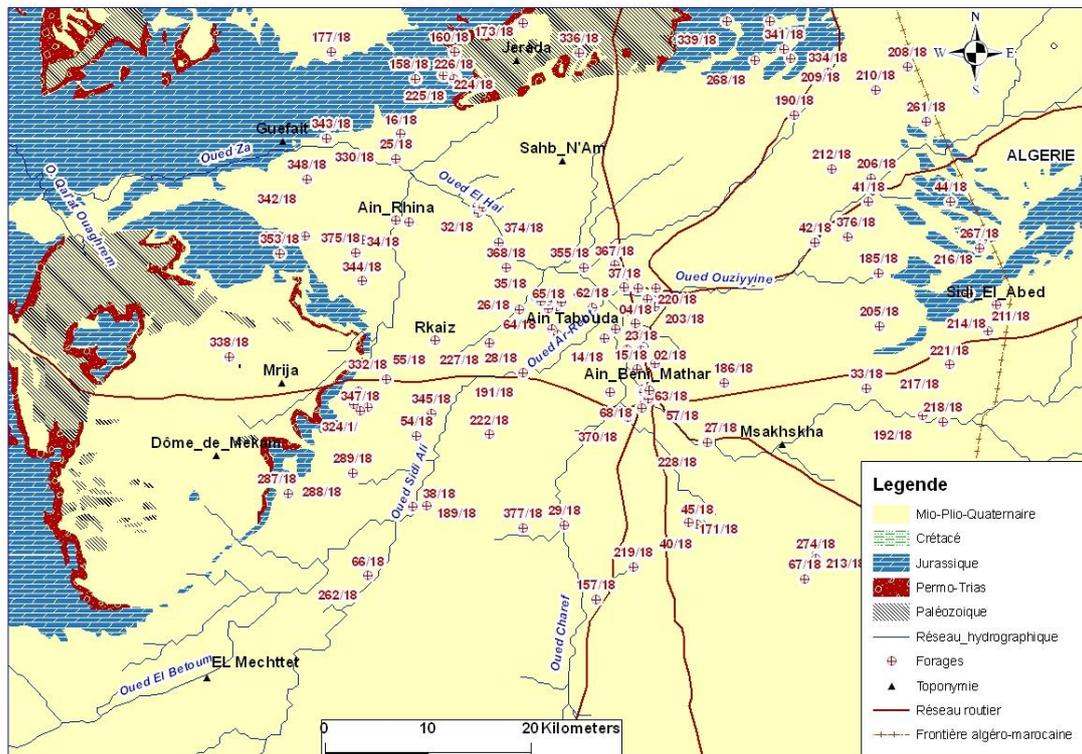


Figure 6. Distribution des forages étudiés.
 Figure 6. Distribution of the studied boreholes.

DONNEES ET METHODOLOGIE

La représentation tridimensionnelle permet une meilleure compréhension de l'organisation spatiale des structures géologiques du sous-sol. Elle sert de base pour un

large éventail d'activités humaines, notamment en matière d'évaluation des ressources naturelles et de l'ingénierie de l'environnement (Dessargues 2000, Kaufmann & Martin 2009, Rumpel *et al.* 2009, Gallerini & De Donatis 2009, Rziki *et al.* 2012).

Comme tout modèle, le modèle structural 3D est au mieux une vue simplifiée de la réalité qui dépend du choix de l'échelle, des hypothèses préalables sur les caractéristiques des objets géologiques, de la quantité et la qualité des informations disponibles et aussi des limites du logiciel utilisé.

En l'occurrence, le modèle géologique 3D du bassin d'Ain Béni Mathar a été réalisé sur la base des données géologiques provenant des cartes géologiques au 1 : 100000°, 1 : 500000° et des sondages de reconnaissance réalisés dans la zone d'étude. En effet, la banque de données utilisées pour construire le modèle contient 174 sondages mécaniques (Fig. 6), exécutés de 1933 à 2010, parmi lesquels, 20 forages ont atteint le Trias. Le sondage N° 32/18 est le plus profond. Il est exécuté à Ain Rhina sur une profondeur totale de 1040 m et ayant intercepté le toit de l'aquifère jurassique à 836 m. La majorité des forages n'ont pas atteint la base du Jurassique ; nous avons alors pris la profondeur maximale du forage considéré pour cette limite.

Les données acquises ont été analysées et sélectionnées, puis intégrées dans le logiciel GMS (Groundwater Modeling System). Ainsi, pour construire le modèle nous avons considéré quatre ensembles lithostratigraphiques : le Paléozoïque, le Trias, le Jurassique et le Mio-Plio-Quaternaire. Le processus de modélisation comprend sept étapes : 1) inventaire des forages disponibles ; 2) analyse des données des forages ; 3) sélection des forages à exploiter ; 4) réalisation d'une base de données et encodage ; 5) intégration des informations dans le GMS ; 6) construction du modèle et 7) exploitation du modèle.

MODELE GEOLOGIQUE 3D

Le modèle tridimensionnel élaboré (Fig. 7), sur la base des données géologiques disponibles, nous a permis de visualiser l'architecture du bassin d'Ain Béni Mathar, de réaliser des coupes géologiques dans toutes les directions et en tout endroit du modèle et de suivre l'évolution en profondeur de l'aquifère jurassique qui s'encapuchonne sous le recouvrement post-jurassique (Fig. 8).

En effet, les grands traits structuraux des Hauts Plateaux septentrionaux ressortis par le modèle, correspondent à des structures en horsts et grabens. Ces structures avaient été déjà évoquées par Stretta (1952) en s'appuyant sur une très faible densité d'informations par rapport à l'étendue de l'aquifère qui dépasse les 6500 km² : une trentaine de sondages mécaniques et les anciennes études géophysiques. Le présent modèle a l'avantage d'être fondé sur de nombreux forages de reconnaissance. Il permet ainsi de préciser la géométrie des différentes structures du bassin

d'Ain Béni Mathar:

- i) le graben de l'Oued El Hai où l'aquifère jurassique atteint sa profondeur maximale d'environ 800 m sous une épaisse couverture post-jurassique (Figs. 9610) ;
- ii) le graben de l'Oued Charef qui s'étend entre la plateforme de Ain Béni Mathar-Tabouda au nord et les chaînons des Trarirt au sud (Figs. 9611);
- iii) le horst d'Ain Béni Mathar-Tabouda correspondant au haut fond, au droit duquel l'aquifère jurassique est moins profond, pouvant être intercepté à partir d'une trentaine de mètres de profondeur. Il forme un pont souterrain reliant le dôme de Mekam et les monts de Sidi El Abed (Figs. 9612).

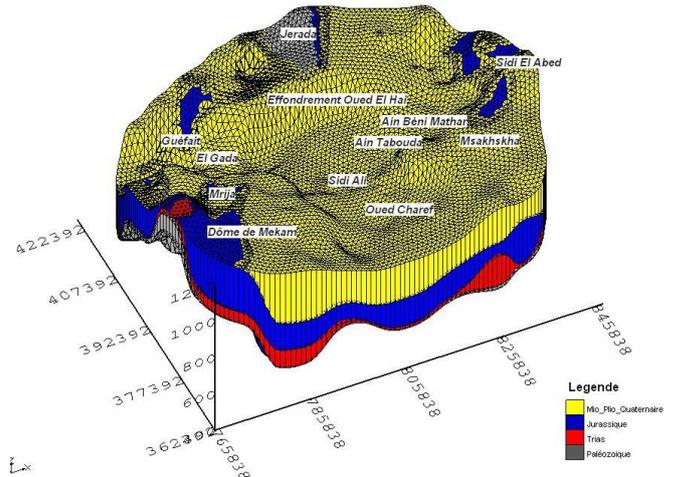


Figure 7. Modèle géologique 3D du bassin d'Ain Béni Mathar.
Figure 7. 3D Geological model of the Ain Béni Mathar basin.

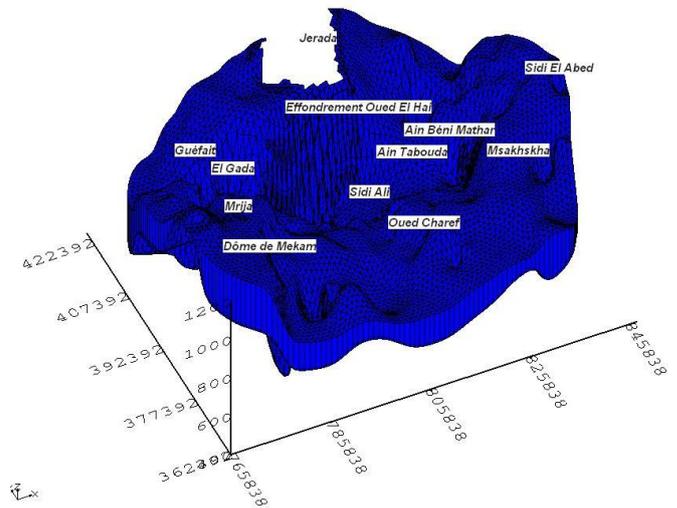


Figure 8. Structure du Jurassique.
Figure 8. The Jurassic structure.

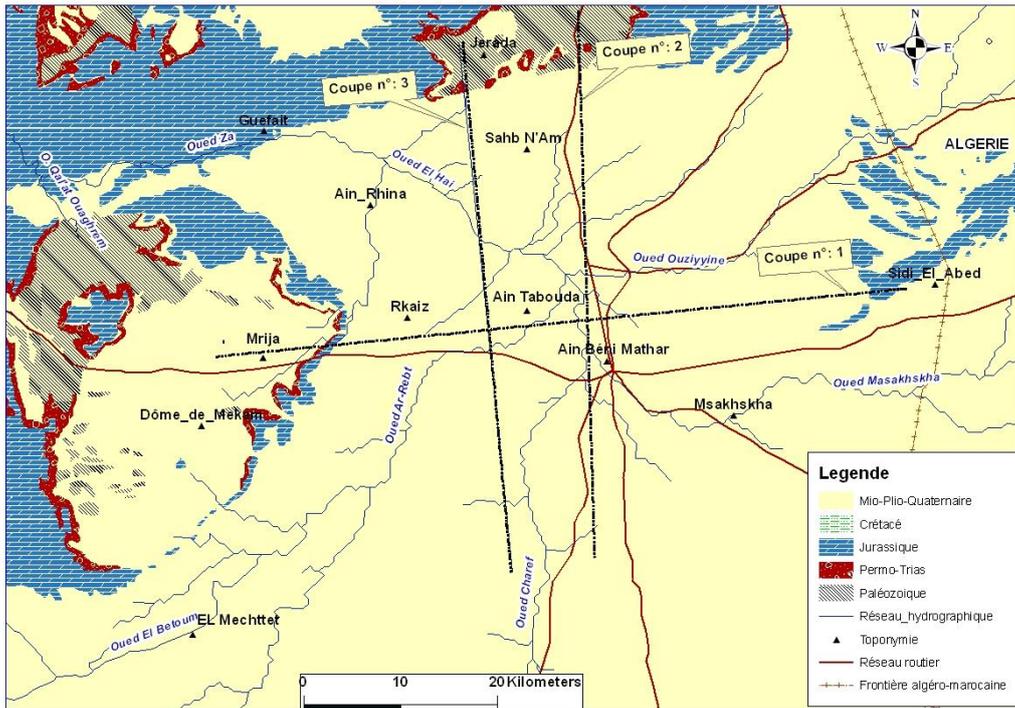


Figure 9. Localisation des coupes géologiques.
 Figure 9. Location of geological sections.

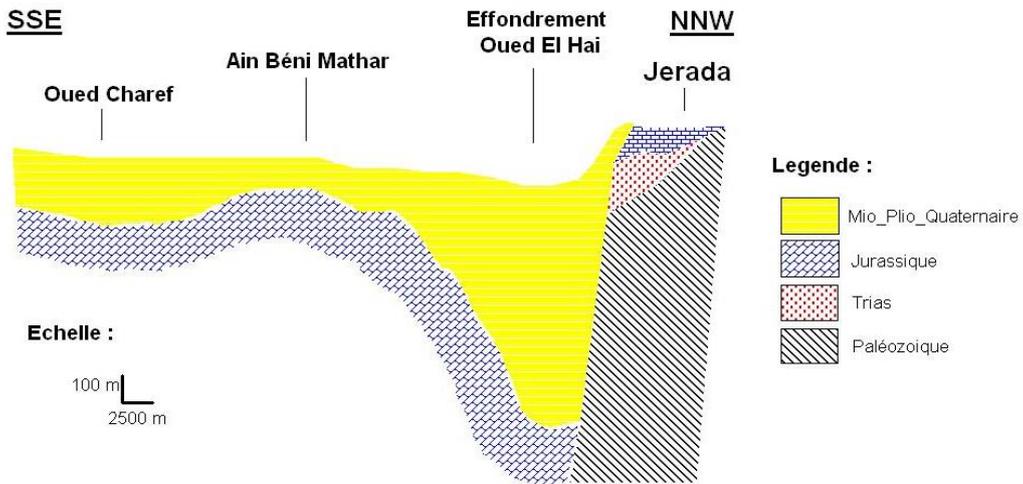


Figure 10. Coupe n° 1 : Grabens de l'Oued El Hai et de l'Oued Charef.
 Figure 10. Section n° 1: The Oued El Hai and Oued Charef grabens.

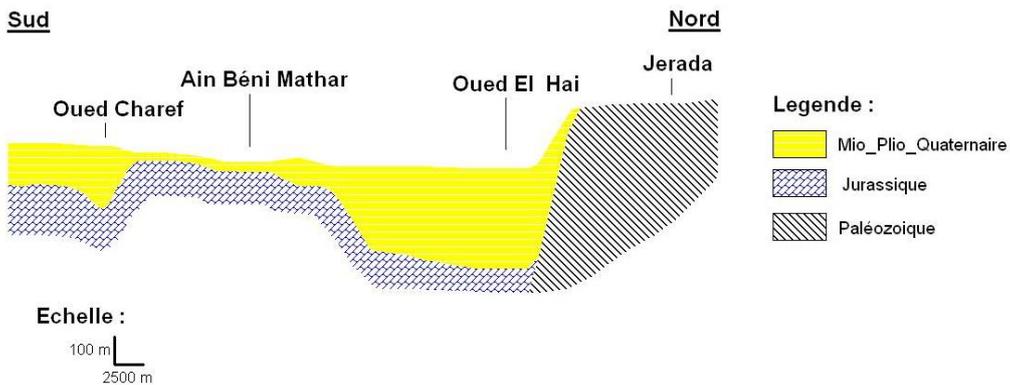


Figure 11. Coupe n° 2 : Horst de Ain Béni Mathar-Tabouda.
 Figure 11. Section n° 2 : The Ain Béni Mathar-Tabouda horst.

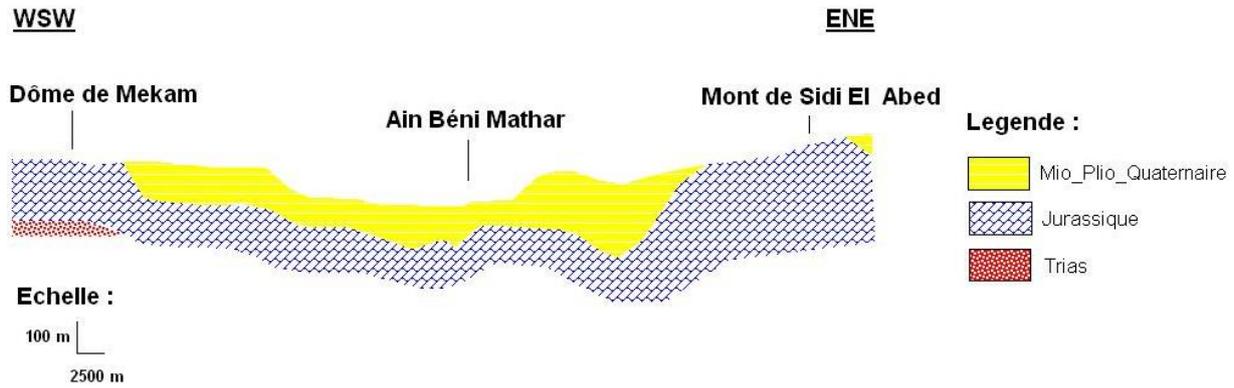


Figure 12. Coupe n° 3 : Horst d'Ain Béni Mathar.

Figure 12. Section n° 3 : The Ain Béni Mathar Horst

CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent d'améliorer les connaissances sur la structure du bassin d'Ain Béni Mathar. Le modèle géologique 3D du bassin est élaboré sur la base des données fournies par 174 sondages mécaniques et les cartes géologiques. Bien que le modèle n'intègre pas les failles, il permet, néanmoins, de visualiser l'architecture générale du bassin.

La structure esquissée par Sretta (1952), sur la base des études géophysiques sommaires et d'une trentaine de forages de reconnaissance ayant une très faible densité d'informations par rapport à la superficie (plus de 6500 km²) couverte par la nappe profonde, est actuellement précisée par de nombreux sondages mécaniques et études géophysiques réalisés dans les Hauts Plateaux septentrionaux de l'oriental marocain. Ainsi, le modèle géologique 3D élaboré a mis en évidence la structure des Hauts Plateaux septentrionaux qui se manifeste en touches de piano (horsts et grabens), contrôlés par des jeux de failles normales dont certaines ont été mises en évidence par les données gravimétriques et aéromagnétiques (Abderbi & Khattach 2010).

Le modèle nous a permis d'approcher la profondeur de l'aquifère profond d'Ain Béni Mathar en tout endroit de la zone d'étude et de suivre son évolution en profondeur sous le recouvrement post-jurassique. En effet, la profondeur du toit du Jurassique varie entre environ une trentaine de mètres à proximité du centre d'Ain Béni Mathar, jusqu'à plus de 800 m au niveau de la zone d'effondrement de l'Oued El Haï.

D'une façon générale, l'horizon des calcaires dolomitiques formant l'aquifère profond d'Ain Béni Mathar présente un enfouissement tendanciel vers le Nord, le Nord-Ouest et le Sud où il affleure au niveau des chaînons de Trarirt. De ce fait, la présente étude nous a permis d'élaborer un modèle conceptuel très utile aussi bien en amont, dans la réinterprétation des données géophysiques existantes, qu'à l'aval pour l'établissement d'un modèle hydrogéologique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya pour avoir fourni les données sur les forages étudiés. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la coopération Maroc-belge (UMP/CUD programme PIII, projet cartographie des aquifères). Les auteurs remercient Dr. J. Carneiro et Dr. I. Kacimi qui ont évalué le manuscrit.

REFERENCES

- Abderbi J. & Khattach D. 2010. Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure des Hauts Plateaux (Maroc oriental). *Bull. Inst. Sc., Rabat, section Sc. Terre*, 32, 19630.
- ABHM. 2005. *Etude géophysique par sondages électriques dans les Hauts Plateaux* ; Rapport inédit.
- Dessargues A. 2000. *Modélisation des réservoirs souterrains*. Rapport inédit, Univ. Liège, 234 p.
- Division des Ressources en Eau de la Direction des Aménagements Hydrauliques, du Ministère de l'Énergie et des Mines, de l'Eau et de l'Environnement - Maroc. 1987. *Etat de connaissance et perspective de gestion de la nappe d'Ain Béni Mathar*. Rapport inédit.
- Gallerini G & De Donatis M. 2009. 3D modeling using geognostic data: The case of the low valley of Foglia river (Italy). *Computer and Geoscience*, 35, 1, 1466164.
- Kaufmann O. & Martin T. 2009. 3D geological modeling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines (vol 34, pg 278, 2008). *Computers and Geosciences*, 35, 1, 70682.
- Medioni R. 1969. *Projet de recherche des réservoirs aquifères profonds du Maroc oriental. Etude sur la nappe captive d'Ain Béni Mathar. Mise au point stratigraphique et structural sur les Hauts Plateaux septentrionaux. Programme des travaux à réaliser 1969-1970*. Rapport inédit, Service de Géologie, Maroc.
- PDAIRE 2010. *Etude d'actualisation du plan Directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique de la Moulouya, Maroc*. Rapport inédit.
- Rumpel H.M., Binot F., Gabriel G. *et al.* 2009. The benefit of geophysical data for hydrogeological 3D modelling - an example using the Cuxhaven buried valley. *Zeitschrift Der Deut. Gesellschaft Fur Geowissenschaften*, 160, 3, 2596269.

- Rziki S., Alansari A., Mouguina E.M., Simard J., Zouhair M. & Maacha L. 2012. Apport du modèle géologique et géophysique 3D dans le développement du gisement polymétallique de Draa Sfar (Massif hercynien des Jebilet centrales, Maroc). *Estudios Geológicos*, 68, 1, 29640.
- Stretta E. 1952. Etude hydrogéologique du bassin de l'Oued El Haï (Hauts Plateaux du Maroc oriental). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 102, 225 p.
- Vanié L.T.A., Khattach D. & Houari M.R. 2005. Apport des filtrages des anomalies gravimétriques à l'étude des structures profondes du Maroc oriental. *Bull. Inst. Sc., section Sc. Terre*, 27, 29640.
- Wardi A. 1997. *Un riche potentiel d'eau souterraine à Jerada. Modèle et carte hydrogéologique d'Aïn Béni Mathar. Régime permanent et transitoire. Hauts Plateaux.* Rapport inédit, Direction Générale de l'Hydraulique, Rabat, 179 p.

Manuscrit reçu le 30/04/2013
Version révisée acceptée le 30/12/2013
Version finale reçue le 30/04/2014
Mise en ligne le 11/06/2014