

On: 19 December 2014, At: 01:24

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Hydrological Sciences Journal

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/thsj20>

Géométrie de l'aquifère du Haouz oriental et Tassaout amont, Maroc occidental: approche géophysique et hydrogéologique

Samia Rochdane^a, Abdennabi El Mandour^a, Mohammed Jaffal^b, Mahjoub Himi^c, Albert Casas^d, Mostafa Amrhar^a & Morad Karroum^a

^a Laboratoire GEOHYD, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

^b Equipe de Recherche « Génie Civil et Géoingénierie », Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc

^c Ecole Nationale des Sciences Appliqués, Université Mohammed Premier, Al Hoceima, Maroc

^d Faculté de Géologie, Université de Barcelone Marti et Franques, Barcelone, Espagne

Published online: 16 Dec 2014.



[Click for updates](#)

To cite this article: Samia Rochdane, Abdennabi El Mandour, Mohammed Jaffal, Mahjoub Himi, Albert Casas, Mostafa Amrhar & Morad Karroum (2014): Géométrie de l'aquifère du Haouz oriental et Tassaout amont, Maroc occidental: approche géophysique et hydrogéologique, Hydrological Sciences Journal, DOI: [10.1080/02626667.2014.979174](https://doi.org/10.1080/02626667.2014.979174)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.979174>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Géométrie de l'aquifère du Haouz oriental et Tassaout amont, Maroc occidental: approche géophysique et hydrogéologique

Samia Rochdane¹, Abdennabi El Mandour¹, Mohammed Jaffal², Mahjoub Himi³, Albert Casas⁴, Mostafa Amrhar¹ et Morad Karroum¹

¹Laboratoire GEOHYD, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc
a.elmandour@uca.ma

²Equipe de Recherche « Génie Civil et Géoingénierie », Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc

³Ecole Nationale des Sciences Appliqués, Université Mohammed Premier, Al Hoceima, Maroc

⁴Faculté de Géologie, Université de Barcelone Marti et Franques, Barcelone, Espagne

Reçu le 7 octobre 2012; accepté le 17 décembre 2013

Résumé Cette étude vise à améliorer la connaissance de la géométrie et de l'hydrogéologie de l'aquifère du Haouz Oriental et du domaine de la Tassaout Amont en se basant sur l'analyse et l'interprétation des données de forages, de gravimétrie, de sismique réflexion et de piézométrie. L'examen de la carte gravimétrique de l'anomalie de Bouguer révèle l'existence d'un gradient régional souligné par des valeurs croissantes du Sud-Est au Nord-Ouest. Ce gradient a été déterminé puis soustrait des données initiales, ce qui a permis d'obtenir une carte résiduelle sur laquelle les anomalies sont plus clairement mises en évidence. Ces anomalies reflètent en général les zones d'affleurement du socle et les variations d'épaisseur de la couverture sédimentaire à l'échelle de la zone d'étude. Le profil de la sismique réflexion et le traitement des données de forages profonds confirment les résultats de la gravimétrie et montrent que la région est formée par un horst qui correspond aux affleurements du socle des Jebilets au nord du bassin du Haouz et une zone subsidente où la couverture est très développée au Sud de la plaine du Haouz. A ce niveau, l'épaisseur importante de la couverture favorise l'accumulation des eaux et assure l'alimentation du réservoir. La remontée du socle au Nord de la plaine impose une ligne de partage des eaux souterraines avec deux sens d'écoulement.

Mots clés géométrie ; hydrogeology ; gravimétrie ; sismique reflexion ; bassin du Haouz ; Maroc

Geometry of the eastern Haouz and Tassaout aquifers, Western Morocco: geophysical and hydrogeological approach

Abstract The aim of the present study is to improve the knowledge of the geometry and hydrogeology of the eastern Haouz aquifer and part of the Upper Tassaout aquifer, using the analysis and interpretation of boreholes, gravimetric analysis, seismic reflection and piezometric data. The examination of the gravity data shows that the Bouguer anomaly map is affected by a regional gradient increasing from the southeast to northwest. This gradient was determined and subtracted from the original data, to provide a residual gravity map which shows clearly highlighted anomalies. These anomalies generally reflect outcrop areas of the basement and the variation in thickness of the sedimentary cover across the study area. The seismic reflection profile confirms the gravity results, and shows that the region is formed by a horst which corresponds to the exposed bedrock of Jebilets in the north of Haouz basin, and a subsidence area where coverage is widespread in the south of the plain of Haouz. In this area, the large thickness of the cover allows the accumulation of water and provides the recharge of the groundwater reservoir. The rise of the basement in the north of the Haouz basin imposes a dividing line of two groundwater flow direction.

Key words geometry; hydrogeology; gravimetry; seismic reflection; Haouz basin; Morocco

INTRODUCTION

Le Haouz oriental et le domaine de la Tassaout amont sont situés à 60 km à l'Est de la ville de Marrakech

dans la partie méridionale de la meseta marocaine occidentale. Le secteur d'étude est allongé en direction Est-Ouest entre la chaîne du Haut-Atlas au Sud, le massif hercynien des Jebilets au Nord, l'Oued Zat à l'Ouest et l'Oued Lakhdar à l'Est. Il s'étend sur une

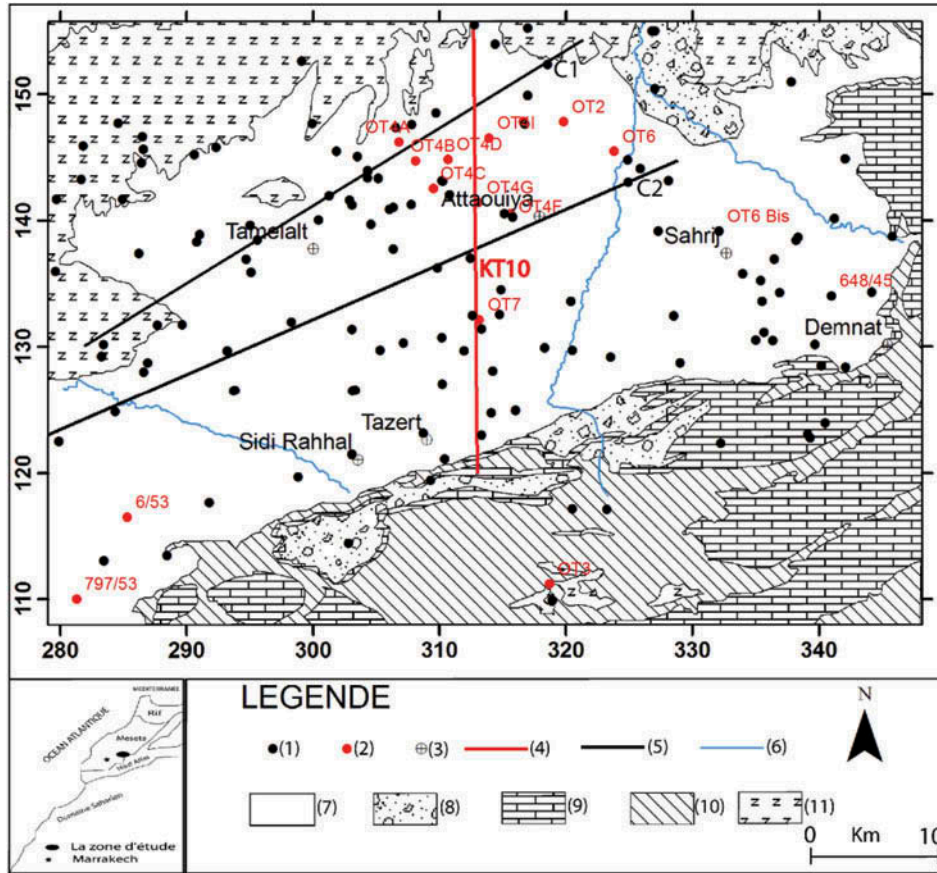


Fig. 1 Situation générale et géologie de la zone d'étude (D'après la carte géologique du Maroc 1/50 000). 1. Forage, 2. Forage de calage du profil sismique de la Fig. 6; 3. Village, 4. Profil sismique, 5. Localisation des Coupes géologiques de la Fig. 5, 6. Oued, 7. Quaternaire: Alluvions, limons et dépôts encroûtés, 8. Mio-Pliocène: Conglomérat, calcaire et marne, 9. Jurassique et Crétacé: Calcaire, marne et grès, 10. Trias: Dolérite, argile et conglomérat avec dépôt d'évaporites, 11. Primaire: Schistes, grès et quartzite.

superficie de 2800 km² (Fig. 1) avec une altitude qui diminue progressivement de 900 m au Sud à 300 m au Nord (Fig. 2).

La plaine du Haouz est marquée par un climat continental de type semi-aride, caractérisé par une pluviométrie moyenne de l'ordre de 345 mm/an, une forte évaporation et des températures moyennes élevées pouvant atteindre 39°C avec des écarts mensuel et journalier assez importants. La région est drainée par l'oued Tassaout, l'oued Ghdad et l'oued Lakhdar alimentés par les eaux de ruissellement et des sources au niveau du Haut Atlas.

Le bassin Haouz de Marrakech est un synclinal dans lequel se sont accumulés d'importantes formations détritiques, résultant du démantèlement de la chaîne du Haut-Atlas et des collines des Jebilet (Ferrandini et Le Marrec 1982). Ces formations reposent en discordance sur un substratum constitué d'un socle hercynien qui affleure au niveau du massif paléozoïque des Jebilet. La structure de ce massif

ancien est relativement bien connue grâce aux nombreuses études qui y ont été menées (Felenc *et al.* 1985, Boummane 1987, Bamoumen 1988, Leblanc 1993, Hibti 2001, El Harti *et al.* 2004); pour le Haouz, des synthèses de l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques existantes ont été réalisées par Sinan (2000a), Sinan *et al.* (2000b) et El Goumi *et al.* (2010).

La présente étude concerne la partie orientale du bassin du Haouz et le domaine de la Tassaout amont où ce genre d'étude demeure très limité, en raison notamment, du manque d'affleurements. Une reconnaissance de la structure de ce bassin est proposée en se basant sur l'analyse et l'interprétation des données gravimétriques, sismiques, hydrogéologiques et de forages profonds.

La première esquisse hydrogéologique a été réalisée par Ambroggi et Thuille (1952). D'autres travaux, basés essentiellement sur des investigations de terrain, sont apparus et par la suite ont fait l'objet d'une

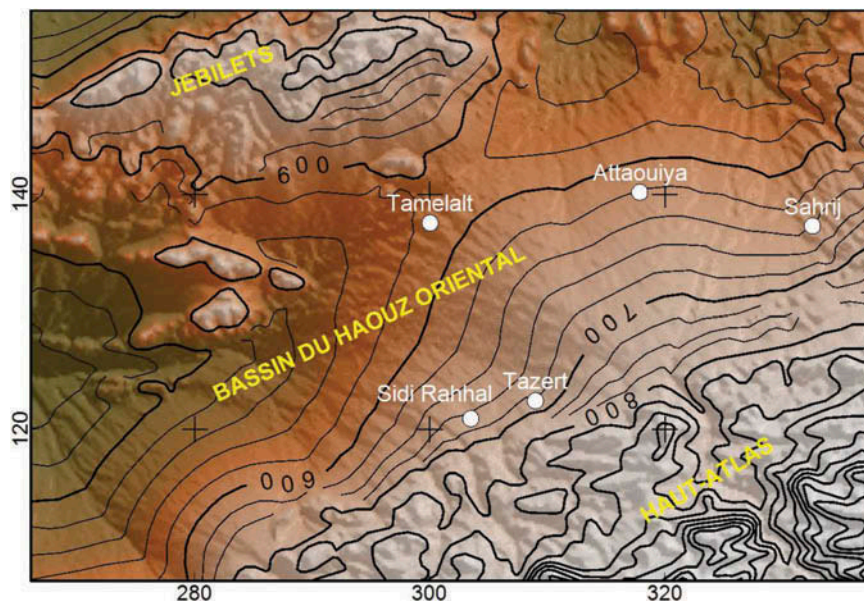


Fig. 2 Représentation de la topographie de la zone d'étude.

monographie plus complète de la plaine du Haouz (Thuille 1957, Cochet 1962, Sinan 1986, Lyakhloufi 2001, Abourida 2007). Sur la base des données de forages profonds et l'interprétation des données de sondages électriques réalisés et menés successivement en 1963, en 1980 et en 1982, Moukhchane (1983) a montré que dans la partie orientale du Haouz la nappe profonde du Lias est très localisée entre le haut atlas et le Sud du village de Tamelalt.

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

L'histoire géologique du bassin du Haouz est marquée par la succession de plusieurs événements, débutant au mésozoïque par l'arasement d'un socle paléozoïque fraîchement structuré par l'orogénèse hercynienne. Ensuite, les jeux de failles et de flexures liées à des mouvements tectoniques tertiaires ont conduit à la mise en place d'une importante fosse entre le Haut-Atlas et les Jebilets. Celle-ci a constitué une aire d'accumulation de sédiments récents issus de l'érosion de la chaîne de l'Atlas lors de sa surrection à l'Oligo-Miocène et au Pliocène. Ces sédiments sont principalement constitués d'alluvions qui se présentent sous forme de dépôts détritiques polygéniques de type continental ou torrentiel, ayant noyé les principaux traits structuraux d'un paléorelief ancien. D'après les informations fournies par les forages profonds et par les zones d'affleurements limitrophes du bassin du Haouz, la série stratigraphique se montre assez complète, elle est

notamment marquée par l'existence d'importants dépôts stéphano-triasiques à la base et néogènes au sommet. Le socle hercynien qui en constitue le substratum, affleure au Nord dans le massif des Jebilets (El Goumi *et al.* 2010).

L'analyse des données de 120 forages et puits profonds mises à notre disposition par l'agence du bassin hydraulique de Marrakech et des données des puits examinés au cours de cinq missions de reconnaissance géologique de la région, nous a permis de réaliser deux coupes géologiques (C1 et C2) à travers la zone d'étude (Figs 1 et 3). Ces coupes illustrent clairement la structure synclinale du bassin du Haouz et montrent que celui-ci est formé par une couverture sédimentaire d'âge secondaire, tertiaire et quaternaire reposant en discordance sur un substratum paléozoïque plissé. Le secondaire est formé au Trias par des dépôts continentaux détritiques (argiles, silts et conglomérats) à lagunaires (argilo-gréseux et salifères à coulées de basaltes doléritiques). Ces formations sont surmontées par des dépôts marins transgressifs (carbonatés) du Jurassique et du Crétacé. Le tertiaire est représenté à la base par des calcaires ou des dolomies en alternance avec des niveaux gréseux d'âge Eocène surmontés au Mio-Pliocène par un faciès continental essentiellement conglomératique à ciment grésomarneux. Dans notre zone d'étude ce faciès devient plus gréseux, ce qui permet de distinguer les dépôts plio-villafranchien de ceux du Mio-Pliocène par la grande taille des éléments. Le quaternaire qui termine la série sédimentaire est représenté par un faciès alluvionnaire variable à grès, limons récents, graviers, galet, conglomérat polygénique et argile.

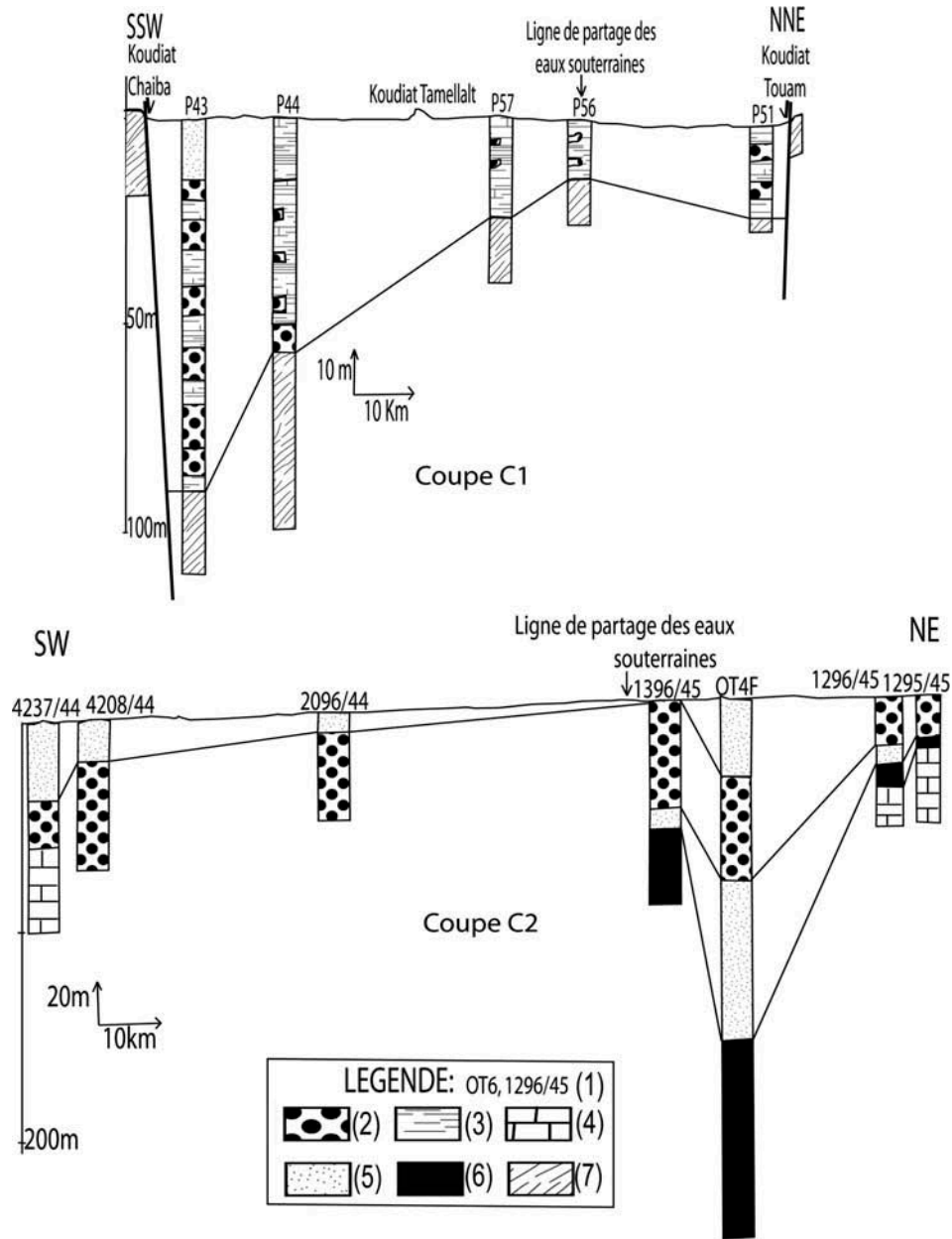


Fig. 3 Les coupes géologiques réalisées à partir des forages. 1. Forage, 2. Conglomérat, 3. Marne gréseuse, 4. Calcaire et marne, 5. Sable, calcaire et marne, 6. Argile et grès rouge, 7. Schiste.

De point de vue hydrogéologique, le bassin du Haouz abrite deux systèmes aquifères d'importances inégales en termes de ressources hydriques souterraines. Le premier concerne les réservoirs profonds du Jurassique, Crétacé et Eocène, caractérisés par une faible productivité, une extension généralement très limitée et terminaison en un biseau de quelques kilomètres au nord de l'Atlas. Parmi les premiers travaux qui s'intéressent à l'aquifère profond du Haouz on trouve les travaux de Moukhchane (1983), qui a étudié la géométrie et l'extension

latérale du réservoir calcaire du Lias au niveau du piémont du Haut Atlas et la partie sud de la plaine du Haouz. Le second réservoir correspond à la série Plio-Quaternaire, issue du démantèlement de la chaîne atlasique. Celle-ci abrite une nappe libre généralisée sur l'ensemble de la plaine, localisée à des profondeurs de 4 à 70 m. Cette nappe est la plus productive de la région, mais également la plus exploitée. La complexité structurale de ces dépôts, verticalement et horizontalement, se manifeste par l'extrême variabilité spatiale du gradient hydraulique

et des paramètres hydrodynamiques (Sinan 1986). Ces formations continentales sont très hétérogènes et de perméabilité très variable. La perméabilité moyenne diminue à mesure que l'on s'enfonce, les faciès devenant de plus en plus argileux. La nappe phréatique circule pratiquement dans la partie supérieure du remplissage continental, c'est-à-dire dans les formations du Pliocène et du Quaternaire remaniées par les oueds atlasiques. La couverture limoneuse de la plaine limite considérablement l'alimentation verticale par les infiltrations d'eau de pluie ou d'eau d'irrigation. L'alimentation de la nappe phréatique provient essentiellement de l'infiltration des eaux de crues des oueds selon leurs cours, principalement sur les cônes de déjection. La nappe circule du Sud vers le Nord-Ouest ou le Nord, c'est-à-dire de l'Atlas vers l'Oued Tensift ou vers les trouées de l'Oued Tessaout et de l'oued Gaïno dans les Jebilet. Les exutoires naturels de la nappe sont constitués par les sous-écoulements des oueds Tensift au Nord et par les résurgences ou sources de la rive gauche de l'oued Tensift à l'Ouest. L'exploitation de la nappe se fait par puits à main, par khetaras et par pompes. Cette nappe libre est caractérisée par des paramètres hydrodynamiques moyens à faible, Sinan *et al.* (2003) ont déterminé des vitesses d'écoulements souterrains de l'ordre de $5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$.

Les données piézométriques de la plaine du Haouz montrent que l'écoulement général des eaux souterraines se fait du Sud vers le Nord avec des gradients hydrauliques forts au Sud de la plaine et plus faibles vers le Nord. Afin d'actualiser ces données, et de mieux comprendre l'hydrodynamisme souterrain, nous avons mené une nouvelle campagne piézométrique selon un réseau de quarante puits qui offre une bonne couverture de la zone d'étude.

DONNEES ET METHODES

Les données gravimétriques utilisées dans la présente étude sont disponibles depuis la fin des années 1960 (Fig. 4). Elles ont été acquises dans le cadre d'un programme de cartographie nationale lancé par la direction de la géologie du ministère marocain de l'énergie et des mines. Les mesures gravimétriques avaient été effectuées au sol par la Compagnie Africaine de Géophysique (CAG) selon des stations espacées de 500 m et disposées le long des routes et des pistes selon un réseau qui offre une bonne couverture de la plaine du Haouz. La réalisation des levés a nécessité la mobilisation de deux gravimètres de type Worden et

trois tachéomètres de type WILD T0. La mise en œuvre du levé gravimétrique a nécessité la mise en place d'un réseau de bases gravimétriques locales par rattachement à huit bases du réseau national. La précision des mesures aux stations, déduite de l'étude des points repris lors de la mise en œuvre du levé, a été estimée à 0,059 mGal. Les données gravimétriques ont été réduites en utilisant la formule classique de l'anomalie Bouguer dans laquelle une série de corrections sont appliquées aux mesures brutes afin d'éliminer les causes non géologiques de variations de la gravité, y compris la correction topographique. Comme on peut le constater, la carte de l'anomalie de Bouguer est affectée par un gradient régional croissant du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Nous avons commencé par estimer puis à soustraire ce gradient afin de calculer une carte de l'anomalie résiduelle (Fig. 5). Cette carte fournit des informations sur la variation de la densité du sous-sol (El Goumi *et al.* 2010), expliquée principalement par des ondulations du toit du socle paléozoïque sous la couverture sédimentaire.

Les données gravimétriques sont généralement riches en renseignements sur les structures géologiques. Elles sont notamment très utiles pour l'identification des failles profondes, et la caractérisation de leur extension et de leurs ramifications (Everaerts et Mansy 2001). Ces failles, qui mettent en contact des blocs de densités différentes, se présentent sur une carte gravimétrique sous forme de zones de gradients qui marquent la transition entre les deux blocs. L'application de la technique d'analyse des contacts fondée sur le calcul du gradient horizontal couplé au prolongement vers le haut permet la localisation de ces discontinuités et la détermination de leur pendage (Archibald *et al.* 1999, Najine *et al.* 2006, Chennouf *et al.* 2007, El Gout *et al.* 2009, Abderbi et Khattach 2010, Aqil *et al.* 2010, Farhat *et al.* 2010).

Les zones de gradient qui correspondent à des points d'inflexion se transforment en maxima après calcul du gradient horizontal. La méthode de Blakely et Simpson (1986) permet la localisation automatique de ces maxima (Fig. 6).

L'application de cette technique à une carte gravimétrique montre que les maximums locaux des gradients horizontaux forment des rides étroites au-dessus des changements abrupts de densité. Pour déterminer le sens du pendage des contacts mis en évidence, on part du principe que plus on prolonge les données gravimétriques vers le haut, plus on met en évidence des structures profondes. La procédure consiste donc à réaliser une série de continuations analytiques vers le haut des données gravimétriques. Ensuite, pour chaque niveau, on calcule le gradient

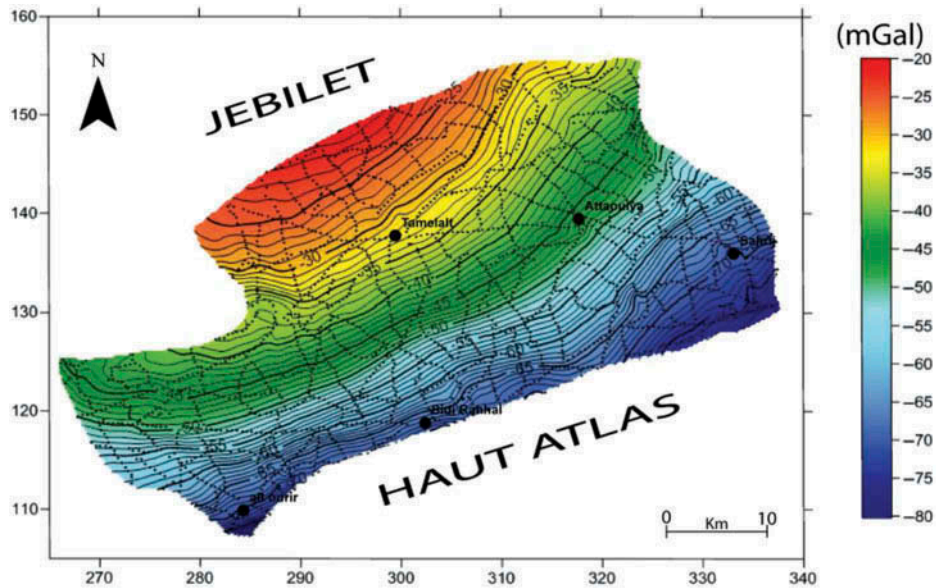


Fig. 4 Carte de l'anomalie de Bouguer du bassin du Haouz oriental et du domaine de la Tassaout (les pointillés représentent le réseau des stations de mesure).

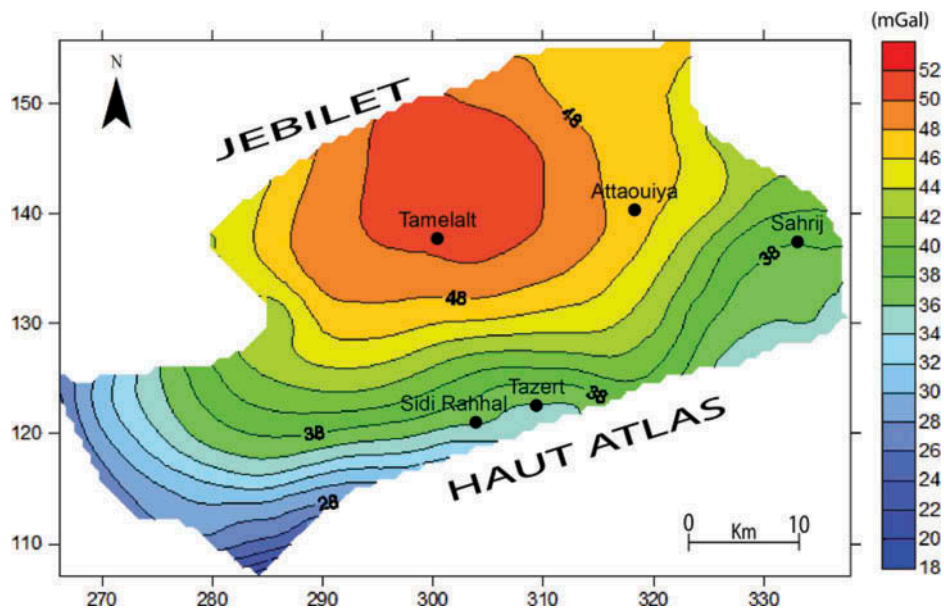


Fig. 5 Carte gravimétrique (anomalies résiduelles) du bassin du Haouz oriental et du domaine de la Tassaout.

horizontal et on détermine ses maximums. Si les structures sont verticales, tous les maximums issus des différents niveaux se superposent. En revanche, le déplacement de ces maximums, lorsque la hauteur des prolongements vers le haut augmente, indique le sens du pendage. Cette démarche est valable pour des structures en deux dimensions correspondant à des contacts linéaires qui séparent des blocs de densités différentes, ce qui est le cas des structures qu'on cherche à mettre en évidence.

En ce qui concerne le volet sismique de l'étude, les données que nous avons utilisées proviennent de deux campagnes sismiques différentes réalisées dans le bassin du Haouz durant les années 1984 et 1998 par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) dans le cadre d'un programme national de prospection pétrolière. Parmi les profils sismiques réalisés, un profil nous intéresse particulièrement car il traverse notre zone d'étude. Il s'agit du profil KT10 orienté en direction Nord–

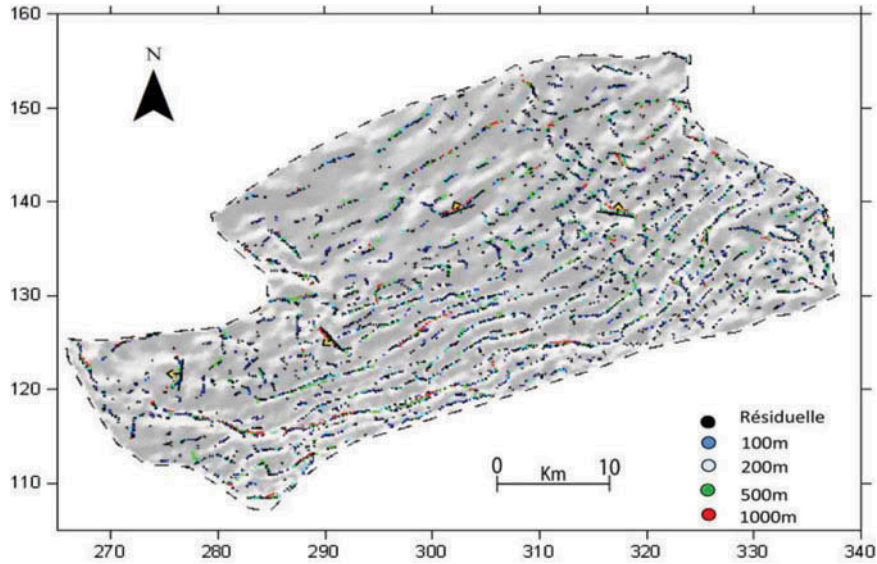


Fig. 6 Contacts gravimétriques obtenus à partir des maximums du gradient horizontal calculé pour la carte d'anomalies résiduelle et pour ses prolongements vers le haut à 100, 200, 500 et 1000 m.

Sud, c'est à dire perpendiculairement à la chaîne haut atlasique (Fig. 7).

Les coupes sismiques sont disponibles à l'échelle 1/20000 sous forme de sections analogiques migrées-temps. Elles ont été enregistrées en couverture multiple d'ordre 60. Ces données ont subi les principaux traitements suivants, effectués par la CGG: démultiplexage au pas de 2 ms, échantillonnage au pas de 4 ms, édition des traces

suivi d'un pré-filtrage dans la gamme de fréquences 12–70 Hz, récupération des amplitudes, collection de points miroirs communs, déconvolution, correction statique des élévations topographiques des géophones au niveau moyen du sol (origine des temps), analyse continue de vitesses, correction dynamique, sommation en couverture 60, correction statique du niveau moyen du sol au niveau de référence (« datum plane »), migration.

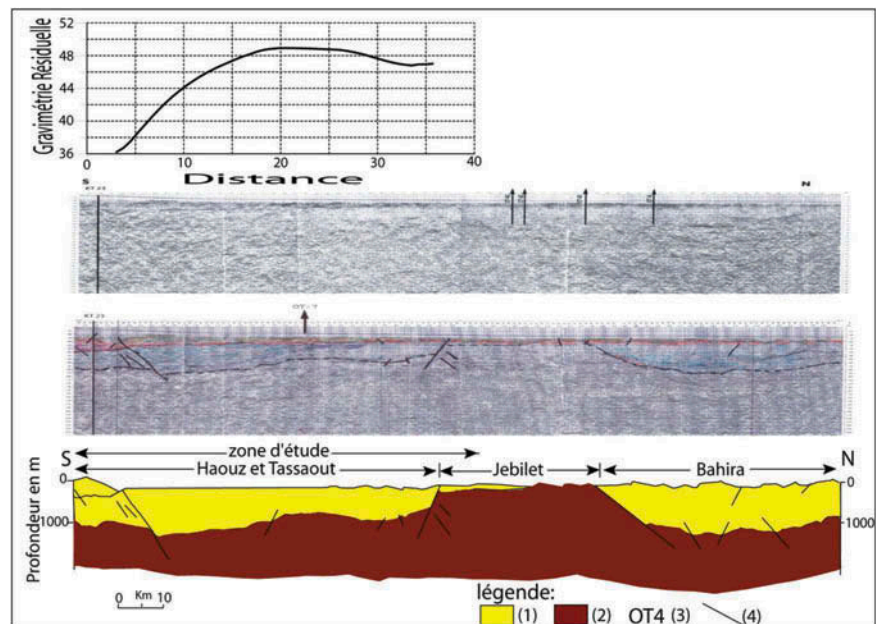


Fig. 7 Profil gravimétrique, profils sismiques et coupe sismique KT10. 1. Couverture, 2. Socle, 3. Forage de calage du profil sismique, 4. Faille.

Le calage des données sismiques a été effectué en se basant sur les données de la géologie de surface d'une part et sur les logs stratigraphiques des forages profonds disponibles indiqués par des points rouges sur la Fig. 1 d'une part: 6/53, 648/45, 797/53, 800/53, 1331/44, OT2, OT4A, OT4B, OT4C, OT4D, OT4F, OT4H, OT4I, OT4G, OT6, OT7, OT3 et OT6 Bis. Les renseignements fournis par ces forages nous ont permis de localiser avec précision les réflecteurs sismiques que nous avons pu suivre latéralement le long d'une même ligne et parfois d'une ligne à l'autre par recoupement.

RESULTATS ET DISCUSSION

L'examen de la carte gravimétrique de l'anomalie de Bouguer de la plaine du Haouz Oriental et du domaine de la Tassaout révèle l'existence d'un gradient régional souligné par des valeurs croissantes de -80 mGal au Sud-Est à -20 mGal au Nord-Ouest (Fig. 4). Ce gradient a été déterminé puis soustrait des données initiales, ce qui a permis d'obtenir une carte résiduelle (Fig. 5) sur laquelle les anomalies sont plus clairement mises en évidence. L'analyse détaillée de cette carte permet de se rendre compte que la signature gravimétrique de la zone d'étude est dominée par une large anomalie positive dont l'amplitude est de l'ordre d'une cinquantaine de milligals. Cette anomalie peut être expliquée par une remontée du socle hercynien qui constitue le substratum du bassin du Haouz. Les coupes géologiques décrites dans la section « contexte géologique et hydrogéologiques » corroborent cette hypothèse et montrent qu'effectivement au niveau de l'anomalie gravimétrique le socle affleure (Fig. 3).

La carte d'anomalies résiduelles montre plusieurs zones de gradients gravimétriques qui peuvent correspondre à des contacts ou des discontinuités (failles, flexures, etc.) Pour étudier ces zones particulièrement intéressantes pour la caractérisation structurale du bassin du Haouz oriental, nous avons appliqué la méthode d'analyse décrite précédemment. Les données gravimétriques ont été prolongées vers le haut de 100, 200, 500 et 1000 m, ensuite le gradient horizontal a été calculé pour chaque niveau de prolongement et ses maximums ont été localisés en utilisant la méthode de Blakely et Simpson (1986). La carte des maximums locaux du gradient horizontal ainsi produite permet de déterminer les différents contacts. Ensuite l'analyse de la migration de ces maximums en fonction de la hauteur du prolongement, permet de préciser le sens des pendages des contacts mis en évidence (Fig. 6). L'examen de cette figure indique que la majorité des contacts

identifiés sont linéaires sur plus de 10 km, ce qui justifie l'utilisation de la méthode d'analyse des pendages précités. Les contacts mis en évidence définissent un champ de linéaments organisés selon deux familles de structures, la première majoritaire de direction NE-SO et la seconde d'orientation NO-SE. La première famille est parallèle à la direction structurale majeure de la chaîne atlasique et aussi à celle de l'allongement général du bassin du Haouz, qui est liée à la mise en place de cette chaîne.

Par ailleurs, afin de mieux visualiser la structure du bassin du Haouz oriental et du domaine de la Tassaout, on propose d'exploiter des données de sismique pétrolière. Le profil KT10 qui traverse notre zone d'étude a fait l'objet d'une analyse fine visant à identifier les différentes entités géologiques imagées. Ce profil s'étend largement au-delà du secteur étudié. Il permet d'avoir une vue globale sur la structuration de cette région depuis le Nord du bassin de la Bahira jusqu'au Haut-Atlas en passant par le massif des Jebilets et par la plaine du Haouz. L'image fournie fait part d'une structure de socle en horst au niveau des Jebilets, séparant deux grabens, le Haouz centrale et la Tassaout au Sud et la Bahira au Nord.

Le profil KT10 montre que dans la partie qui nous intéresse (Haouz oriental et Tassaout), l'épaisseur de la couverture sédimentaire augmente progressivement du Nord vers le Sud et atteint son maximum à l'approche du piedmont atlasique. Le toit du socle paléozoïque présente des ondulations en profondeur sous la couverture sédimentaire. Parmi celles-ci, on doit noter la remontée observée au centre du bassin qui expliquerait l'anomalie gravimétrique de grande longueur d'onde mise en évidence sur le profil gravimétrique de la Fig. 7.

De point de vue hydrogéologique, on peut dire que les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude, incluant l'analyse des données géologique, gravimétrique et sismique, s'accordent sur le fait que la plaine du Haouz oriental et de Tassaout présente une structure synclinale. Le schéma général qui ressort de ces résultats est celui d'un système aquifère asymétrique avec des réservoirs qui deviennent de plus en plus épais du Nord vers le Sud.

La carte piézométrique de la zone d'étude réalisée en Avril 2011 montre que l'alimentation de la nappe se fait à partir de deux zones principales (Fig. 8 et Tableau 1). Du côté Sud, cette alimentation a lieu par abouchement des formations carbonatées du Jurassique du Haut Atlas et des formations plio-quadernaires. Par contre, vers le Nord, la nappe est alimentée à partir des formations paléozoïques qui

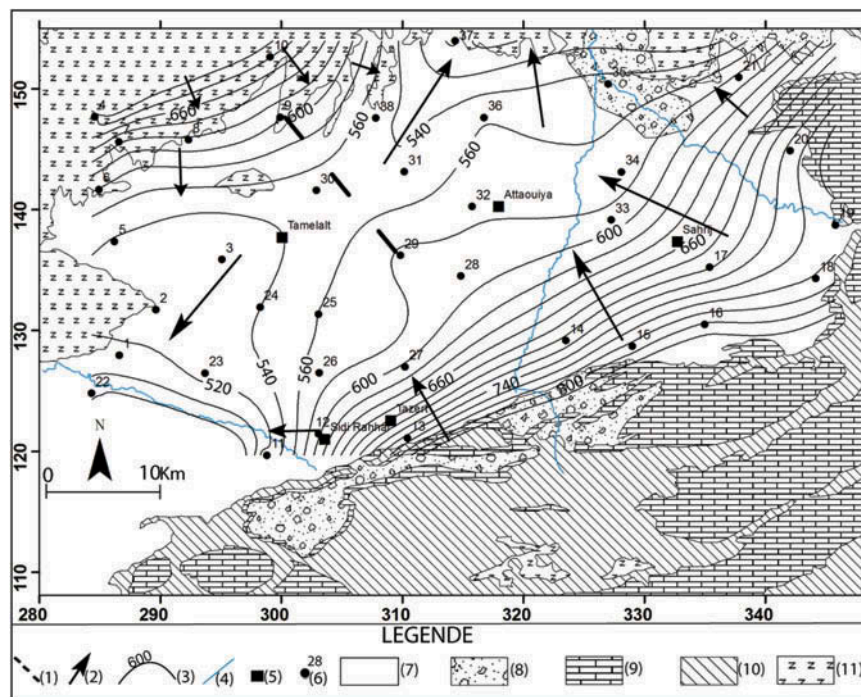


Fig. 8 Carte piézométrique du Haouz oriental et du domaine de la Tassaout amont (Avril 2011). 1. Ligne de partage des eaux souterraines, 2. Axe et sens d'écoulement souterrain, 3. Courbe isopièze, 4. Oued, 5. Village, 6. Point de mesure, 7. Quaternaire: Alluvions, limons et dépôts encroûtés, 8. Mio-Pliocène: Conglomérat, calcaire et marne, 9. Jurassique et Crétacé: Calcaire, marne et grès, 10. Trias: Dolérite, argile et conglomérat avec dépôt d'évaporites, 11. Primaire: Schistes, grès et quartzite.

forment les collines des Jebilets. A l'intérieur de la plaine, l'alimentation est assurée également par l'infiltration des eaux de crues des oueds atlasiques traversant la plaine au niveau des Oueds Lakhdar, Tassaout et Ghdat, et aussi par le retour des eaux d'irrigation au niveau du périmètre de la Tassaout amont.

L'écoulement de la nappe est imposé par une ligne de partage des eaux souterraines orientée NO-SE qui nous donne deux directions principales d'écoulement des eaux souterraines: N-S et NE-SO. Le gradient hydraulique est faible au centre de la carte et devient plus fort au niveau des deux zones d'alimentation de la nappe c'est-à-dire au Nord-Ouest et au Sud de la zone d'étude.

La relation eau de surface/eau souterraine montre que l'alimentation de la nappe se fait le long des oueds Ghdat, Tassaout et Lakhdar. L'exutoire de la nappe se situe sur deux zones: le couloir de Tassoout et le Haouz central.

La superposition des cartes gravimétrique et piézométrique montre clairement que l'hydrodynamisme souterrain est contrôlé par la « topographie » du toit du socle hercynien qui constitue un substratum imperméable. Elle met en évidence la

coïncidence entre la ligne de partage des eaux et la remontée du socle soulignée par l'anomalie gravimétrique (Fig. 9). En effet, on constate que les écoulements divergent à partir de cette ligne, pour s'orienter d'un côté vers Tassaout et de l'autre vers le Haouz central. Cette superposition montre aussi que l'alimentation se fait dans une zone de subsidence où se produit un passage des eaux souterraines du Haut Atlas vers la plaine du côté Sud et des Jebilets vers la même plaine du côté Nord, là où l'alimentation est imposée par la remontée du socle illustrée par la coupe C1 (Fig. 3).

CONCLUSION

L'analyse et l'interprétation des données géologiques et géophysiques a permis de définir la nature géologique et de caractériser la structure du système aquifère du Haouz Oriental et du domaine de la Tassaout. Les réservoirs de ce système constituent une dépression synclinale formée de formations géologiques allant du Jurassique au Quaternaire, reposant sur un substratum argileux et schisteux d'âge paléozoïque et triasique.

Tableau 1 Données piézométriques utilisées dans le traçage de la carte piézométrique.

No.	X	Y	Z	Profondeur eau	Niveau piézométrique
1	286892,369	128052,41	533,15	20	513,15
2	289923,304	131817,218	548	25,4	522,6
3	295385,742	135968,102	566	43	523
4	284869,753	147779,773	665	7,5	657,5
5	286512,613	137463,296	564	27,71	536,29
6	285222,303	141757,776	610	33,68	576,32
7	286870,553	145712,407	643	17,4	625,6
8	292619,511	145869,505	629	11,3	617,7
9	300204,561	147750,396	625	21,6	603,4
10	299358,596	152719,195	696,23	16,36	679,87
11	299106,476	119780,556	646,4	110	536,4
12	303374,711	121551,475	690	95,55	594,45
13	310706,614	121203,427	813,8	59,6	754,2
15	323810,275	129255,904	779,8	70	709,8
16	329295,217	128798,232	837,5	44	793,5
17	335292,101	130602,927	813,54	5,93	807,61
18	335696,668	135334,794	720,45	23,4	697,05
19	344465,154	134404,551	825	60	765
20	346086,421	138830,443	770,24	32,8	737,44
21	342347,354	144971,807	775	46,5	728,5
22	338112,637	151045,064	625	38	587
23	284619,776	124900,770	525	28,4	496,6
24	293999,571	126572,122	567	39,57	527,43
25	298563,749	132028,976	589	49,3	539,7
26	303368,597	131455,409	617,3	57	560,3
27	303424,451	126586,716	636,7	67,32	569,38
28	310514,941	127094,991	683,4	80	603,4
30	315130,529	134601,088	667	70,2	590,8
31	310132,632	136311,606	638	55,9	582,1
32	303191,414	141685,202	586	36	550
33	310450,016	143228,967	589	46,3	542,7
34	316064,531	140354,848	625	45,1	574,9
35	327568,726	139245,873	631,25	40,66	590,59
36	328406,316	143210,22	588	17,35	570,65
37	327298,861	150501,939	550	3	547
38	317045,191	147709,068	571,6	14,3	557,3
39	314675,754	154067,638	550	17,4	532,6
40	308093,705	147674,900	565,1	20,1	545

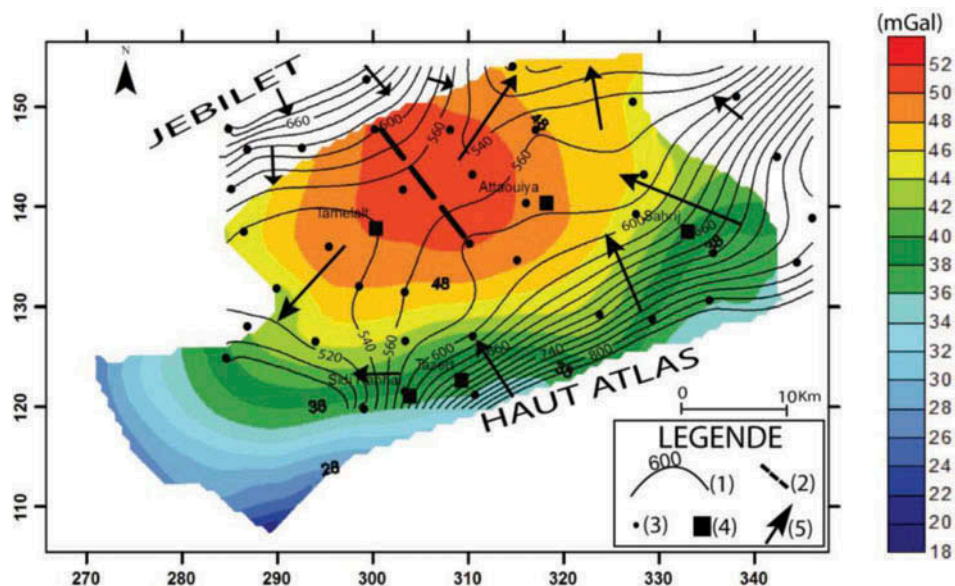


Fig. 9 Carte gravimétrique piézométrique du bassin du Haouz oriental et du domaine de la Tassaout. 1. Courbe isopièze, 2. Ligne de partage des eaux souterraines, 3. Point de mesure, 4. Village, 5. Axe et sens d'écoulement souterrain.

Les résultats de la présente étude montrent que le toit du socle paléozoïque s'approfondit progressivement du Nord vers le Sud donnant ainsi une forme asymétrique à dépression synclinale représentant le système aquifère.

La technique d'analyse des contacts appliquée aux données gravimétrique a permis de mettre en évidence un important réseau de structures qui indique que la zone d'étude a été fortement influencée par la tectonique atlasique. Les limites de cette zone sont marquées par des failles normales qui se présentent sous forme de structures d'effondrement à l'approche du Haut-Atlas vers le Sud et de bordure de graben du côté des Jebilet.

La carte piézométrique et les coupes géologiques C1 et C2 montrent une ligne de partage des eaux souterraines matérialisée par un anticlinal. Cette ligne de partage des eaux de direction NO-SE provoquée par la remontée du socle impose deux directions d'écoulement des eaux de la nappe du Haouz. Un sens d'écoulement des eaux souterraines vers le Nord (zone de Tassaout aval) et un deuxième sens vers l'Ouest (Haouz central). L'alimentation de la nappe se fait au contact de la couverture et du Haut Atlas formé par les calcaires liasiques et des conglomérats du Mio-Pliocène au Sud et au contact des altérites des schistes du Paléozoïque au Nord-Ouest.

Remerciements Cette recherche a été réalisée au sein du Laboratoire GEOHYD de la faculté des Sciences Semlalia de Marrakech avec l'équipe de recherche « Génie Civil et Géoingénierie » de la faculté des sciences et techniques de Marrakech. Nos remerciements iront aux deux évaluateurs anonymes et à l'éditeur, le Professeur Z.W. Kundzewicz et à l'éditeur associé le Dr Mostafa Besbes, qui ont améliorés la présentation du manuscrit.

Financement Nous remercions également l'agence espagnole de coopération internationale (AECID) pour le financement du projet N° AP/040547/11 entre l'équipe du laboratoire GEOHYD de l'université Cadi Ayyad et l'équipe du département de géochimie, pétrologie et prospection géologique de l'université de Barcelone.

REFERENCES

Abderbi, J. et Khattach, D. 2010. Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure des Hauts Plateaux (Maroc oriental). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2010, no 32, p. 19-30. <http://www.israbat.ac.ma/spip.php?action=telecharger&arg=603>

- Abourida, A., 2007. *Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation*. Thèse de doctorat, faculté des Sciences Semlalia-Marrakech. http://www.cesbio.ups-tlse.fr/data_all/theses/Th_Abourida.pdf [Accédé le 15 octobre 2014]
- Ambroggi, R. et Thuille, G., 1952. Haouz de Marrakech. In, Hydrogéologie du Maroc, Notes et mémoires du Service Géologique du Maroc, 97.
- Aqil, H., et al., 2010. Contribution de la gravimétrie à la reconnaissance de l'aquifère profond de la plaine des Angad (Maroc nord-oriental). *Sécheresse*, 21 (4), 252-256. http://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/contribution_de_la_gravimétrie_a_la_reconnaissance_de_l_aquifere_profond_de_la_plaine_des_angad_maroc_nord_oriental_286681/article.phtml?tab=texte
- Archibald, N., Gow, P., et Bochetti, F., 1999. Multiscale edge analysis of potential field data. *Exploration Geophysics*, 30, 38-44, doi:10.1071/EG999038
- Bamoumen, H., 1988. *Les déformations superposées contemporaines de la mise en place des nappes gravitaires des Jebilet Orientales (Maroc)*. Thèse de 3ème cycle, Université de Marrakech.
- Blakely, R.J. et Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of sources bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51 (7), 1494-1498, doi:10.1190/1.1442197
- Boummane, M.H., 1987. *Les déformations hercyniennes superposées dans le Sud de la Méséta marocaine l'exemple des séries paléozoïques du Horst de Guemassa (Haouz de Marrakech)*. Thèse de 3ème cycle. Maroc: Université de Marrakech.
- Chennouf, T., 2005. *Etude géophysique du Maroc Nord Ouest, implications structurales et hydrogéologiques, Doctorat és Scienc*. Oujda Maroc: Université Mohammed premier, 259.
- Chennouf, T., et al., 2007. Principales lignes structurales du Maroc nord-oriental: apport de la gravimétrie. *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 383-395. doi:10.1016/j.crte.2007.03.006
- Cochet, A., 1962. Alimentation en eau de Marrakech, note hydrogéologique en vue de la recherche d'un débit de 40 l/s pour 1962 et 100 l/s pour 1966. Rapport inéd. MTPC/DH/DRE.
- El Goumi, N., et al., 2010. Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin du Haouz (Maroc). *Estudios Geologicos*, 66 (2), 181-191. <http://estudiosgeol.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeol/article/view/808/837>. doi:10.3989/egeol.40051.082
- El Gout, R., Khattach, D., et Houari, M.R., 2009. Etude gravimétrique du flanc nord des Béni Snassen (Maroc nord-oriental): implications structurales et hydrogéologiques. *Bulletin De l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 31, 61-75. <http://www.israbat.ac.ma/spip.php?action=telecharger&arg=444>
- El Harti, A., et al., 2004. Synergie entre la télédétection multispectrale et les données de terrain pour la conception d'un nouveau modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales (Maroc). *Compte Rendus Geoscience*, 336, 1311-1320. doi:10.1016/j.crte.2004.07.003
- Everaerts, M. et Mansy, J.L., 2001. Le filtrage des anomalies gravimétriques, une clé pour la compréhension des structures tectoniques du Boulonnais et de l'Artois (France). *Bulletin de la Société Géologique, France*, 172 (3), 267-274, doi:10.2113/172.3.267
- Farhat, B., et al., 2010. Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure de la plaine de Mornag (nord est de la Tunisie): implications hydrogéologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (8), 1396-1404. doi:10.1080/02626667.2010.530100
- Felenc, J., et al., 1985. Découverte d'un amas sulfuré caché à pyrrhotite et métaux de base à Hajar (Massif des Guemassa, Maroc). *Chronique de Recherche minière*, 478, 61-66.
- Ferrandini, J. et Le Marrec, A., 1982. La couverture jurassique à paléogène du Haut Atlas de Marrakech et allochtone dans la

- « zone des cuvettes » d'Aït Ourir (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 295(II), 813–816.
- Hibti, M., 2001. *Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilets (Méséta sud occidentale Maroc): témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mésétien*. Thèse d'Etat, Maroc: Université de Marrakech.
- Leblanc, M., 1993. Amas sulfuré formé par injection de sills dans des sédiments: exemple de Hajar (Marrakech, Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 316(II), 499–504.
- Lyakhloufi, S., 2001. *Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech*. Thèse de doctorat, Maroc: faculté des Sciences Semlalia-Marrakech.
- Moukhchane, M., 1983. *Contribution à l'étude des réservoirs profonds de la bordure nord de l'Atlas entre Demnat et Imin'tanout (Maroc)*. Thèse de 3ème cycle. France: Besançon.
- Najine, A., et al., 2006. Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin de Tadla (Maroc): implications hydrogéologiques. *Comptes Rendus Géoscience*, 338, 676–682. doi:10.1016/j.crte.2006.04.015
- Sinan, M., 1986. *Paramètres hydrogéologiques et géoélectriques en milieu alluvial fortement hétérogène (exemple de la nappe du Haouz, Maroc)*. Thèse 3ème cycle, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, France.
- Sinan, M., 2000a. *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique: Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc)*. Thèse doctorale, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs: Université Mohammed V.
- Sinan, M., et al., 2000b. Evaluation et gestion des ressources en eau souterraine des aquifères régionaux à l'aide des systèmes d'informations géographiques. *Hydrogéologie*, 4, 89–100.
- Sinan, M., Maslouhi, R., et Razack, M., 2003. Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech. In *2nd FIG Regional Conference* (Marrakech, Morocco, 2–5 December 2003). http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS11/TS11_3_sinan_et_al.pdf
- Thuille, G., 1957. *Nappe phréatique du Haouz, essai de classification hydrogéologique, exploitation sur 10 ans*, Rapport inéd. MTPC/DH/DRE.