

Etude gravimétrique du flanc nord des Béni Snassen (Maroc nord-oriental) : implications structurales et hydrogéologiques

Radia EL GOUT*, Driss KHATTACH & Mohammed-Rachid HOUARI

Université Mohammed I, Faculté des Sciences, Laboratoire des Géosciences Appliquées et Centre de l'Oriental des Sciences et Technologies de l'Eau, B.P. 717, 60000 Oujda, Maroc. radia_elgout@yahoo.fr ; dkhattach@yahoo.fr ; houarimr@yahoo.com

Résumé. Afin d'améliorer la connaissance du contexte structural de l'aquifère profond du flanc nord des Béni Snassen, différentes techniques complémentaires (Le gradient horizontal couplé au prolongement vers le haut, la déconvolution d'Euler, le signal analytique et le signal analytique de haute résolution) ont été appliquées à la carte gravimétrique de la zone d'étude en vue de mettre en évidence les différents linéaments gravimétriques. L'analyse statistique des résultats des filtrages gravimétriques a permis la mise en évidence de quatre familles de fractures. Ces failles, d'orientation moyenne N-S, NE-SW, ENE-WSW à E-W et NW-SE, ont toutes contribué, ensemble ou séparément et ce depuis l'Hercynien jusqu'à l'Alpin, à la structuration de cette zone. Les failles de direction NE-SW à ENE-WSW et NW-SE se sont avérées les plus profondes et peuvent atteindre 3000 m, tandis que les accidents N-S sont superficiels et dont la profondeur ne dépasse pas les 1000 m. Ces résultats ont permis d'une part de confirmer certaines failles déjà reconnues ou supposées par les études structurales en précisant leurs tracés et pendages et d'autre part, de mettre en évidence un grand nombre de nouveaux accidents profonds ou superficiels qui sont restés inconnus jusqu'à nos jours. Dans une autre approche, l'interprétation conjointe des résultats de filtrages gravimétriques et celles issues des méthodes directes (les forages), a permis d'identifier la structure du système aquifère jurassique du flanc nord des Béni Snassen. Il en ressort que le système aquifère est compartimenté par des failles. Suite à cette configuration en bloc de l'aquifère, l'écoulement hydrodynamique de la nappe pourrait être discontinu à cause des importantes pertes de charge entre blocs voisins à la faveur notamment de ces failles conductrices.

Mots clés : Flanc nord des Béni Snassen, aquifère profond, structure, gravimétrie, filtrages gravimétriques, failles.

Gravimetric e northern flank of the Beni Snassen (northeastern Morocco): structural and hydro-geological implications.

Abridged english version. The purpose of this study, based on the interpretation of available gravimetric data, was to improve the knowledge of the structural context of the Jurassic aquifer of the northern flank of Beni Snassen (north-eastern Morocco) (Fig. 1). As the gravity measurement stations are irregularly distributed, a regular square grid (mesh size = 250 m) was calculated by the natural neighbour interpolation method. The available gravity data used in this study is a Bouguer anomaly map (reduction density $d = 2.67\text{g/cm}^3$) published by the geological survey of Morocco (Fig. 3a). This map is the result of different components of anomalous fields with long and short wavelengths superimposed on each other. It shows gravity highs and lows of variable dimensions and amplitudes; the values of which range from -28 to $+24$ mGal with an increasing regional tendency to north. The Bouguer anomaly map shows: (i) various gravity highs associated with an uplift of the Palaeozoic basement in the Beni-Snassen Mountain, and (ii) three gravity lows on the southern side of Triffa plain associated with the filling of these areas by light sediments; a NW-SE negative trend corresponds with the granitic outcrops in the middle of the Béni Snassen; and a negative anomaly with a rounded shape (N3) delimited by a strong gradient in relation with a salt structure at shallow depth. Various and complementary techniques (horizontal gradient, analytical signal and analytical signal of high-resolution, all coupled with upward continuation and the Euler deconvolution) were applied to the gravimetric map (Figs. 4-7). Statistical analysis of gravimetric filtering results shows that the area may be dissected by four major faults striking N-S, NE-SW, ENE-WSW to E-W and NW-SE. All these faults have contributed since Hercynian to Alpine orogenies to the structuring of this area. The faults striking NE-SW to ENE-WSW and NW-SE proved to be the deepest and can reach 3000 m, while the N-S striking faults are shallower, with depths less than 1000 m. These results made it possible on the one hand to confirm some faults already recognized or supposed by the structural studies, by specifying their attitudes and dips, and on the other hand, to highlight a great number of new major or surface faults which remained unknown until now (Fig. 8). In a second approach, the joint interpretation of the results of gravimetric filtering and those resulting from the direct methods (hydrogeological boreholes), made it possible to identify the structure of the Jurassic aquifer system of the northern side of Beni Snassen (Figs 9-10). This reveals that the aquifer system corresponds to a system partitioned by faults. Considering this block-configuration of the aquifer, the hydrodynamic flow of the groundwater could be discontinuous because of the important losses between blocks in favour of the conducting faults. Results from this work show the importance of using various filtering and interpretation techniques in the analysis of gravity data. They also provide new insights into the structure of the study area. The structural map could be a very useful document in the planning of hydrogeological research to be undertaken in the study area.

INTRODUCTION

Les ressources en eau du Maroc nord-oriental sont caractérisées par une très forte sensibilité aux aléas climatiques, une irrégularité pluviométrique temporelle, une mauvaise répartition spatiale et par une vulnérabilité à la sécheresse et à la pollution, notamment les eaux superficielles (nappes phréatiques et cours d'eau) ; de ce fait, la prospection hydrogéologique s'est résolument orientée vers les nappes profondes (nappes jurassiques) en réalisant des forages profonds. Cependant, le succès de ces forages est resté attaché à la bonne connaissance de la structure du

sous-sol. La présente étude a pour objectif de déterminer le contexte structural des forages hydrogéologiques profonds implantés dans le flanc nord des Beni Snassen (abrégé ci-après FNBS) par l'établissement d'une carte des linéaments gravimétriques, en vue d'apporter des éléments de réponse à la problématique posée par l'hydrogéologie de la région (Carlier 1971) et de dresser une carte structurale utile pour orienter les recherches hydrogéologiques futures dans la région.

De nombreuses études structurales, stratigraphiques et sédimentologiques ont été réalisées sur le FNBS et

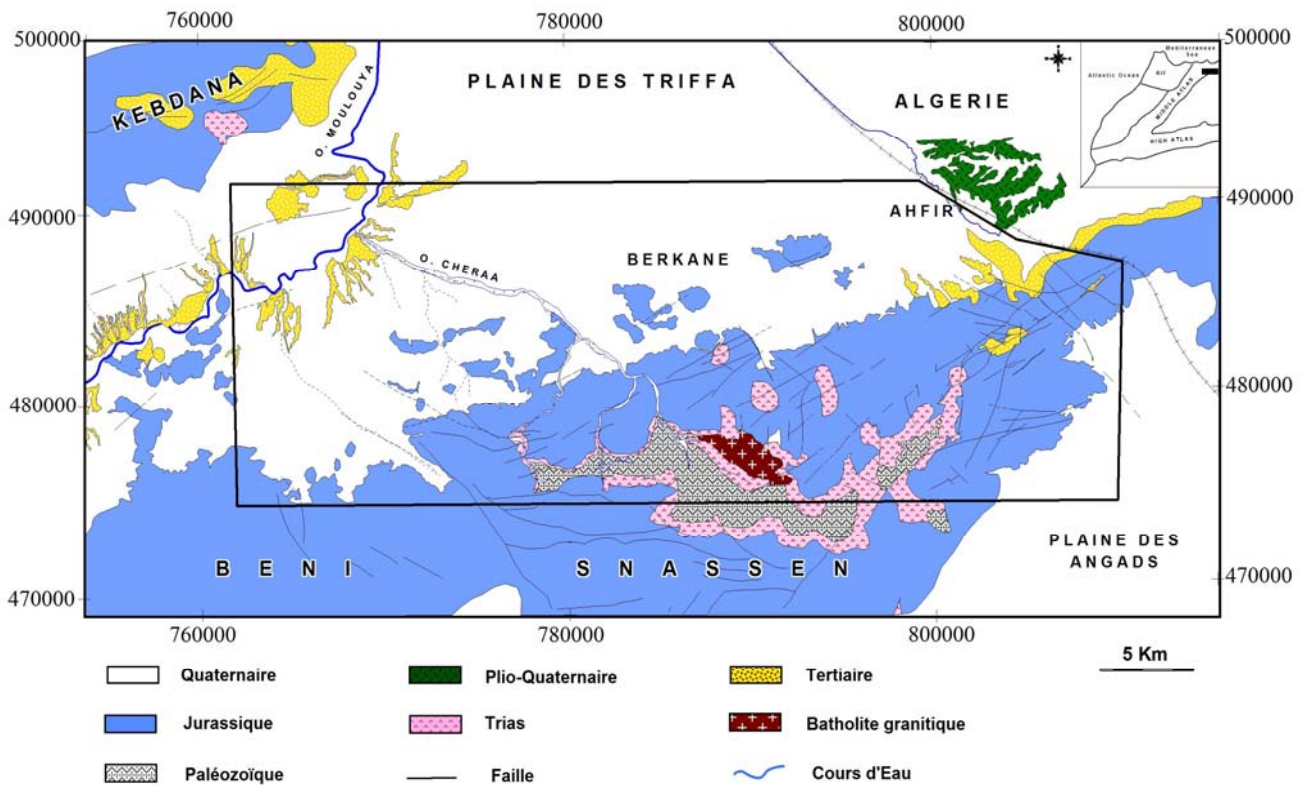


Figure 1. Situation de la zone d'étude sur la carte géologique simplifiée du Flanc Nord des Beni Snassen (extrait des cartes d'Ahfir, Berkane et Zaiou au 1/50 000).

Figure 1. Location of the study area on the simplified geological map of the northern side of Beni Snassen (extracted from Ahfir, Berkane and Zaiou maps at 1/50,000).

notamment sur la totalité du massif de Béni Snassen (Cattaneo 1980, Naciri 1986, 1994 Boudchiche 1994, Ouahhabi 1994, Hoepffner 1987, Torbi 1996, Tabyaoui 2000) ; cependant, la structure profonde de la région ne peut être approchée uniquement par les données de surface ; c'est pourquoi, dans le présent travail, nous avons eu recours à la gravimétrie comme outil d'investigation. L'application de différentes techniques complémentaires (gradient horizontal et signal analytique couplés au prolongement vers le haut et déconvolution d'Euler) à la carte gravimétrique du FNBS permettra d'apporter de nouveaux éléments sur la structure de la zone d'étude, notamment les accidents tectoniques responsables de la compartimentation de l'aquifère jurassique.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Localisé dans le Nord-Est du Maroc (Fig. 1), le massif de Béni Snassen se présente comme un vaste bombement anticlinal orienté ENE-WSW. Son flanc nord plonge sous la plaine des Triffa et son flanc sud est à regard vers le couloir Oujda-Taourirt. Sa position géographique au NE du Moyen Atlas et à l'Est du Rif (avant-pays rifain) le place comme chaîne intracontinentale dont les unités morpho-structurales ont été façonnées au cours de l'orogénèse atlasique et alpine (Fig. 2).

Le FNBS est composé essentiellement d'une épaisse série carbonatée d'âge mésozoïque qui repose en discordance majeure sur un socle paléozoïque affleurant

sous forme de boutonnières constituées pour l'essentiel d'une série schisto-gréseuse à caractère flyschoidé, d'âge dévonien inférieur-moyen (Marhomi 1983), et déformées par la phase éovarisque et la phase post-westphalienne de l'orogénèse hercynienne (Hoepffner 1987). L'évolution hercynienne se termine par la mise en place d'une intrusion de granodiorites et de leucogranites (El Hadi *et al.* 2003) datée à 247 ± 7 Ma avec un rapport Isri $0,7080 \pm 0,0001$ (Mrini *et al.* 1992).

Sur cet ensemble primaire pénéplané en grande partie, se sont déposés des conglomérats du Permo-Trias surmontés de basaltes doléritiques intercalés par des passées carbonatées et d'argile. La sédimentation est contrôlée par des failles normales de direction N70-90, N135-160 et N30-40 produites sous un régime extensif (Ratbi *et al.* 2000a-c) et associées à un volcanisme fissural basique invoquant un rifting avorté. Le Jurassique débute d'une manière hétérochrone à l'Hétangien avec le Lias transgressif et carbonaté [calcaires à stromatolites, oncolithes, *birds eyes*, bioclastes et à ammonites au sommet (faciès type Ammonitico-Rosso)].

Le Dogger généralement marneux, débute par les Marnes d'Anou Midra (Boudchich 1994) du Bajocien supérieur surmonté d'une série marmo-calcaire organodétritique à Rhynchonelles et Térébratules (Naciri 1994) du Bathonien. Au Callovo-Oxfordien, s'installe un édifice deltaïque (Marnes de Saida). Pendant le Malm on enregistre une perte généralisée de profondeur dans le bassin avec le développement d'un plate-forme peu profonde

Age		Epaisseur (m)	Dise. maj	Colonne lithologique simplifiée	Sédiment et magmatisme	Déformations : Caractéristiques et styles
Quaternaire					Alluvions, sables et limons	Distension/Compression: fini-tertiaire et quaternaire
Tertiaire	Pliocène				Encroûtements calcaires+andésite	
	Miocène				Molasses	
Crétacé-Paléogène						Phase atlasique Plis droits, très lâches ; à rayon large ; selon une direction E-W
Mésozoïque	Malm	Kimméridgien Portlandien			Plate forme carbonatée	Les phases extensives mésozoïques > Réactivation extensive d'anciens accidents, > Tectonique en en horsts et grabens de direction ENE-WSW par des failles normales synsédimentaires de directions: ENE-WSW et NW-SE > Compartimentation du bassin selon une direction N 70-90, N 135-160 et N30-40 (Ratbi <i>et al.</i> , 2000, a, b, c), volcanisme fissural basique. Phase de déformation éovarisque > Phase Bretonne (D1 et la D2): Plissement + schistosité > Phase post-westphalienne : Plissement ENE-WSW + schistosité de crénulation subverticale S3.
		Oxfordien -- Kimméridgien Inf et moy			Dépôts deltaïques	
	Dogger	Callovien			Dépôts turbiditiques	
		Bathonien			Marnes à Posidonomyes, argiles et silts vars le haut	
		Bajocien			Marnes d'Anou Midra	
	Lias	Aaléno-Bajocien			Calcaires à Zoophycos	
		Toarcién			Alternance marno-calcaire	
		Domérien			Calcaires en Banc peu épais	
		Carixien			Calcaires à silex	
		Lotharingien			Plate forme carbonatée Dolomie/Calcaire	
	Trias= Ladinien			Détritismes rouges, calcaires et dolérite		
Paléozoïque	Dévonien			Socle cristallin Schisto-gréseux Batholite Tardi-Hercynien		

Figure 2. Tableau récapitulatif des principaux événements géologiques reconnus dans le flanc nord des Beni Snassen (Naciri 1986 modifié).

Figure 2. Summary table of the main geological events recognized on the northern flank of Beni Snassen (after Naciri 1986, modified).

carbonatée et mixte. La sédimentation jurassique est associée à un épisode d'extension dans lequel la subsidence est contrôlée par la réactivation des failles de socle de direction N40-70, N90, N100 et N160 et des décrochements, attestant un allongement de direction ESE-WNW (Hervouet 1986).

Sur le FNBS, une importante lacune stratigraphique a été enregistrée entre l'Albien et le Miocène inférieur. Divers auteurs situent dans cet intervalle chronologique la «phase atlasique», caractérisée par une compression de direction subméridienne due à la convergence entre les deux plaques africaine et européenne (Cattaneo 1980,1987, Torbi, 1988, Torbi & Gelard, 1994).

Les formations du Cénozoïque sont réduites au Néogène qui affleure en certains points épars du FNBS. Ces formations molassiques transgressives, sont datées du Miocène inférieur-moyen anté-nappe (Cattaneo 1980).

Le Plio-Quaternaire est représenté par des formations continentales localement lagunaires, outre les formations volcaniques (basaltes) et volcano-clastiques (tufs et tuffites).

L'évolution tectonique alpine du FNBS se caractérise par une importante fracturation matérialisée par quatre familles de failles de direction NE-SW, NW-SE (N135°E to N160°E), ENE-WSW à E-W et N-S (El Hammichi *et al.* 2006). Cette configuration serait le produit de la réactivation des failles héritées de la tectonique hercynienne, de l'extension mésozoïque et de la compression alpine. Les études microtectoniques (Torbi et Gélard., 1994, Tabyaoui *et al.*, 2000 ; Aït Brahim *et al.*, 2002) suggèrent que la configuration du FNBS (Maroc nord-oriental) serait le résultat de succession de différents phases de déformation : (1) compression E-W du Crétacé supérieur, (2) compression N-S de l'Eocène ; (3) compression NE-SW et extension NW-SE du Tortonien

(4) compression N-S fini-Tortonien à Pliocène basal et compression NW-SE à NNW-SSE attribuée au Pliocène – Quaternaire responsable de l'articulation du relief actuel du massif de Beni Snassen .

La configuration de la fracturation associée aux poussées volcaniques du Maroc nord-oriental (en général) est interprétée par El Hammichi *et al.* (2006) comme résultat de la coexistence d'événements compressif et extensif dans un contexte compressif général entre les plaques Afrique et Europe durant le Mio-Pliocène. D'ailleurs, Cette fracturation aurait un rôle important dans la structuration de l'aquifère liasique du FNBS, le contrôle du sens d'écoulement de la nappe et de l'épaississement des formations aquifères.

CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'ossature lithostratigraphique du FNBS est dominée par les calcaires et dolomies jurassiques qui atteignent des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres et qui finissent par s'envoyer vers le nord sous les dépôts tertiaires et quaternaires de la plaine de Triffa. Les calcaires et dolomies jurassiques reposent soit sur les formations doléritiques et argileuses du Trias, soit directement sur les formations schisteuses du socle primaire. La structure tectonique submonoclinale basculée vers le nord épouse la forme du FNBS. Cette morphostructure conditionnerait l'écoulement d'une nappe aquifère (faciès bicarbonaté calcique avec un débit d'environ 180 l/s). Elle s'exprime sous forme d'une ligne de sources de direction E-W qui longent la bordure sud de la plaine des Triffa où s'opère la rupture de pente du FNBS.

Les travaux géologiques et hydrogéologiques (Faure 1950, Stretta 1950, Carlier ,1971) menés sur cette unité et l'interprétation des forages de reconnaissance ont permis d'identifier la géométrie du réservoir jurassique ; ce dernier est affecté d'une fracturation très dense et très épaisse, entre 100 m et 300 m dans les forages et plus de 500 m au niveau du massif des Beni Snassen (Boudchich 1994). Ce réservoir carbonaté est formé de deux niveaux :

- un niveau inférieur, constitué par des calcaires dolomitiques généralement massifs du Lias basal à morphologie karstique ;
- un niveau supérieur, formé par des calcaires à silex du Carixien intercalé parfois par des niveaux centimétriques de marnes grises.

Le niveau imperméable séparant la nappe captive liasique de la nappe phréatique (Triffa) est constitué par une épaisse couche de marnes de l'Aaléno-Toarcien ou par des marno-calcaires du Dogger (Carlier 1971). L'alimentation de la nappe s'effectue soit directement par les eaux météoriques dans les zones d'affleurements soit par des apports des ensembles au dessus par l'intermédiaire de zones faillées ou par drainage.

Cette nappe liasique est captée à différentes profondeurs, entre 150 m et 300 m, par plusieurs forages ; toutefois, il n'en est pas toujours le cas, en effet, dans un objectif d'exploitation de la nappe profonde des Beni Snassen, le forage IRE 1624/7 1300 m de profondeur, réalisé au niveau de Berkane, s'est avéré non productif ; il

en est de même pour le forage 5/7 (350 m) ; cependant, le forage IRE 6/7, de 86 m de profondeur et implanté à quelques kilomètres au sud, présente un débit intéressant (in Chennouf 2005). Le système aquifère correspond à priori à un système compartimenté ; cette configuration est vraisemblablement le résultat du jeu de la tectonique cassante.

DONNEES ET METHODES UTILISEES

Les données gravimétriques utilisées dans cette étude correspondent à celles de la campagne de détail, réalisée par Fondazione Ing. C.M. Lericci en 1967 pour le compte de la Direction des Mines et de la Géologie (Ministère de l'Energie et des Mines Actuellement Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement), qui couvre la région Oujda–El Aïoun–Berkane avec une densité de réduction $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$. Les 594 stations de mesure (avec une densité moyenne des mesures de l'ordre de $0,71 \text{ station/km}^2$) ont permis de calculer une grille carrée régulière de pas de 250 m et qui a servi pour les différents traitements gravimétriques.

Le filtrage des données gravimétriques a permis d'obtenir des renseignements supplémentaires sur l'organisation du sous-sol par rapport à ceux fournis par la carte d'anomalie de Bouguer. Ainsi, et afin d'exploiter au mieux les données gravimétriques, différentes techniques complémentaires ont été appliquées :

1. Le gradient horizontal couplé au prolongement vers le haut (filtre passe-bas) à une série d'altitudes allant jusqu'à 4 km par pas de 250 m. Il constitue un excellent moyen de localiser les contacts géologiques, notamment les failles, en déterminant leur tracé, leur pendage et leur degré d'importance (Khattach *et al.* 2004, 2006) ; en effet, la limite entre deux blocs caractérisés par des densités différentes est soulignée par la ligne marquant les maxima locaux des valeurs de ce gradient. L'anomalie gravimétrique au-dessus d'un contact vertical est matérialisée par une courbe ayant un minimum du côté des roches de faible densité et un maximum du côté des roches de densité élevée. Le point d'inflexion de la courbe se trouve à l'aplomb de ce contact matérialisant ainsi le maximum du gradient horizontal (Cordell & Grauch 1982 1985, Blakely & Simpson 1986).

Si le contact a un pendage, les maxima du gradient horizontal déterminés sur les cartes prolongées vers le haut se déplacent dans le sens du pendage, mais ceux-ci resteront près de ce contact pour des valeurs de pendage élevées.

Pour la localisation automatique des maxima du gradient horizontal, la méthode de Blakely & Simpson (1986) a été adoptée. Ces maxima sont déterminés à partir d'une grille de valeurs présentées dans une fenêtre 3×3 . L'application de cette méthode à une carte gravimétrique montre que les maxima locaux des gradients horizontaux forment des rides étroites au-dessus des changements abrupts de densité.

2. Le signal analytique (Nabighian 1972, Roest *et al.* 1992) fondé sur l'utilisation du gradient horizontal et vertical du champ gravimétrique (dérivées mathématiques), a été développé afin de déterminer avec précision la

localisation des limites de sources anomaliques peu profondes.

Le concept du signal analytique a été développé pour réduire l'effet de l'interférence entre les anomalies étroitement espacées. Son amplitude est donnée par (Roest *et al.* 1992) :

$$SA = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial z}\right)^2}$$

Où g est l'anomalie du champ potentiel considérée ; ∂x , ∂y , ∂z sont respectivement les dérivées horizontales et verticale.

Le signal analytique de haute résolution (d'ordre 1) est basé sur les dérivées verticales, cependant ceci le rend plus susceptible au bruit. Son amplitude est donnée par :

$$SA1 = \sqrt{\left(\frac{\partial g_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial z}\right)^2}$$

La localisation des maxima du signal analytique nous amène à mieux détecter les corps géologiques causatifs des différentes anomalies et par conséquent de faciliter l'interprétation quantitative des anomalies des champs potentiels.

3. Thompson (1982) a développé une méthode basée sur les propriétés des fonctions régissant les champs de potentiels. Il remarque que ces fonctions répondent, en général, aux critères de l'équation d'homogénéité d'Euler. Reid *et al.* (1990) ont généralisé cette technique dans le cas des cartes. Cette méthode permet la localisation précise des sources d'anomalies dans le plan horizontal ainsi que l'estimation de leurs profondeurs. L'équation d'Euler s'écrit alors sous la forme suivante :

$$(x-x_0)\frac{\partial g}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial g}{\partial y} + (z-z_0)\frac{\partial g}{\partial z} = -NT(x,y)$$

Où (x_0, y_0, z_0) sont les coordonnées d'une source gravimétrique, g est l'intensité du champ mesuré à (x, y, z) . N indique l'index structural et se rapporte à la géométrie de la source.

Thompson (1982) puis Reid *et al.* (1990) signalent que le choix de l'Index structural semble très important, ils ont établi un Index structural N pour un certain nombre de structures. Il s'avère que l'index structural N peut prendre des valeurs qui varient entre 0 et 3 et correspondent à des nombres entiers pour certaines structures simples. Ainsi ils estiment qu'un index $N=1$ est le mieux adapté pour les filons minces, les dykes et les failles à faible rejet vertical et un Index $N=0$ pour les failles à grand rejet et un Index de $N=0.5$ pour les cas intermédiaires.

RESULTATS D'ANALYSE DES DONNEES GRAVIMETRIQUES

La carte d'anomalie de Bouguer

La carte d'anomalie de Bouguer (Fig. 3a) indique des valeurs d'anomalie allant de -28 à $+24$ mGal avec une tendance régionale croissante vers le nord. Elle reflète les variations latérales de la densité dans le sous sol et montre l'existence de plusieurs anomalies positives et négatives. La

carte montre également de forts gradients indiquant, la présence dans le sous-sol, de discontinuités de densité telles que les failles et les limites des corps intrusifs. Ces discontinuités peuvent être mises en évidence par l'application des techniques de filtrages citées précédemment.

La carte résiduelle (Fig. 3b) a été obtenue par suppression d'une régionale assimilée à une surface polynomiale d'ordre 1 (plan). La superposition de cette carte à la carte géologique de la région extraite des feuilles Berkane, Ahfir et Zaio au 1/50 000, nous permet de faire les observations suivantes :

- une anomalie négative (N1) allongée ENE-WSW au nord de Berkane, qui correspond à la partie méridionale de la plaine des Triffa remplie par des sédiments néogènes et quaternaires ; un axe d'anomalies négatives (N2) de direction NW-SE passe par les affleurements granitiques situés au cœur du massif des Béni Snassen, il indiquerait la continuité vers le NW du granite sous la couverture quaternaire.
- une anomalie de forme plus ou moins arrondie et de grande amplitude (N3) délimitée par un fort gradient attribuée à une origine salifère à faible profondeur (Van den Bosch 1981) ;
- le massif des Béni Snassen est caractérisé par un ensemble d'anomalies positives orientées ENE-WSW et NW-SE (P1, P2, P3), qui sont dues aux terrains primaires qui affleurent dans la partie la plus élevée du massif et qui sont entourés par des terrains triasiques et jurassiques. Sa limite sud présente un fort gradient.

Résultats des filtrages gravimétriques

Analyse des résultats du gradient horizontal couplé au prolongement vers le haut

Lorsqu'on applique cette méthode à la carte de l'anomalie de Bouguer, les maxima locaux du gradient horizontal forment des rides étroites au dessus des changements abrupts de densité. Dans une deuxième approche, on a eu recours à la méthode du prolongement vers le haut à une série d'altitudes allant jusqu'à 4 km par pas de 250 m, ces prolongements vers le haut permettent de traiter le signal gravimétrique qualitativement. À chaque niveau les maxima du gradient horizontal ont été localisés. La superposition de ces maxima déterminés sur la carte de l'anomalie Bouguer et ses prolongées vers le haut soulignent les différents contacts et indiquent le sens de leurs pendages (Fig. 4a).

La numérisation des contacts, interprétés comme étant des failles, (Fig. 4b) et leur traitement statistique ont révélé l'existence de quatre familles de direction de N00, N45-N50, N90 et des directions entre N120 et N140. Les linéaments de direction N90 d'une part et ceux de directions N45-N50 et N135 d'autre part, sont plus étendus que ceux de directions N00.

Apport du signal analytique

Afin de mieux cerner les structures géologiques relativement peu profondes, nous avons procédé à

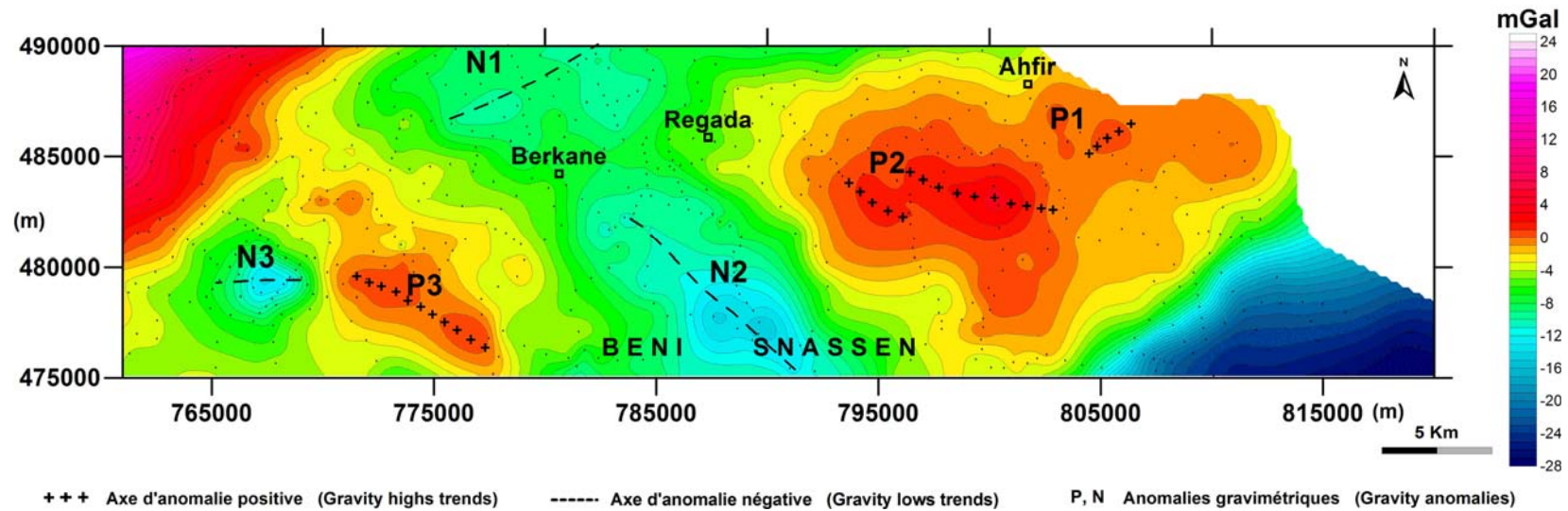


Figure 3a. Carte d'Anomalie de Bouguer ($d=2,67 \text{ g/cm}^3$; intervalle= 1 mgal) avec localisation des stations de mesures.
 Figure 3a. Bouguer anomaly map (reduction density: 2.67 g/cm^3 . Minimum contouring interval = 1 mgal) and location of the gravity stations.

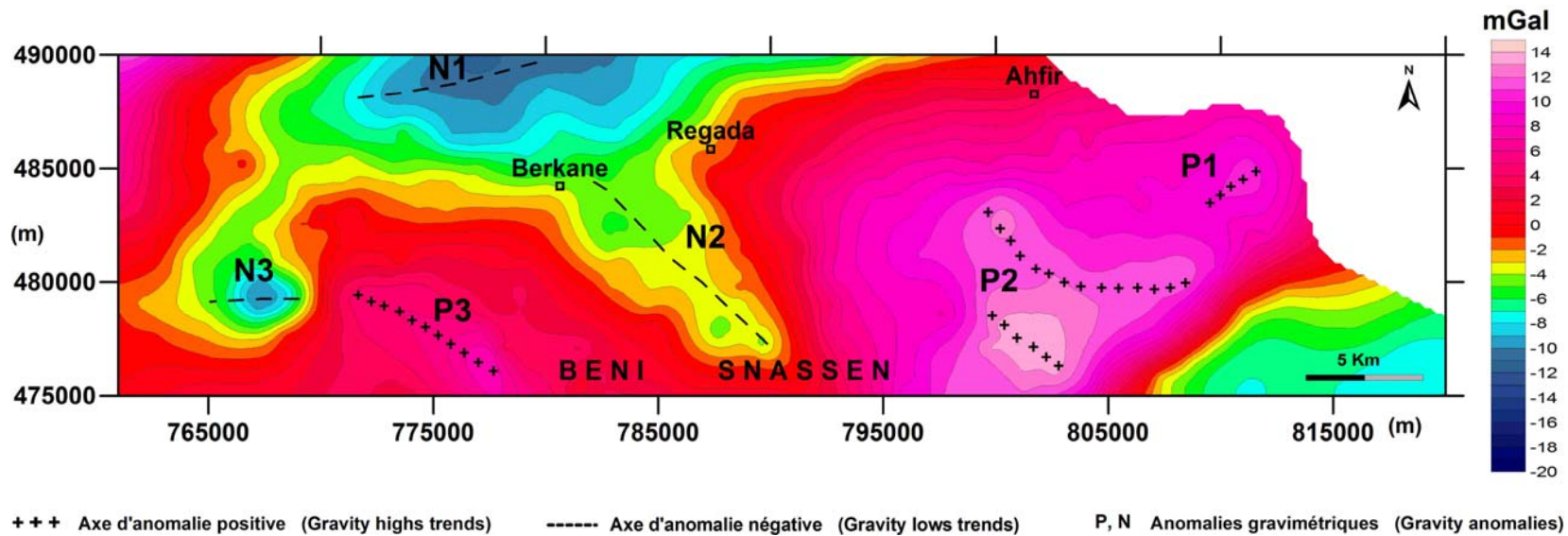


Figure 3b. Carte d'anomalie résiduelle du flanc nord des Beni Snassen.
 Figure 3b Residual map of the northern flank of Beni Snassen.

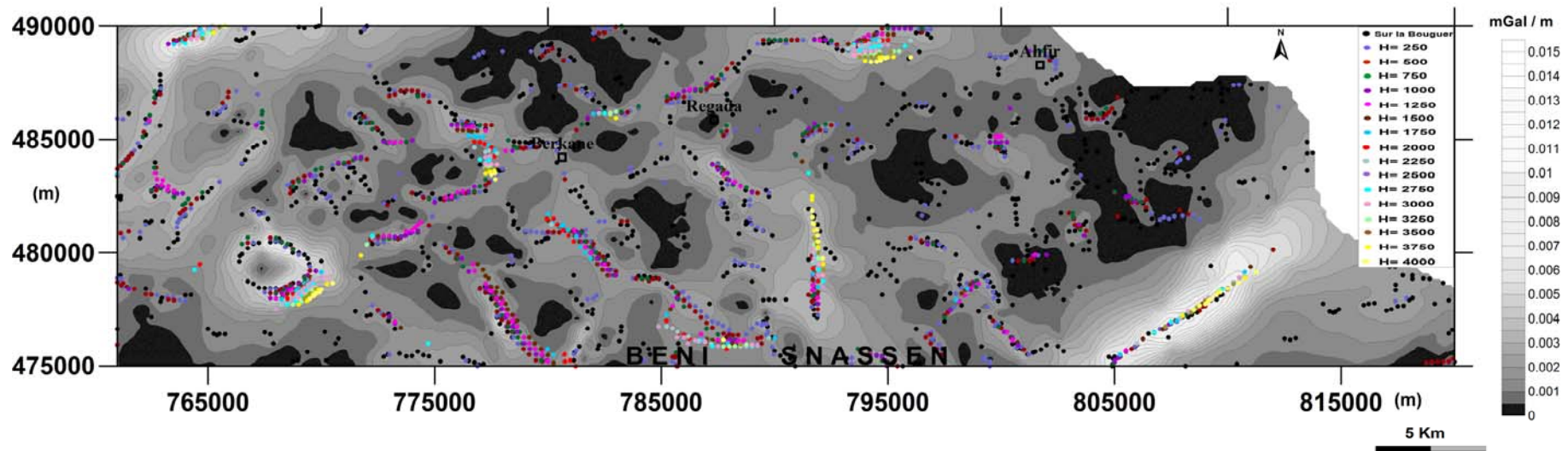


Figure 4a Localisation des maxima du gradient horizontal obtenus sur l'anomalie de Bouguer et les cartes prolongées vers le haut à différentes altitudes (H en mètres) superposés à la carte du gradient horizontal

Figure 4a. Maxima of the horizontal gradient of the Bouguer anomaly and its upward continuation to different heights (H in meters) superimposed on the horizontal gradient map.

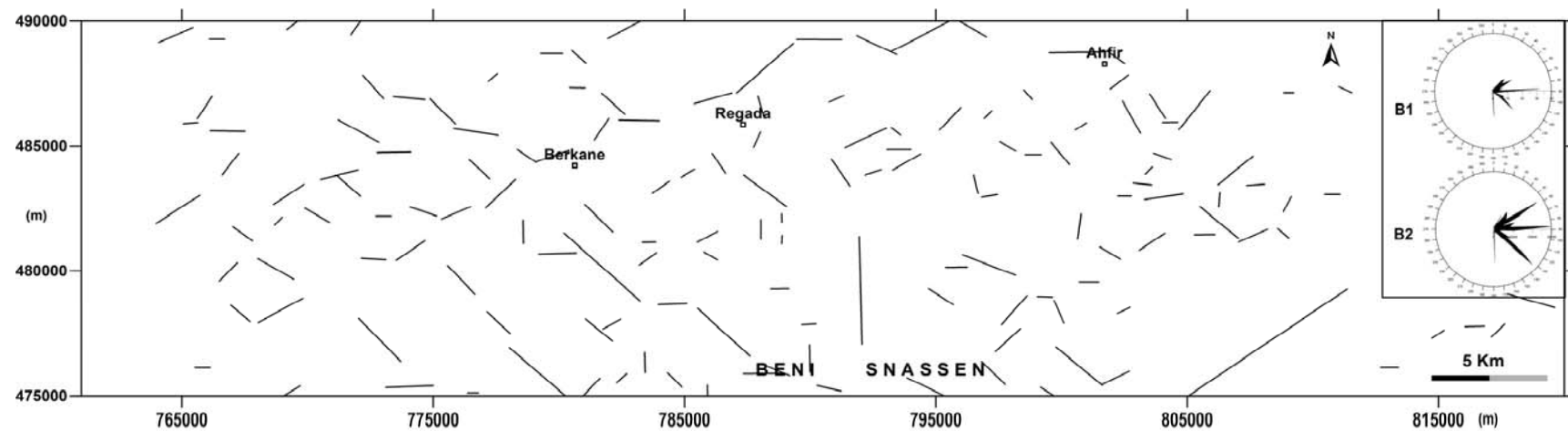


Figure 4b. Tracé et rosace des linéaments à partir des regroupements des maxima du gradient horizontal de la carte d'anomalie de Bouguer et des différentes cartes prolongées vers le haut. (B1 : fréquences, B2 : longueurs totales).

Figure 4b. Layout of the features interpreted as faults and rose diagram (B1 Frequencies, B2 Overall lengths).

l'application de la méthode du signal analytique à la carte des anomalies de Bouguer.

La figure 5a représente la superposition des maxima locaux du signal analytique déterminés sur la carte de l'anomalie de Bouguer et ses prolongées vers le haut à une série d'altitudes allant jusqu'à 2000 m.

On retrouve les quatre directions déduites antérieurement par la méthode du gradient horizontal : N-S, ENE-WSW, NE-SW et NW-SE (Fig. 5b) ; cependant, les études statistiques montrent surtout une prédominance des directions N-S et ENE-WSW suivies par les familles NE-SW et NW-SE en nombre et en longueurs.

Dans une deuxième approche, on a eu recours à la méthode du signal analytique de haute résolution (ordre 1) en utilisant le même pas pour la grille (250 m) que les autres méthodes de filtrage gravimétrique, afin de montrer l'apport de cette méthode à la carte gravimétrique originale.

Puisque cette technique est basée sur les dérivées verticales, le calcul numérique n'est qu'une approximation, d'où on constate l'apparition de bruit de fond de haute fréquence.

Les résultats de la superposition des maxima du signal analytique d'ordre 1, déterminés sur la carte de l'anomalie de Bouguer et sur les cartes prolongées vers le haut tous les 250 m jusqu'à 2000 m sont représentés sur la figure 6a. On retrouve les directions déjà obtenues par le traitement précédent (Fig. 6b) avec une nette prédominance des familles N-S et E-W. La rose des longueurs totales montrent que les familles E-W et N-S affectent de plus grandes surfaces ; elles sont suivies par les failles de direction NE-SW, et les failles de direction N140 qui sont plus restreintes.

Apport de la Déconvolution d'Euler

Les solutions d'Euler pour l'indice structural $IS=0$ sont représentées sur la figure 7 ; leurs alignements indiquent d'autres nouvelles failles, en plus des principaux contacts déduits précédemment par les trois méthodes de filtrages gravimétriques. Les accidents les plus profonds sont de direction principalement NE-SW à ENE-WSW et NW-SE et leurs profondeurs peuvent atteindre les 3000 m. Le réseau de failles N-S est quasi présent ; il s'agit de failles superficielles dont la profondeur ne dépasse guère les 1000 m, sauf dans la région de Béni Haiou où les solutions d'Euler permettent de détecter une faille dont la profondeur estimée est de 1500 m.

Carte structurale (linéaments gravimétriques)

La superposition des cartes des linéaments gravimétriques issues de l'analyse de la carte gravimétrique par les méthodes du gradient horizontal, du signal analytique et de la déconvolution d'Euler, montre une grande complémentarité entre les failles déduites ; ainsi, quatre familles de failles ont été mises en évidence : ENE-WSW, N-S, NW-SE et NE-SW (Fig. 8).

Confrontés aux réseaux de failles cartographiées dans le Flanc Nord des Beni Snassen (Tab. I), plusieurs des linéaments interprétés ont une correspondance directe avec la carte structurale de la zone d'étude (feuilles Ahfir,

Berkane et Zaio au 1/50 000). Ces informations nous permettent de confirmer plusieurs failles observées ou supposées par les études antérieures et également de mettre en évidence un grand nombre d'accidents profonds ou superficiels qui sont restés inconnus jusqu'à présent surtout au niveau des plaines où l'on observe aucun accident à cause de la couverture néogène et quaternaire.

APPORT DE L'INTERPRETATION CONJOINTE DES DONNEES GRAVIMETRIQUES ET DE FORAGES

Afin d'identifier la structure du système aquifère liasique du FNBS, nous avons analysé conjointement les résultats des filtrages gravimétriques et les données des forages hydrogéologiques.

La figure 9 montre la localisation des différents forages hydrogéologiques réalisés par le BRPM destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Berkane et des douars ainsi que pour l'irrigation. L'analyse stratigraphique de ces forages montre l'existence d'une légère variation latérale de faciès entre blocs de même âge. Ainsi, la coupe de direction ENE-WSW représentée sur la figure 9 et rassemblant les sept forages hydrogéologiques montre que le système aquifère est formé par un assemblage de blocs surélevés et d'autres affaissés.

Les résultats des filtrages gravimétriques montrent que le système aquifère est régi par les quatre directions majeures E-W, NE-SW, NW-SE et N-S (Fig. 10) qui contrôlent l'architecture de l'aquifère liasique en horsts et grabens et demi grabens. Ces failles peuvent jouer un rôle de drain ou axe principal d'écoulement des eaux de la nappe au sein de ce système aquifère, comme elles peuvent constituer des barrières imperméables et empêcher donc tout écoulement. Par ailleurs, elles peuvent mettre le système aquifère carbonaté en contact avec les formations imperméables du Dogger ou celle du Callovo-Oxfordien, ou même avec les formations néogènes, ce qui favorise l'émergence de la nappe ascendante du Lias.

Suite donc à cette configuration en blocs de l'aquifère, l'écoulement hydrodynamique de la nappe est discontinu à cause des importantes pertes de charges que cet agencement implique ; ainsi, il peut y avoir des interconnexions hydrodynamiques entre blocs voisins à la faveur notamment de ces failles conductrices.

CONCLUSION

La combinaison des résultats de l'application de trois méthodes d'interprétation, le gradient horizontal, le signal analytique et la déconvolution d'Euler à la carte de Bouguer du FNBS a conduit à l'élaboration d'une carte des linéaments gravimétriques.

L'analyse statistique des résultats a permis la mise en évidence de quatre familles de linéaments gravimétriques d'importance régionale orientées NE-SW, NW-SE, ENE-WSW à E-W et N-S. La méthode d'Euler a pu révéler d'autres linéaments non déduits par les autres méthodes de filtrage (gradient horizontal et signal analytique), en plus de l'estimation de leurs profondeurs. Les linéaments de

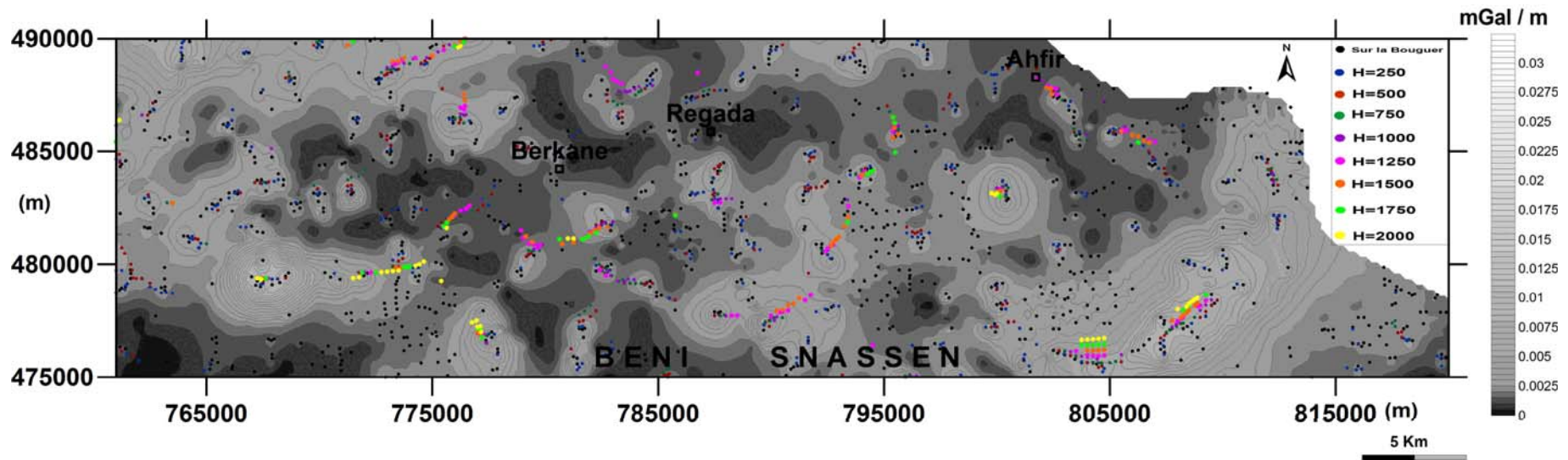


Figure 5a. Superposition des maxima du signal analytique obtenus sur la carte de Bouguer et sur ses prolongées vers le haut à différentes altitudes (H en mètres) superposés à la carte du signal analytique. *Figure 5a. Overlay of analytical signal maxima of the Bouguer anomaly and its upward continuations to different heights (H in meters) superimposed on the analytic signal map.*

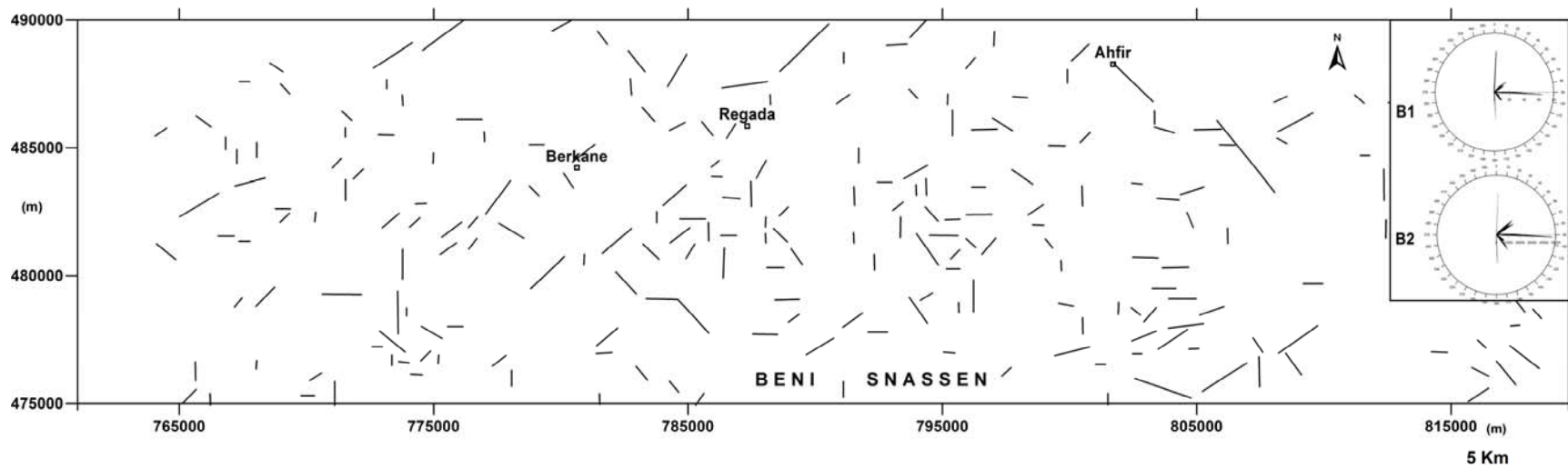


Figure 5b. Tracé et rosace des linéaments du signal analytique interprétés à partir de la figure 5a (B1 : fréquences, B2 : longueurs totales). *Figure 5b. Faults interpreted from Fig. 5a and their distribution (B1 Frequencies, B2 Overall lengths).*

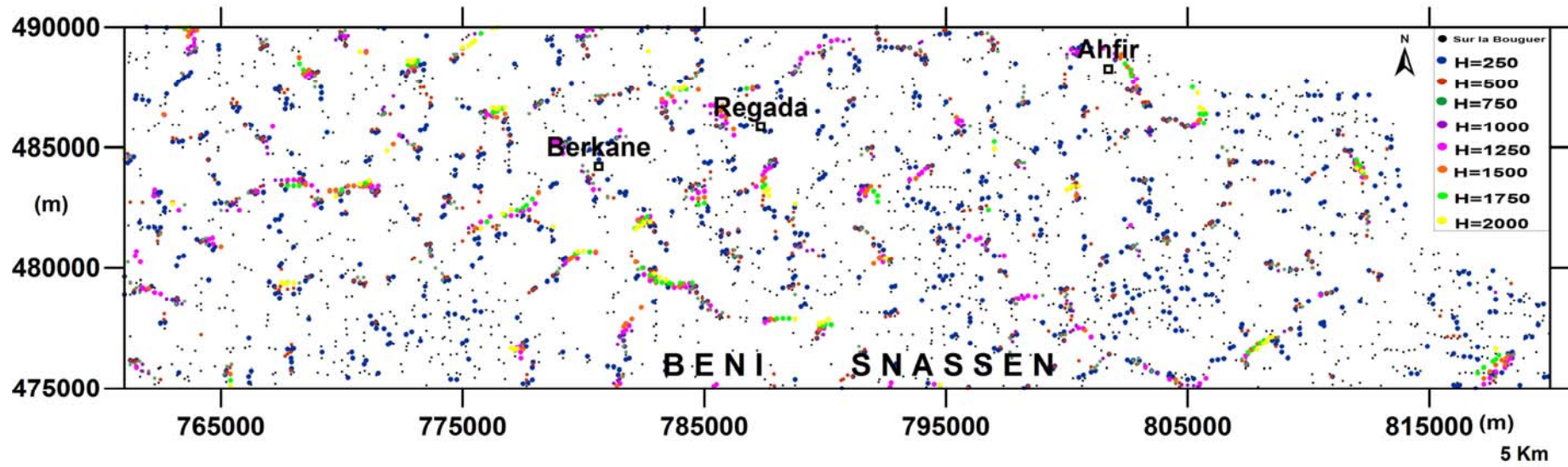


Figure 6a Superposition des maxima du signal analytique de haute résolution obtenus sur la carte de Bouguer et sur les cartes prolongée vers le haut à différentes altitudes (H en mètres).
Figure 6a. Overlay of analytical signal of high-resolution maxima and its upward continuations to different heights (H in meters).

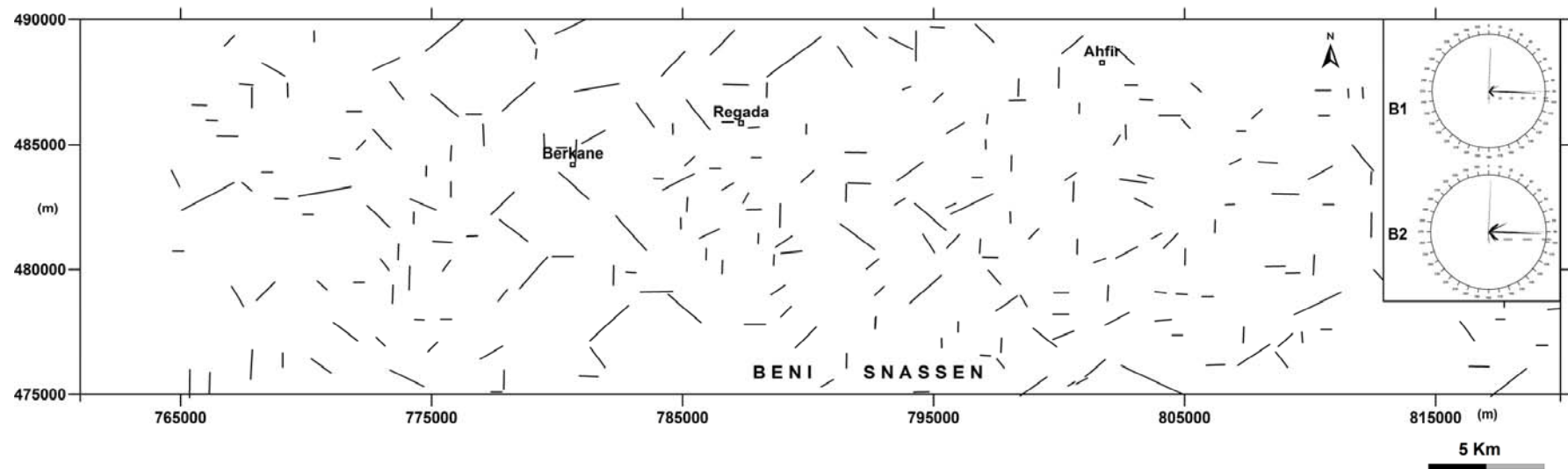


Figure 6b. Tracé et rosace des linéaments du signal analytique d'ordre 1 interprétés à partir de la figure 6a (B1 : fréquences, B2 : longueurs totales).
Figure 6b. Faults interpreted from Fig. 6a and their distribution (B1 Frequencies, B2 Overall lengths).

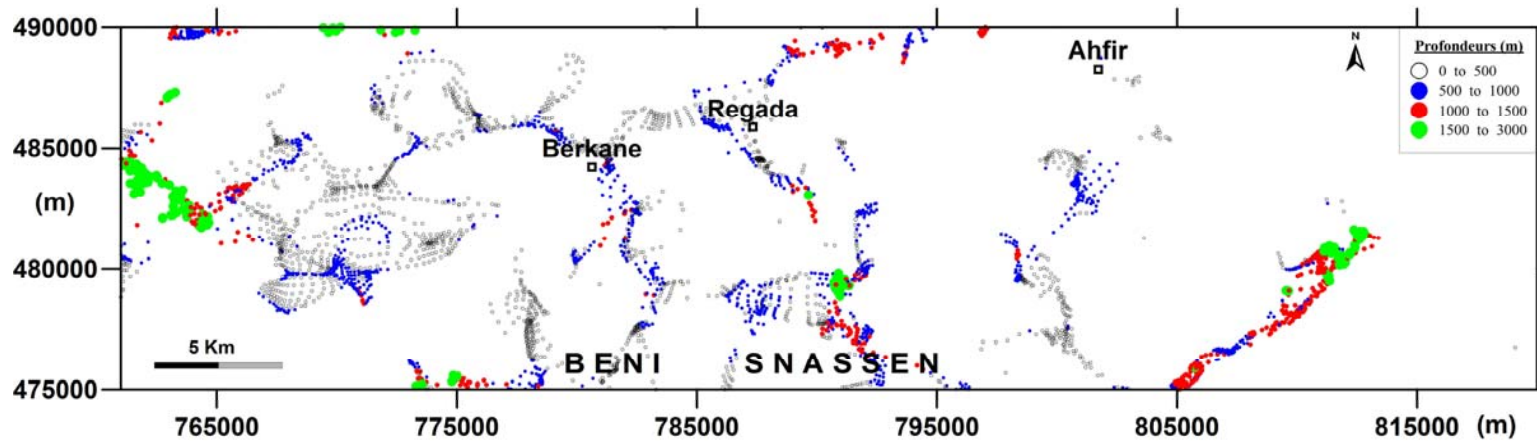


Figure 7. Carte des solutions d'Euler pour l'indice structural $IS=0$, une fenêtre de 10×10 e et une erreur relative maximale de 15%.
 Figure 7. Euler solution, for a structural index $IS=0$, a 10×10 window and maximum relative error of 15%.

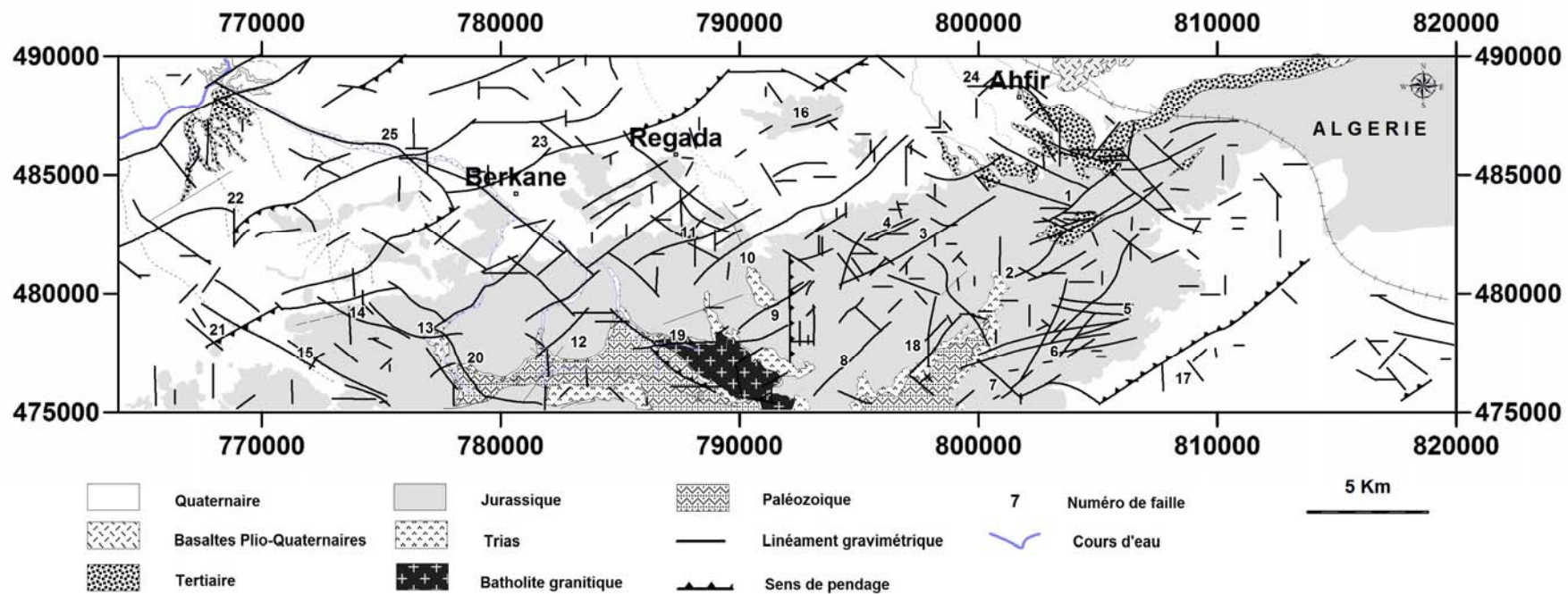


Figure 8. Carte des linéaments du flanc Nord des Beni Snassen obtenue par superposition des différentes cartes déduites des filtrages gravimétriques
 Figure 8. Features map of the northern side of Beni Snassen, inferred from gravity data interpretation.

Tableau I. Les principaux linéaments gravimétriques déduits par les différentes techniques de filtrages.
Table I. Main gravimetric features deduced by the various filtering techniques.

Direction	Numéro de faille	Caractéristiques et localisations
N-S	N°2	Confirmation de la faille de Jorf Tayeh ainsi que son prolongement vers le NE
	N°9	Cette faille traverse le Lias basal de Béni Haiou ; elle est à pendage Est, avec un net approfondissement au niveau de sa partie centrale où elle atteint atteindre 1500 m.
	N°18	Cette faille recoupe le flysch paléozoïque des Béni Snassen et semble s'arrêter au niveau de la faille ENE-WSW de Bacharin.
NE-SW	N°3	Mise en évidence de la partie supposée entre la faille de Beni Haiou à l'Ouest et la faille de Jbel El Handia à l'Est.
	N°4	Cet accident rassemble les différents segments cartographiés et qui marquent la limite entre les Béni Snassen et la plaine des Triffa ; ce dernier semble se prolonger vers le NE en recoupant Jbel Irhemaouene.
	N°8	Failles Tarhjirt El Hofra.
	N°10	Détection de la faille de Belahkem et son prolongement sous la couverture quaternaire.
	N°11	Faille de Waklane.
	N°12	Faille supposée de Jbel Ayyane.
	N°17	A fort pendage vers le NW, limitant au SE le massif des Béni Snassen de la plaine des Angad, cet accident guide en surface Oued Tamedmar. Cette faille s'étend sur une longueur d'une dizaine de kilomètres, elle présente un approfondissement (jusqu'à 3000 m) dans sa partie NE.
	N°21	Cette faille recoupe transversalement Oued Sidi Abdellah et présente un pendage vers SE.
ENE-WSW à E-W	N°5	Faille d'Ouled Meriem.
	N°6	Système de failles d'El Mers.
	N°13	Faille de Takerboust qui traverse le socle paléozoïque et les formations jurassiques des Beni Snassen, à faible pendage vers le NE ; elle semble perturber le cours d'eau de Oued Zegzel vers l'Est, ainsi son prolongement vers le NW (confirmation de la faille supposée).
	N°16	Les deux failles de Daraa Sidi Mimoune.
	N°19	Cette faille coupe le granite de Jbel Bouhammed ; sa profondeur est de l'ordre de 1000 m dans sa partie orientale.
	N°20	Faille de Jbel Tamajjout.
	N°22	Faille d'Oulad Boubker, qui se trouve décalée d'une manière dextre par Oued Cheraa ; elle marque un approfondissement considérable au nord d'Aklim (3000 m).
	N°23	Elle marque la limite entre les Béni Snassen et la plaine des Triffa ; elle est subverticale mais au niveau de son extrémité Est, elle présente un pendage vers le NW.
	N°24	Faille d'Ahfir.
	N°1	Système de failles ENE-WSW et WNW-ESE passant par Jbel Afras.
NW-SE	N°7	Failles de Jbel Farouane.
	N°15	Confirmation de la faille supposée qui guide Oued Sidi Abdellah en surface. Elle sépare les dépôts liasiques des Beni Snassen orientaux des formations du Jurassique supérieur des Beni Mahiou ; elle peut atteindre 3000 m dans sa partie SE.
	N°14	La faille supposée d'Oulad Yakoub.
	N°25	Ensemble de failles qui guident en surface Oued Cheraa, dont la profondeur peut atteindre 1500 m (confirmation des parties supposées).

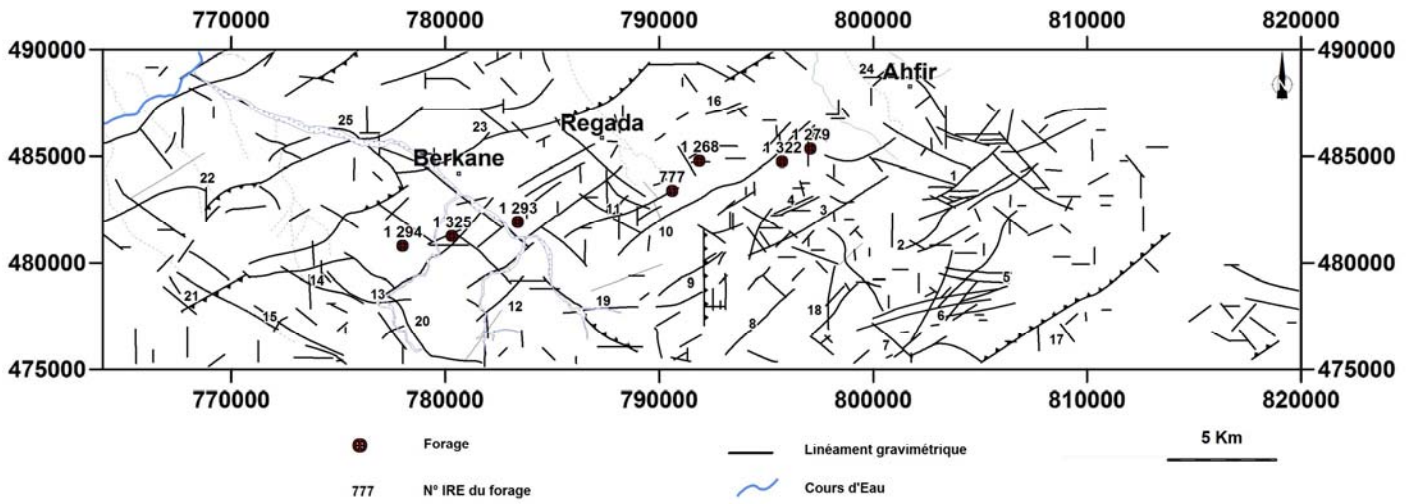


Figure 9 Localisation des forages hydrogéologiques (Coupe C1).
 Figure 9. Location of the hydrogeological boreholes (Coupe C1).

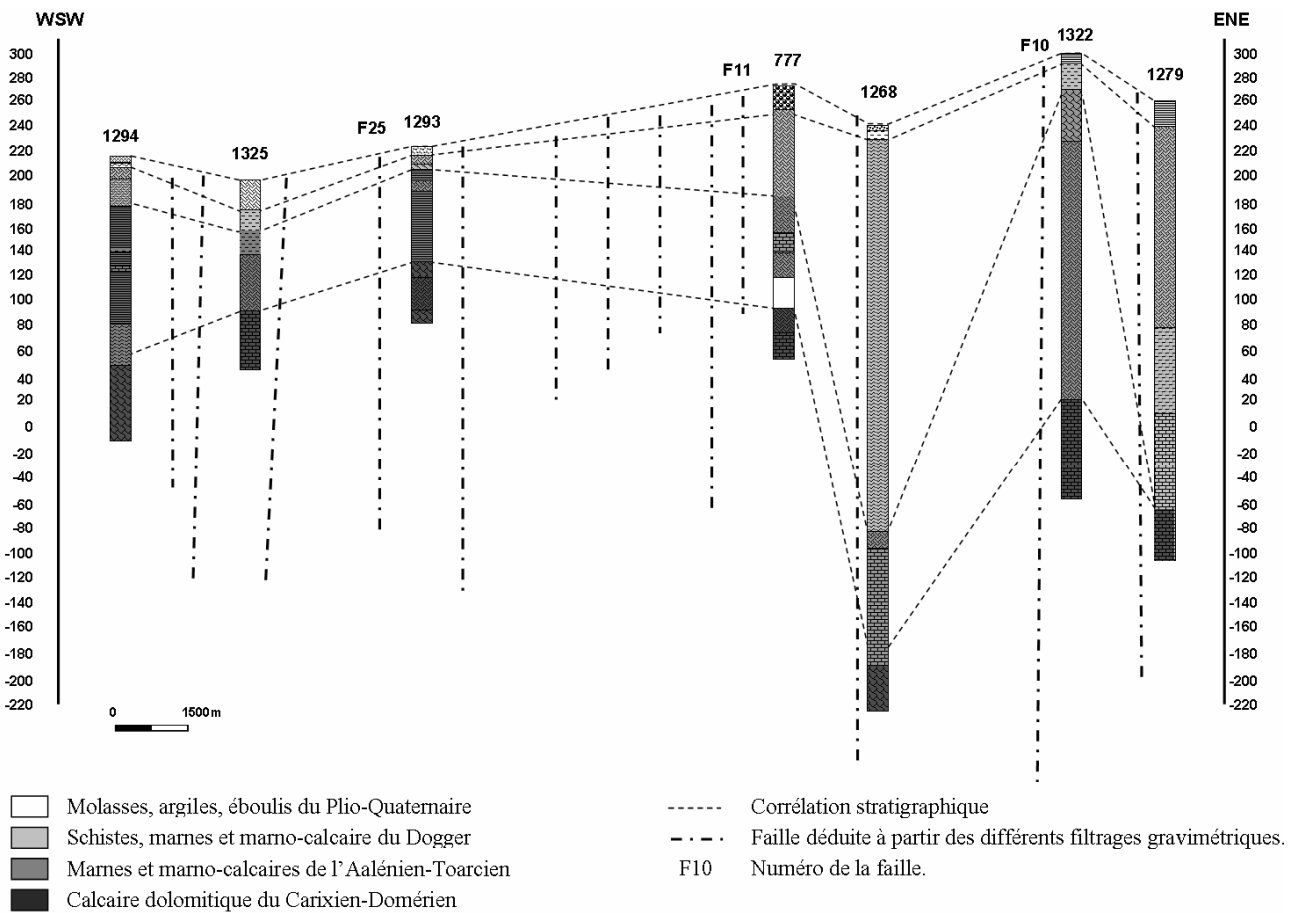


Figure 10. Superposition des données de forages avec les linéaments gravimétriques.
 Figure 10. Overlay of hydrogeological boreholes and the gravimetric features.

direction NE-SW à ENE WSW et NW-SE sont les plus profonds et peuvent atteindre 2200 m, tandis que ceux de direction N-S sont superficiels dont la profondeur ne dépasse pas 750 m attestant leur caractère récent (El Hammichi *et al.* 2006). Plusieurs linéaments correspondent à des failles connues ou supposées par les études structurales.

L'interprétation conjointe des résultats gravimétriques (linéaments) et des données de forage a permis de contribuer à la reconnaissance de la structure du système aquifère liasique. Il ressort que l'aquifère jurassique du FNBS correspond à un système compartimenté en blocs soulevés et affaissés par des failles. Cette architecture est contrôlée par différentes phases de plissement et par la réactivation des accidents en failles normales/inverses lors des phases orogéniques atlasiques et alpines. Cette

structuration influence l'épaisseur des formations perméables et la circulation des eaux souterraines, dans ce contexte l'écoulement des eaux de la nappe est discontinu. Cette fracturation guide en surface la majorité du réseau hydrographique (Oued Cheraa, Oued Tamedmar et Oued Sidi Abdellah), elle montre aussi une étroite relation avec la répartition des principales sources ; celles-ci sortent généralement le long des failles NW-SE et ENE-WSW. Les résultats obtenus (carte des linéaments) amènent à reconsidérer les schémas hydrogéologiques locaux en vue d'une bonne exploitation de l'aquifère liasique.

Remerciements

Les auteurs remercient les évaluateurs pour leurs commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la version initiale du manuscrit.

Références

- Ait Brahim L., Chotin P., Hinaj S., Abdelouafi A., El Adraoui A., Nakcha C., Dhont D., Charroud M., Sossey Alaoui F., Amrhar M., Bouaza A., Tabyaoui H. & Chaouni A. 2002. Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present. *Tectonophysics*, 357, 187-205
- Blakely R.J. & Simpson R.W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Boudchiche L. 1994. *Etude micropaléontologique du Domérien, Toarcien et Bajocien du massif des Beni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Claude Bernard, Lyon I, 190 p.
- Carlier P. 1971. *Ressources en eau du Maroc ; domaine du Rif et du Maroc oriental, Tome I*. Editions du service géologique du Maroc. Rabat
- Cattaneo G. 1980. Sédimentation carbonatée liasique, chronologie et interprétation des événements tectoniques cénozoïques dans les Beni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7, t. XXII, 2, 185-191.
- Cattaneo G. 1987. *Les formations du jurassique supérieur et du crétacé inférieur de l'avant pays rifain oriental (Maroc)*. Thèse ès-Sciences. Univ. Bourgogne, 337 p.
- Chennouf T. 2005. *Etude géophysique du Maroc nord-oriental : implications structurales et hydrogéologiques*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed I, Fac. Sci. Oujda, 260 p.
- Cordell L. & Grauch V.J.S. 1982. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data. In: The San Juan Basin, New Mexico, 52nd Ann. Int. Meet. Soc. Explor. Geophys., Dallas, pp. 246-247, abstracts and biographies.
- Cordell L. & Grauch V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze W.J. (ed.) - *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Soc. Explor. Geophys., 181-197.
- El Hadi H., Tahiri A. & Reddad A. 2003. Les granitoïdes hercyniens post-collisionnels du Maroc oriental : une province magmatique calco-alcaline à shoshonitique. *C. R. Geoscience*, 335, 959-967.
- El Hammichi F., Tabyaoui H., Chaouni A., Ait Brahim L. and Chotin P. 2006. Mio-Pliocène tectonics in Moroccan Rifian Forland: Coexistence of compressive and extensional structures. *Rev. Soc. geol. Esp.*, 19, 1-2, 143-152.
- Faure H. 1950. *Etude géologique et hydrogéologique du flanc nord des Beni Snassen (secteur d'Aïn Regada, Maroc)*. Faculté des Sciences de Paris (FR), Diplôme d'Etudes Supérieures, 1 vol., 72 p., 28 pl., 1 carte.
- Fondazione Ing. C.M. Lericci. 1967. Prospection gravimétrique et magnétique de la région El Aioun-Oujda-Berkane ; rapport inédit, Ministère de l'Energie et des Mines, direction des mines et de la géologie. N° 480. 86p.
- Hervouet Y. 1986. Evolution tectonique de l'avant pays rifain oriental (orogène alpin, Maroc). *Rev. Géol. dyn. & Géogr. phys.*, 27, 1, 25-35.
- Hoepffner C. 1987. *La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc*. Thèse d'Etat, Univ. Strasbourg, 280 p.
- Khattach D., Keating P., Mili E.M., Chennouf T., Andrieux P. & Milhi A. 2004. Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin des Triffa (Maroc nord-oriental) : implications hydrogéologiques. *C. R. Geoscience*, 336, 1427-1432.
- Khattach D., Mraoui H., Sibih D. & Chennouf T.. 2006. Analyse multi-échelle par ondelettes des contacts géologiques : application à la carte gravimétrique du Maroc nord-oriental, *C. R. Geoscience*, 338, 521-526.
- Marhouni M.R., Hoepffner Ch., Doubinger J. & Rauscher R. 1983. Données nouvelles sur l'histoire hercynienne de la Meseta orientale du Maroc : l'âge dévonien des schistes de Debdo et du Mekam. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 297, 69-72.
- Mrini Z., Rafi A., Duthou J.-L. & Vidal P. 1992. Chronologie Rb/Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc : conséquences. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 3, 429-443.
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Naciri T. 1986. *Etude lithostratigraphique et structurale des Beni Snassen (Maroc)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. de Pau et des pays de l'Adour, 236 p.
- Naciri T. 1994. *Evolutions sédimentaires, environnements et contrôles dans le Lias-Dogger des Beni Snassen Orientaux (Maroc oriental)*. Doctorat ès-Sciences, Univ. Mohamed I, Fac. Sci. Oujda, 243 p.
- Ouahhabi B. 1994. *Le Lias Dogger inférieur des Beni Snassen orientaux et des Zekkara (Maroc oriental)*. Stratigraphie, paléontologie et dynamique du bassin. Comparaison avec les régions limitrophes. Doctorat ès-Sciences. Univ. Mohamed I. Fac. Sci. Oujda. Maroc.
- Ratbi S., Bastida J., Lago M., Galé C., Arranze C. & Oujidi M. 2000. Petrología de los basaltos toleíticos del macizo de Beni Snassen. *Geotemas*, 1, 3, 283-288.
- Ratbi S., Bastida J., Lago M., Galé C., Arranze C., Oujidi M. & Lopez A. 2000. Geoquímica de los basaltos triásicos del macizo de Beni Snassen. *Geotemas*, 1, 3, 293-297.

- Reid A.B, Allsop J.M, Granser H., Millett A.J. & Somerton I.W. 1990. Magnetic interpretation in the three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- Roest W, Verhoef J. & Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125.
- Sibson R. 1981. A brief description of natural neighbor interpolation, interpreting multivariate data. V. Barnett (editor), John Wiley and Sons, New York, pp. 21-36.
- Stretta E. 1950. Hydrogéologie du flanc nord des Beni- Snassène en amont de Berkane. *Notes Serv. géol. Maroc*, t. 2, 74, 213-221.
- Tabyaoui H. 2000. *Apport des données satellitaires à la cartographie des structures géologiques du Maroc nord – oriental. Tectonique cassante, cinématique et contexte géodynamique du Trias à l'actuel.* Thèse, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 338 p.
- Thompson D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.
- Torbi A. 1988. *Analyse structurale et étude de la fracturation du socle hercynien et de sa couverture dans les monts du Sud-Est d'Oujda, Meseta orientale, Maroc.* Thèse de 3ème cycle, Univ. Poitiers, 186 p.
- Torbi A. 1996. Stratigraphie et évolution structurale paléozoïque d'un segment de la Meseta orientale marocaine (les monts du Sud-Est d'Oujda) : rôle des décrochements dans la formation de l'Olistostrome intraviséen et le plutonisme tardi-hercynien. *J. Afr. Earth Sci.*, 22, 4, 549-563.
- Torbi A. & Gelard J.P. 1994. Paléocontraintes enregistrés par la microfracturation, depuis l'Hercynien jusqu'à l'Actuel, dans les Monts du Sud-Est d'Oujda (Meseta orientale, Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 318/2, 131-135.
- Van Den Bosch J.W.D. 1981. Mémoire explicatif de la carte gravimétrique du Maroc (provinces du Nord) au 1/500 000. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, 234 bis, 219 p.

Manuscrit reçu le 15 juin 2009

Accepté le 20 octobre 2009