

Apport des données géophysiques et géologiques à la mise en évidence de nouveaux éléments structuraux associés à la flexure de Settât (Maroc central)

Contribution of geophysical and geological data for the identification of new structural elements related to the Settât flexure (central Morocco)

El Houssine EL GASMI*, Abdelaziz MRIDEKH, Bouabid EL MANSOURI, Mohammed TAMMAL & Mohammed EL BOUHADDIOUI

Laboratoire de Géosciences des Géo-ressources, Equipe hydroinformatique, Université Ibn Tofaïl, Faculté des Sciences, B.P. 133 14 000, Kenitra, Maroc *elgasmi.houssine@gmail.com).

Résumé. Dans le plateau de Settât Ben Ahmed, l'interprétation des données géologiques et géophysiques permet de mettre en évidence l'existence de nouvelles limites entre ce plateau et la plaine de Berrechid. La géométrie des unités géologiques montre un approfondissement de séries crétacées vers le NW, ceci peut être expliqué par l'existence de flexure et/ou de failles dans la zone de transition entre le plateau et la plaine. Ces fractures sont parallèles à celles affectant le socle paléozoïque. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour la reconstitution des événements tectoniques du plateau de Settât Ben Ahmed, ainsi que leurs rapports avec les accidents paléozoïques. Ils constituent aussi de nouveaux éléments pour la compréhension des circulations hydriques entre les aquifères crétacés du plateau de Settât Ben Ahmed et la plaine de Berrechid.

Mots-clés : Flexure de Settât, sondages électriques, coupe géo-électrique, hydrodynamique, plaine de Berrechid.

Abstract. In the Settât Ben Ahmed plateau, the interpretation of geological and geophysical data allowed as to highlight the existence of new boundaries between this plateau and the Berrechid plain. The geometry of geological units shows a deepening of the Cretaceous series toward the NW, this may be explained by the existence of flexures and/or faults in the transition zone between the Settât Ben Ahmed plateau and the plain of Berrechid. These fractures are parallel to those affecting the Paleozoic basement. These results open new perspectives for the reconstruction of the tectonic events in the Settât Ben Ahmed plateau and their relationship with the Paleozoic accidents. They also provide new evidence for understanding water movement between the Cretaceous aquifers between Ben Ahmed Settât and Berrechid.

Keywords : Settât flexure, electric sounding, geo-electric section, hydrodynamic, Berrechid plain.

Abridged English Version

The study area is located in central Morocco, between Ouled Saïd and Jamâa Riah (Fig. 1). This transition zone is limited in the east and south by the "plateau des phosphates", in the north and north-east, by the Mdakera Hercynian terrains and Berrechid basin and in the west by the Ouled Saïd Jurassic outcrops (Fig. 1). In this work, the objective of the geophysical approach is to depict 2D Cenomanian limestone variations and characterize the structures (folds and/or faults) in the Cretaceous and recent deposits. Our ultimate goal is to understand the hydro-geological relationship between the plain Berrechid and the plateau of Settât.

Geophysical studies results

Comparative analysis and quantitative interpretation of vertical electrical sounding (VES hereafter) calibrated with hydrogeological drilling shows the existence of several geo-electrical levels varying in thickness and resistivity depending on the area along the transition zone; from the bottom to the top (Fig. 3):

- The base is constituted by two electrically resistant levels (R3, R2) and an electrically conductive horizon (C2) (Fig. 3). R3 represents the electrical Paleozoic schist unit; this is covered either by some alteration layers, or by clays of the Triassic and the Infra-Cenomanian formations, which

are represented by the conductive level (C2) in the "plateau des phosphates". Geoelectrical horizon R2 is assigned either to the Cenomanian limestone layers in the Settât plateau or to sandy limestones and Pliocene sandstones in the plain of Berrechid.

- These three levels are covered by a geoelectrically conductive level (C1) corresponding to marls or Cenomanian clayey marls in the plateau or to Quaternary clays and clayey marls in the Berrechid plain;

- An electrically resistive R1 level that can be attributed to limestone or marly limestone layers of Cenomanian age and a limestone crust of Quaternary age in the plain. The geoelectric sections highlight the behavior of levels revealed by quantitative inversion of VES. They detect a variable attitude of the Cretaceous cover with numerous 'compartments' and/or gentle folds under the effect of faulting; three styles along the transition zone can be identified based on these results:

Triassic normal faulting effects

The correlation of hydrogeological drilling data and geoelectric levels (Figs. 1–4) shows that the Triassic and Infra-Cenomanian series are very thin at the Settât plateau (Figs. 4–5), but they thicken towards the Berrechid plain. To clarify the geometry of the Cenomanian electrical horizons of a part of the transition zone, a computed tomography was performed (Fig. 5b). Preliminary results indicate thickening

to the SE of the Cenomanian and Infra-Cenomanian geoelectrical horizons; this would be in favor of the existence of extensive intra-Cretaceous syn-tectonic sedimentation, despite the slightly marked undulation of the Cenomanian limestone crust along the transition zone (Figs. 5–6). The subsurface structural map established on the basis of the interpretation of various VES (Figs. 4–5, 9) shows that the flexure of Settât is emplaced in the NE of the study area, directly above inherited Triassic normal faults whose activity is expressed on the cover until the Cenomanian.

Recent fracturing in Oued Tamdrost- Oued Boumoussa sector

The passage through the northern boundary of the transition zone (Fig. 6) is abrupt and is expressed by a cliff bounding the plateau at the north of Settât. Here, Infra-Cenomanian deposits are covered only by a Quaternary layer to the north (Figs. 4–6). Geoelectric sections highlight a mismatch of Cenomanian formations between the transition zone and the plain of Berrechid. In addition, the electrically resistive level (R2) is thinner than the first zone, and the undulations of the Cretaceous cover are less marked in this area, except that to the SSE individualizes a cuvette, which is the expression of the intersection flexure with the Settât fault (Fig. 6). Computed tomography confirmed, for this cross section, deeper Cretaceous under the Pliocene-Quaternary and the existence of a bowl shaped basin in the transition zone (Fig. 6).

Tabular geometry of the cover in the sector Oued Boumoussa Oued Sekhane

To the SW of the study area, interpretation of VES completed by the data collected from the geological map and boreholes allowed us to suggest that the Cretaceous and Plio-Quaternary series are subject to numerous vertical movements, which would be due to the “vertical” faults. Three blocks were distinguished (Fig. 8); the first, in the northern plain of Berrechid, is dominated by a 14 m-thick electrically resistive formation, attributed to the Pliocene and Quaternary conductive clay, whose thickness varies between 50 and 60 m. The deposit of this interval is the thickest among the recent series of the Berrechid plain. The central and southern blocks are dominated by Cenomanian calcareous marl and marly-limestone deposits, which cover an electrically conductive clay, most likely attributed to the “Infra-Cenomanian” (Fig. 8), their configurations are generally subhorizontal. Computed tomography for this section confirms the existence of the blocks with facies lateral changes (Fig. 8).

Synthesis and discussion

Compilation of surface observations, drilling data and

their comparison with the results of geophysical interpretations enable the establishment of a new structural model in the zone between the plain of Berrechid and the Settât plateau (Fig. 9). It shows, on the one hand, some elements of the recent developments in the transition zone and allows; on the other hand, to propose hypotheses about the nature of water exchanges between aquifers of these two elements of Central Morocco.

The model shows the coexistence of numerous blocks distributed along major lineaments of the area (Fig. 9). All these structural elements seem to be blocked with an undulation recognized throughout the phosphate plateau. Fractures known or mapped in this work can be grouped into two systems (Fig. 9):

- The first system with two faults directions. The first (directed NNE-SSW) is parallel to the well known Hercynian direction (FOM: Flexure west mesétienne, FOTJ: Faille Oued Touijjine and FM: Mediouna fault).
- The second has a NE-SW direction. Both directions would be a component of the West Mesetian Shear Zone (WMSZ).
- The second system is sub-equatorial with a NW-SE direction, where the Settât fault (FS), the most important, borders the south transition zone.

At this stage of interpretation, and in the absence of structural elements indicating the true movements of different tectonic blocks, the results of this work, in addition to geomorphological and structural data (Beaudet 1969, Laville & Pique, 1991, El Yazidi, 2003), show that this area is a node, where tectonic Paleozoic and Atlantic lineaments interfere, generating high and low areas, which are regularly distributed along major lineaments. It follows, hydrogeologically, that drainage between the two entities, at least at the contact area, is not done by direct abouchement, but it is realized according to main river following the structures (zones high and low) fractured limestone of the Cenomanian.

Conclusion

In this work, we discussed the establishment of a geological model explaining the relationship between the Settât Ben Ahmed plateau and the Berrechid plain. This model shows:

- The existence of a series of fractures with different directions. The major flexure is associated to a mosaic of high and low areas regularly distributed.
- The existence of normal faults affecting the Upper Cretaceous series can be attributed either to an extension or to a deep detachment fault (at the base of the Triassic series); normal faults will, therefore, be readjustment faults.

The new model opens new perspectives for the comprehension of water circulations in the aquifer's transition domain.

INTRODUCTION

La zone d'étude est située, sur la transversale s'étendant entre Ouled Saïd et Jamâa Riah (Fig. 1). Cette zone de transition entre le plateau de Settât et la plaine de Berrechid

est limitée, à l'est et au sud, par le plateau de Settât Ben Ahmed, au nord et au nord-est, elle est limitée respectivement par le bassin de Berrechid et le massif hercynien du Mdakera, alors qu'à l'ouest, elle est limitée par les affleurements jurassiques d'Ouled Saïd. Le plateau de Settât

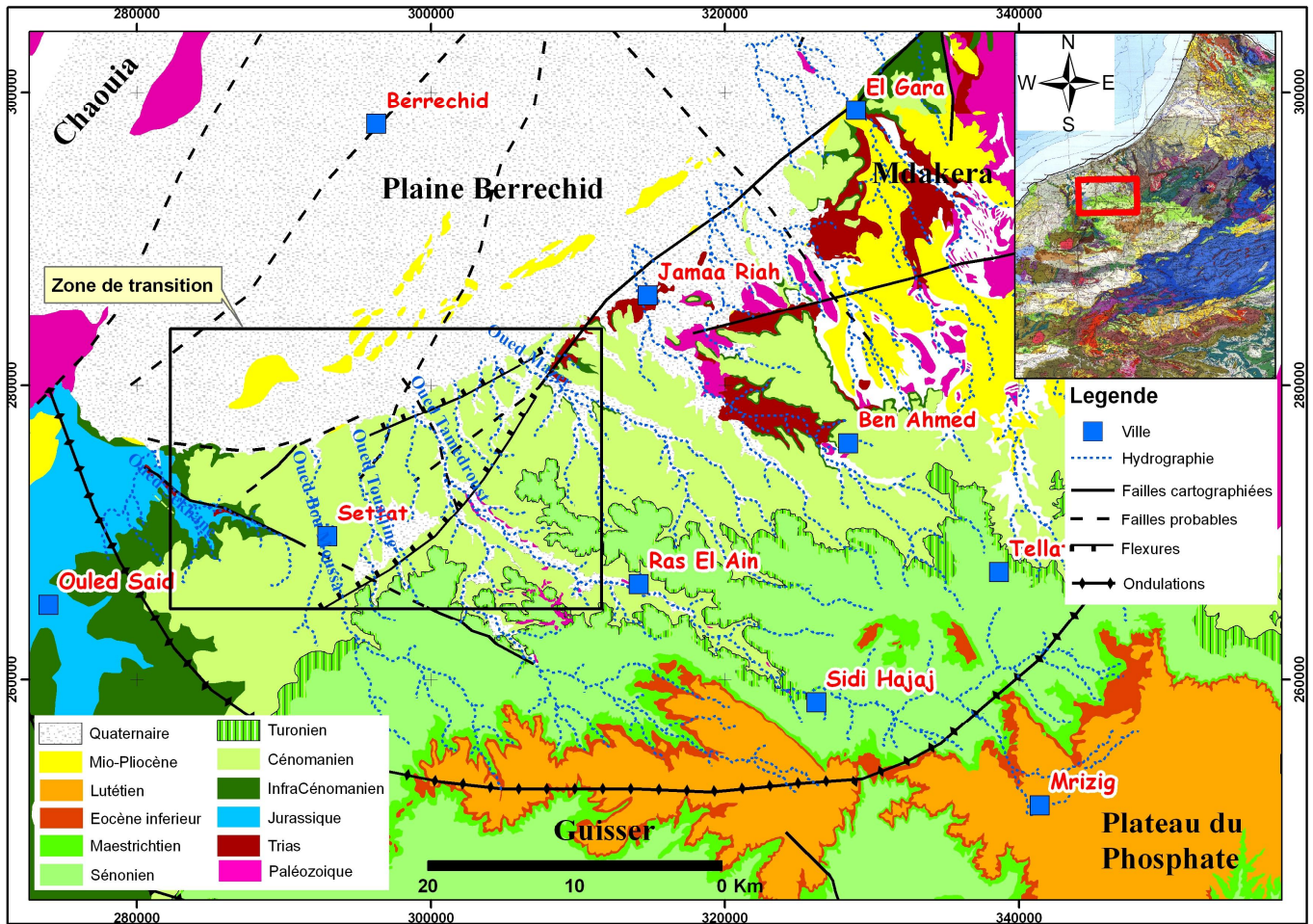


Figure 1. Carte géologique et structurale du plateau de Settat Ben Ahmed (Choubert 1959, Gigout 1950), projection Lambert Maroc Nord (Zone1) Dutum Merchich Maroc.

Figure 1. Geological and structural Map tray Settat BenAhmed, (Choubert, 1959, Gigout, 1950), Lambert projection Northern Morocco (Zone1) Dutum Merchich Morocco.

Ben Ahmed fait partie du plateau des phosphates, ensemble sub-tabulaire à double pendage vers le SE et le NW (Salvan 1950). Le plateau de Settat Ben Ahmed fait partie du plateau des phosphates, ensemble sub-tabulaire à double pendage vers le SE et le NW (Salvan 1950). Les dépôts crétacés qui le couvrent sont à cheval entre deux domaines, le Maroc central et les Rhamena, à structuration hercynienne complexe et polyphasée (Michard *et al.* 2008; EL Hassani 1994) (Fig. 1). La plaine de Berrechid, prolongement naturel de la zone d'étude vers le Nord et vers le Nord-Ouest, est en fait, une cuvette qui fait partie du grand bassin triasique de Berrechid-El Gara-Ben Slimane, partie intégrante de la Meseta occidentale. Il semble relever d'une structure en demi-graben de direction N-S à NE-SW similaire à celle des structures majeures hercyniennes (Lyazidi 2003). Le remplissage sédimentaire y est composé de dépôts détritiques du Trias et mixtes (détritiques et chimiques) de l'Infra-Cénomanién et du Cénomanién, formant un prisme sédimentaire elliptique dont le grand axe est orienté SW-NE sur une soixantaine de kilomètres (El Mansouri 1993). A l'Ouest, le bassin de Berrechid se prolonge vers le bassin côtier de la Chaouia.

Les reconstitutions paléogéographiques du Maroc central mettent en évidence l'existence, au cours du Crétacé, d'un

golf à obédience atlantique (Frizon de Lamotte *et al.* 2008). L'individualisation des deux unités limitrophes de la zone d'étude (plateau des phosphates et plaine de Berrechid) a débuté au Lutétien, avec la formation d'un bombement de fond au niveau du plateau des phosphates qui s'est accentué au cours du Miocène (Ettazarini 2002). Il en a résulté la séparation nette entre les deux entités par l'intermédiaire d'une flexure dite Flexure de Settat (Laville & Piqué 1991). En raison de leur géomorphologie, leurs colonnes lithologiques ne sont connues qu'à travers les forages hydrogéologiques et les rares affleurements observés le long des oueds. L'absence d'éléments structuraux de surface exclut toute tentative de caractérisation de ces unités à partir des méthodes de géologie de surface, caractérisation qui permettrait d'établir les modalités de transition entre le plateau de Settat-Ben Ahmed et le bassin de Berrechid.

Du point de vue hydrogéologique, les aquifères du plateau de Settat-Ben Ahmed sont hétérogènes à cause des variations de faciès et de la structuration de la couverture en zones de failles et/ou de flexures associées à l'exhaussement des niveaux aquifères vers le NW du plateau sous la plaine de Berrechid (Archambault *et al.* 1975) où les écoulements souterrains s'effectuent dans des terrains variés qui peuvent

être des tranches altérées et des réseaux de fissures dans les schistes et quartzites du Primaire, quelques niveaux de Trias et d'Infra-Cénomaniens, ou même dans les formations marno-calcaires du Cénomaniens, et les formations gréseuses conglomératiques du Plio-quaternaire (Ruhard 1975).

Les écoulements souterrains à travers les limites du plateau de Settat-plaine dépendent de l'évolution structurale du bassin et du plateau ainsi que de la nature du contact entre des terrains constituant les deux domaines, contact non encore complètement établi. Pour cette raison, nous visons dans le présent travail, l'établissement d'un schéma structural expliquant les relations entre le plateau de Settat Ben Ahmed et la plaine de Berrechid. Ce schéma permettra de préciser (1) les modalités de transition géologique entre les deux unités, (2) la distribution des éléments structuraux et (3) les styles possibles d'alimentation des aquifères de la plaine de Berrechid à partir du plateau de Settat.

MATERIEL ET METHODES

L'utilité de la prospection électrique dans la mise en place des structures de faibles profondeur est actuellement bien établie (Asfahani *et al.* 2011), elle est basée sur la mesure du potentiel électrique, résultat de l'application d'un courant électrique dans le sous-sol. Les levés de résistivité s'effectuent moyennant un dispositif quadripôle à distance inter-électrodes croissante (Sondages Electriques Verticaux, SEV) (Telford *et al.* 1990). L'interprétation des SEV n'est pas unique en raison des principes connus "d'équivalence" et de "suppression" (Dobrin 1976). Les données des SEV individuels sont utilisées, ensuite, pour établir des tomographies calculées à partir des résistivités électriques (Riss *et al.* 2008, Harmouzi 2010).

La procédure générale d'une telle démarche consiste à l'établissement des cartes interpolées par krigeage horizontales des résistivités apparentes à différents écartements (AB/2), desquelles on échantillonne des valeurs de résistivité à un pas de 20 m pour différentes profondeurs. Des tableaux de données fournissent des profondeurs efficaces (Z_e) correspondant à différents (AB/2) et calculées pour les dispositifs Schlumberger et Wenner-Schlumberger. La profondeur efficace (Z_e) donne une idée approximative sur la vraie profondeur, la plus proche de celle représentée par une distance (AB/2) donnée pour le dispositif Schlumberger. L'erreur sur la profondeur efficace est calculée, elle doit être la plus faible possible (cf. annexe).

Pour tous les dispositifs la profondeur efficace dépend d'une constante "K" représentant le niveau de profondeur sur lequel on désire effectuer les calculs et d'un produit $q \cdot a$, (q est un coefficient multiplicatif variant de 1 à 6, a distance inter-électrode) (cf. annexe). L'inversion fournit un modèle de résistivité vraie en fonction de la profondeur (Loke 2004), la solution mathématique n'est pas unique, on choisit alors la solution présentant une erreur minimale.

Dans notre étude, les coupes de tomographie calculées, pour lesquelles la méthode d'inversion adoptée est celle des moindres carrées, ont été interprétées en parallèle avec les SEV. Ces derniers sont calés aux forages hydrogéologiques dont certains niveaux sont bien datés (Figs. 5, 7). L'objectif de l'approche géophysique est de donner une image de la variation géométrique en 2D des niveaux calcaires du

Cénomaniens, ainsi que la caractérisation des structures (ondulations et/ou failles) dans ces formations. La base de données géophysiques que nous avons constituée consiste en l'établissement de 75 S.E.V de longueur de ligne atteignant $AB = 1000$ m, dont l'interprétation quantitative fournie des coupes géo-électriques de direction NW-SE et 3 coupes de tomographie calculées (Fig. 4). Il est à noter que l'irrégularité de la topographie et la proximité de certaines zones urbaines (cas des coupes des figures 5–7) ont empêché d'effectuer des SEV rapprochés.

CADRE GEODYNAMIQUE ET HYDROGEOLOGIE

L'évolution géodynamique au cours du Mésocénozoïque de la zone d'étude et des régions voisines est polyphasée. Des failles extensives synsédimentaires et une activité magmatique basique du domaine mésétien, liées à l'ouverture de l'Atlantique, sont connues au Trias (Michard 1976). Elles sont le résultat d'une distension triasico-jurassique NW-SE et NE-SW bien décrite dans les régions voisines (Saidi & Tahiri 2002; Echarfaoui 2003).

Au Jurassique, par contre, la Meseta a subi un soulèvement généralisé qui s'est accentué vers la fin du Dogger, l'érosion des terres émergées a alors favorisé l'alimentation des aires disponibles à la sédimentation par des éléments détritiques (Michard 1976). Il semble que ce soulèvement soit l'un des événements tectoniques majeurs qui aient affecté le plateau de Settat et la plaine de Berrechid. L'histoire finie mésozoïque et cénozoïque se résume en une suite de régressions et de transgressions (Choubert & Faure-Muret 1960), reconnues sur l'essentiel de la Meseta et le plateau des phosphates, au Crétacé notamment à l'Infra-Cénomaniens et au Cénomaniens. Le plateau des phosphates faisait partie, ainsi, d'un vaste golfe intracontinental, golfe septentrional, situé à l'emplacement actuel de la zone couvrant le plateau des phosphates, les régions de Timahdite, d'El Youssoufia et de Ben Guérir (Boujo & Rahhali 1971). Au Tertiaire, l'exondation est presque totale à partir de l'Eocène moyen (Beaudet 1969; Archambault *et al.* 1975), le soulèvement du centre du plateau, au Lutétien, empêche toute sédimentation ultérieure. Il a été le siège de découpage par failles en une mosaïque de bassins et de massifs inégalement surélevés et coulissant plus ou moins les uns contre les autres. De multiples failles existent mais sont difficiles à mettre en évidence, du fait de leurs rejets modestes ou du manque de niveaux repères caractéristiques (Mridekh *et al.* 2011).

LITHOSTRATIGRAPHIE

La stratigraphie du plateau des phosphates et de la plaine de Berrechid a été très étudiée (Gentil 1922, Russo 1933, etc.), les différentes formations stratigraphiques ont été bien datées (Salvan 1950, 1954, 1960, 1969; Arambourg *et al.* 1952; Archambault *et al.* 1975). Ainsi, sur les schistes et les quartzites du Paléozoïque, le Trias présente, dans la plaine de Berrechid et les bordures du plateau, une série transgressive volcano-sédimentaire à deux niveaux argilo-salifères séparés par un complexe basaltique (Michard 1976, Lyazidi 2003) (Figs. 2a, b, c). La série du Jurassique est continentale, et formée de couches d'argiles rouges remaniées, localisées dans la région d'Ouled Saïd à l'ouest

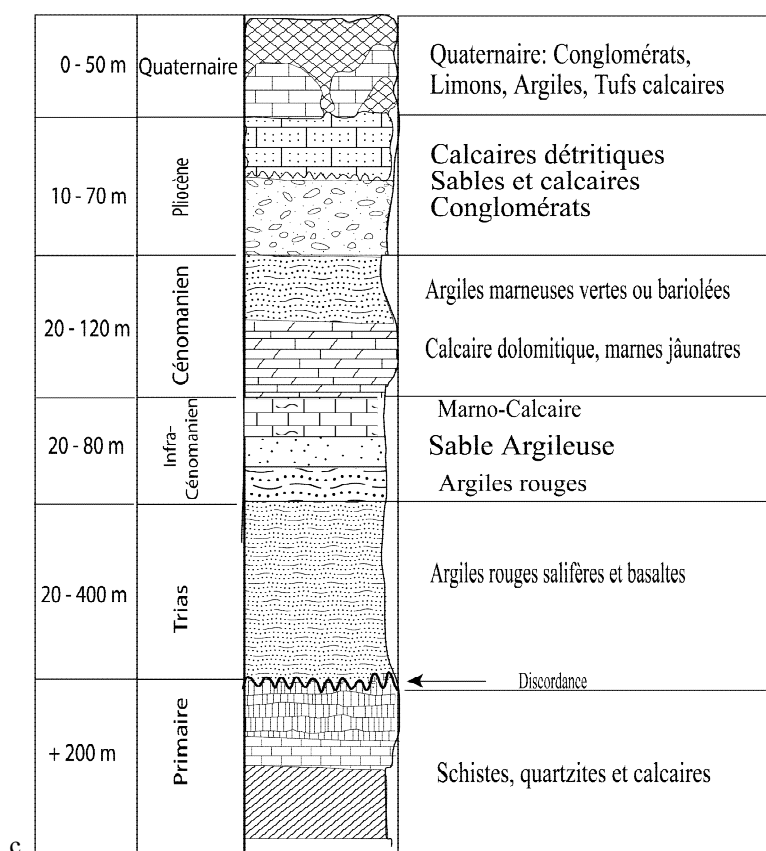
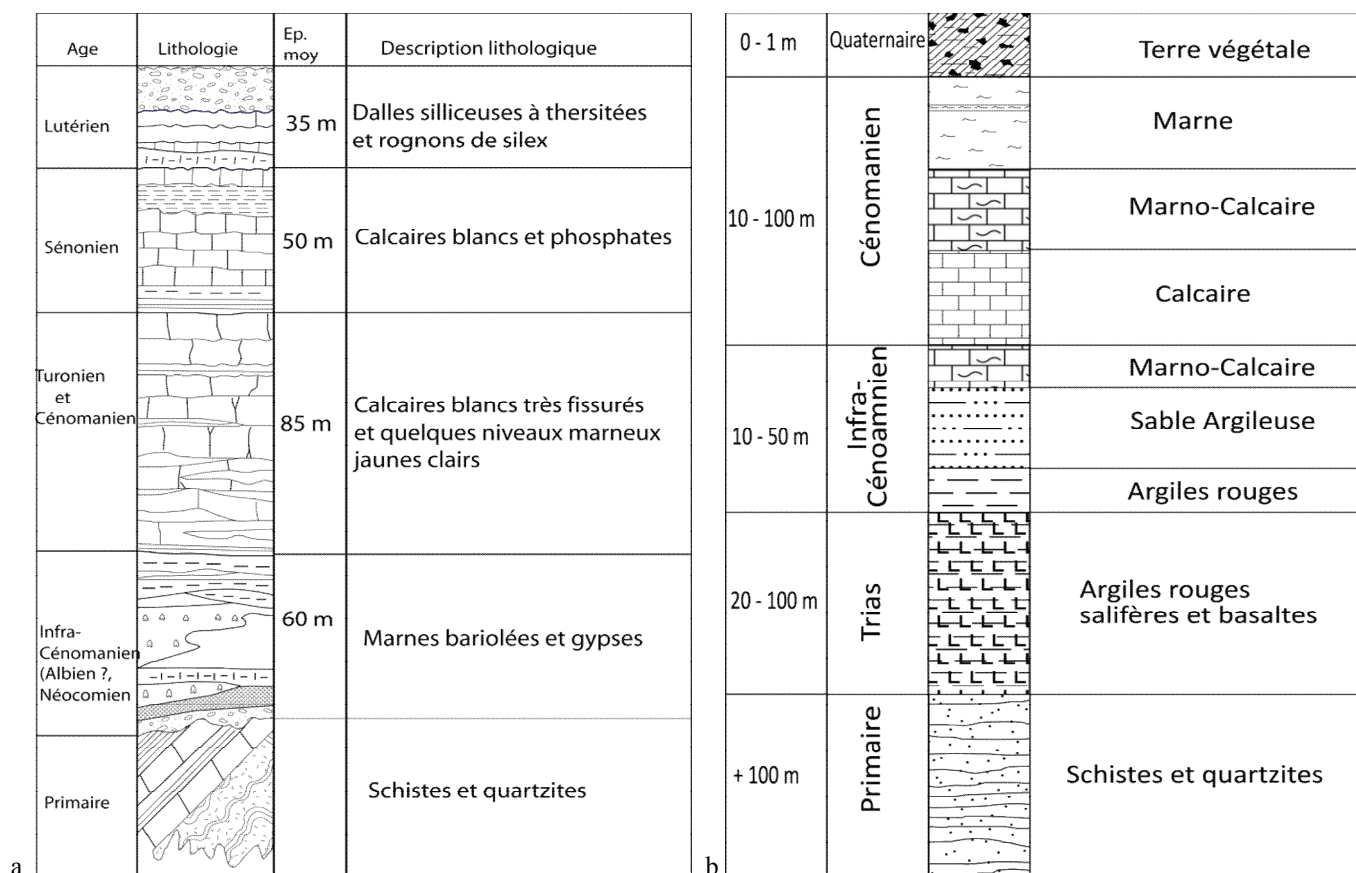


Figure 2. Logs stratigraphiques des trois zones, a : plateau phosphate, b : zone intermédiaire et c : plaine de Berrechid (d'après Bolleli 1952, Mansouri 1993).

Figure 2. Stratigraphic logs of the three areas, a: plateau phosphate, b: intermedimediate area, c: plain Berrechid (after Bolleli 1952, Mansouri 1993).

et au sud-ouest de Settât (Gigout 1950), elle est absente partout ailleurs. En conséquence, les calcaires de l'Infra-Cénomanien et du Cénomanien (Termier H. & Termier G. 1951, Michard 1976), subhorizontaux et à caractère transgressif, reposent en discordance soit sur le socle paléozoïque du plateau (Fig. 2a), soit sur les argiles rouges du Trias de la plaine de Berrechid (Fig. 2c). Les lithofaciès de l'Infra-Cénomanien du plateau sont représentés par 10 à 60 m de marnes bariolées, de grès rouges et de gypse, en discordance sur le Trias ou le Primaire (Archambault *et al.* 1975). Ils résultent de plusieurs pulsations marines du Crétacé. Les dépôts du Cénomanien, sont exclusivement chimiques et sont représentés par une alternance de marnes souvent gypseuses et de marno-calcaires jaunes (Archambault *et al.* 1975) (Figs. 1–2b). Le Cénomanien affleure largement sur le plateau de Settât Ben Ahmed, il s'agit de formations marno-calcaires diaclasées et aquifères. La large fissuration des formations du Cénomanien réduit le ruissellement, d'où un coefficient d'infiltration élevé, ainsi les eaux infiltrées dans les calcaires du Cénomanien ont trois destinées principales ; la constitution de nappes, l'alimentation latérale des nappes phréatiques et des underflows d'oueds, ou bien des sources.

Le Turonien est formé de faciès calcaires et marneux très épais, formant une dalle fissurée caractéristique du plateau des phosphates (Salvan 1954) (Figs. 1–2a). A la fin du Crétacé (Sénonien) la réduction des influences marines s'exprime par la dominance des faciès marno-gréseux à marno-calcaires caractéristiques des milieux littoraux confinés (Salvan, 1954). Les phosphates marneux du Maestrichtien, sont surmontés par des faciès fins variés (marnes phosphatées et phosphates sableux) de l'Eocène (Ettazarini 2002). Les dépôts du Mésozoïque se terminent par la série phosphatée dans la région de Sidi Hajjaj. Le Quaternaire se localise essentiellement dans la plaine de Berrechid, dans la vallée de l'Oued Ahmer et de l'Oued Tamdrost (Termier H. & Termier G. 1951) (Figs. 1–2c) où il est recouvert par des limons subactuels à actuels. La base de la série de cette époque est formée par un niveau plus ou moins conglomératique surmonté par des argiles rouges limoneuses à galets et graviers (El Mansouri 1993).

RESULTATS DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE

L'analyse comparée des sondages électriques verticaux calés aux forages hydrogéologiques (Figs. 3a, b, c; 4) montre l'existence de plusieurs niveaux électriques (Fig. 3) variant en épaisseur et en résistivité selon les zones, ils comportent de la base au sommet :

- Un ensemble résistant composé de deux niveaux électriquement résistants (R3, R2), intercalés avec un niveau électriquement conducteur C2 (Fig. 3a, b, c). L'horizon électrique R3 sur la figure 3a, représentant les schistes paléozoïques, est recouvert soit par les niveaux d'altération de ces mêmes schistes soit par les dépôts du Trias ou de ceux de l'Infra-Cénomanien. Sur le plateau des phosphates, la faible profondeur, en certains endroits, du niveau paléozoïque a permis de se faire une idée sur la valeur de résistivité de ce socle (Mridekh *et al.* 2011), elle atteint une valeur d'environ 1300 Ohm mètre [$\Omega \cdot m$]. L'horizon électrique R2 est attribué soit à des couches calcaires du Cénomanien pour les sondages situés sur le plateau (Fig. 3a), soit à des calcaires gréseux et grès d'âge pliocène pour

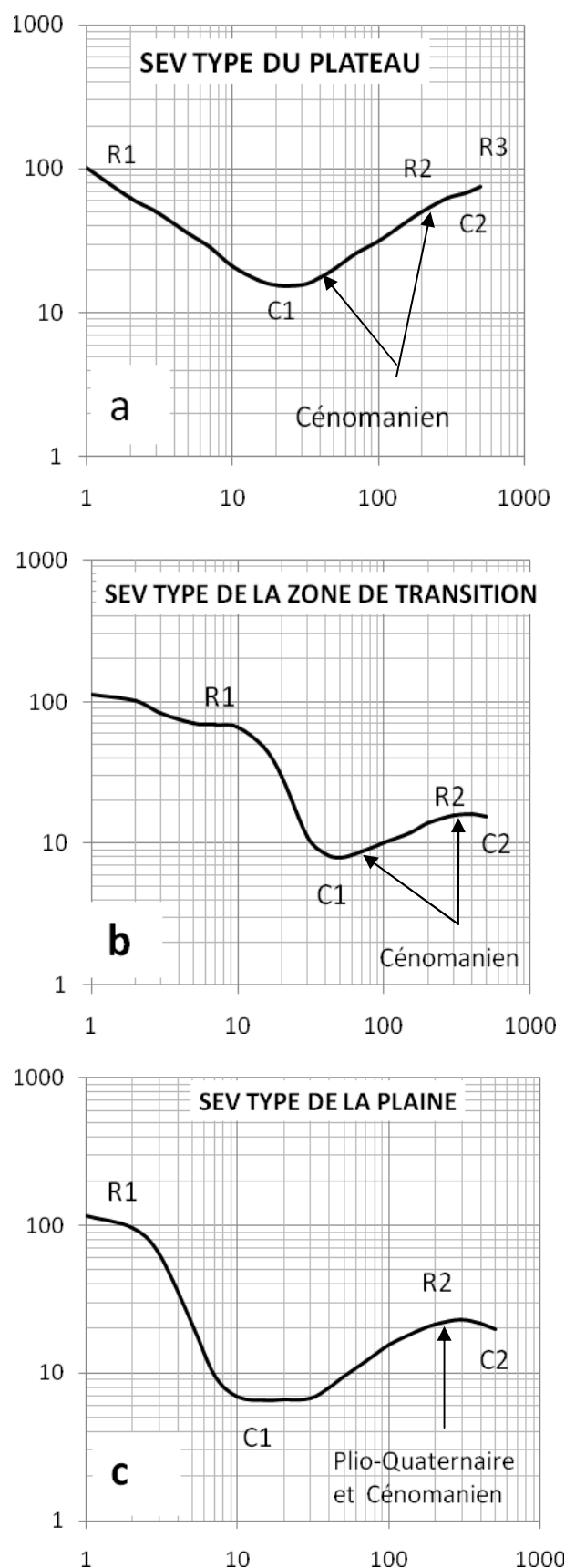


Figure 3. Diagrammes caractéristiques des différentes zones (a : plateau des phosphates, b : zone de transition, c : plaine de Berrechid).

Figure 3. Diagrams characteristics of different areas (a: phosphates plateau, b: transition zone, c: Berrechid plain).

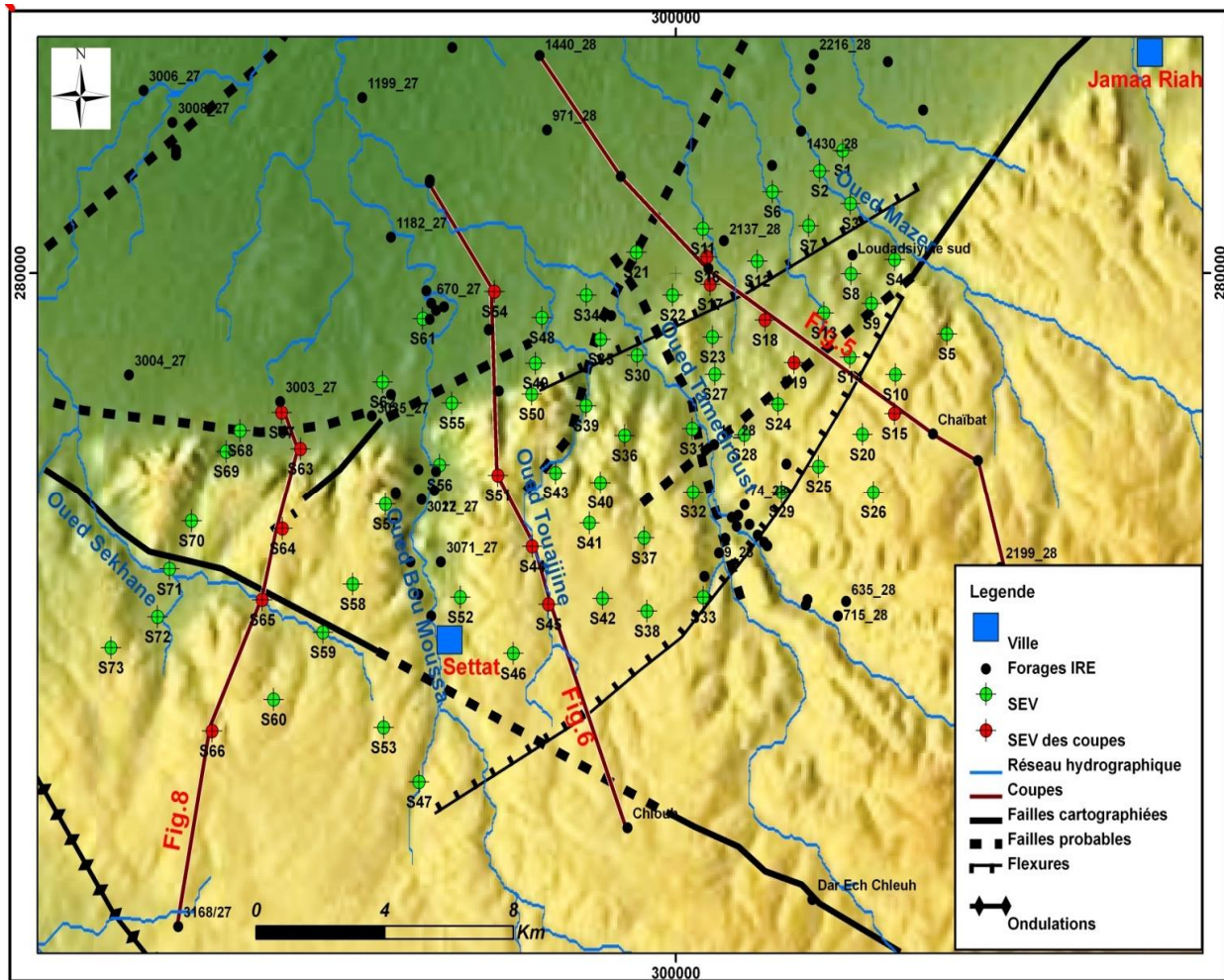


Figure 4. Carte de localisation des coupes litho-géo-électriques.

Figure 4. Location map of litho-geo-electrical sections.

ceux qui sont situés dans la plaine de Berrechid (Fig. 3c). Ces deux formations ont la même expression électrique, leur distinction ne se fait que par comparaison avec les données de forage ;

- Un niveau électriquement conducteur (C1) d'épaisseur pouvant atteindre les 35 m correspond à des marnes ou à des marnes argileuses du Cénomanien dans le plateau ou à des argiles et marnes argileuses quaternaires dans la plaine ;

- un niveau électriquement résistant R1 d'une épaisseur moyenne de 7 m pouvant être attribué à des couches calcaires ou marno-calcaires d'âge cénomanien ou à une croûte calcaire du Quaternaire dans la plaine.

Les coupes géoélectriques de direction N-S et NW-SE (Figs. 5–7) font ressortir l'allure des niveaux géo-électriques mis en évidence par l'inversion des SEV. On y décèle un comportement variable de la couverture crétacée par un compartimentage et/ou des ondulations sous l'effet du jeu des failles ; trois styles de transition entre le plateau de Settat et la plaine de Berrechid peuvent ainsi être mis en évidence en se basant sur ces résultats.

Transition sous l'effet des failles normales triasiques au NE de la zone d'étude

Dans le secteur Oued Mazer-Oued Tamdrost (Figs. 1–4), la corrélation des données de forages hydrogéologiques et

des niveaux géoélectriques montre que la série mésozoïque, est essentiellement, marquée par l'absence (ou du moins la réduction drastique des épaisseurs) de la série triasique et infra-cénomanienne au niveau du plateau (EL Yakoubi 2006) (Figs. 1–5a) et leur épaissement en direction de la plaine.

La configuration des dépôts triasiques serait ainsi l'expression d'une sédimentation syntectonique dans la zone de transition (Figs. 1–5) dont les effets semblent se poursuivre dans la couverture crétacée. Afin de préciser la géométrie des horizons électriques du Cénomanien dans la zone de transition, une tomographie calculée a été réalisée (Fig. 5b). Les résultats préliminaires indiquent, en dehors d'anomalies profondes qui ne seraient que des artéfacts de calcul, l'existence d'épaississements vers le SE des horizons électriques du Cénomanien et de l'Infra-Cénomanien, ceci serait en faveur d'une tectonique extensive synsédimentaire intra-crétacée, en dépit de l'existence d'ondulations peu marquées de la croûte calcaire du Cénomanien en bordure de la zone de transition (Figs. 5a, b; 6).

La carte structurale de sub-surface établie sur la base de l'interprétation des différentes SEV (Figs. 4–5, 9) montre ainsi que la flexure de Settat est manifeste lors de son passage vers la plaine, au NE du secteur d'étude, à l'aplomb de failles normales héritées du Trias dont les effets s'expriment sur la couverture jusqu'au Cénomanien.

Traces de la fracturation récente dans le Secteur Oued Tamdrost-Oued Boumoussa

Au centre de la zone d'étude (Fig. 1), la limite septentrionale de la zone de transition (Fig. 6) est brusque et s'exprime par une falaise qui borde le plateau au nord de Settat. A ce niveau, les dépôts de l'Infra-Cénomaniens ne sont couverts que par une couche du Quaternaire vers le Nord (forage 1429/28) (Figs. 4–6). Les coupes géoélectriques mettent, de plus, en évidence, l'existence d'un fort décalage des formations du Cénomaniens (Marnes et Calcaires) entre la zone de transition et la plaine de Berrechid. Un tel décalage confirmerait l'effet de la faille bordière en profondeur.

Les ondulations de la couverture crétacée sont moins marquées dans cette zone, sauf que vers le SSE une cuvette s'individualise, qui serait l'expression du croisement de la flexure avec la faille de Settat (Fig. 6).

La tomographie calculée pour cette coupe confirme l'approfondissement du Crétacé sous le Plio-quaternaire et l'existence d'une cuvette dans la zone de transition (Fig. 6). L'analyse comparée des sondages sur les deux coupes (Figs. 6–5) permet de noter que la position du niveau résistant R2 subit une migration en profondeur. Les SEV (51 et 45) de la partie centrale (Fig. 7) semblent décrire ce niveau dans une

situation relativement proche de la surface. Sur les SEV (15 et 19) parallèles (Fig. 7), situés plus au NE, le R2 est relativement plus profond et la couverture est plus épaisse. Ceci permet de proposer une très probable remontée de la formation résistante R2 du NE vers le SW et, par la même occasion, l'existence possible d'une faille NW-SE le long de l'oued Tamdrost (Fig. 9).

Géométrie tabulaire de la couverture et épaissement du Plio-Quaternaire dans le secteur Oued Bou Moussa Oued Sekhane

Au SW de la zone d'étude, l'interprétation des SEV complétée par les données relevées de la carte géologique et des données de forages permet de noter que les séries sont soumises à des mouvements verticaux, qui seraient dus au jeu "vertical" des failles. Trois compartiments sont distingués (Fig. 8); un compartiment au nord dans la plaine de Berrechid, dominé par une formation électriquement résistante d'une quinzaine de mètres attribuée au Pliocène, et un conducteur argileux dont l'épaisseur varie de 50 à 60 m du Quaternaire. Le Plio-Quaternaire est la plus importante formation parmi l'ensemble de la série de la plaine de Berrechid, il constitue la couverture de la dépression de sidi El Aidi (El Mansouri 1993).

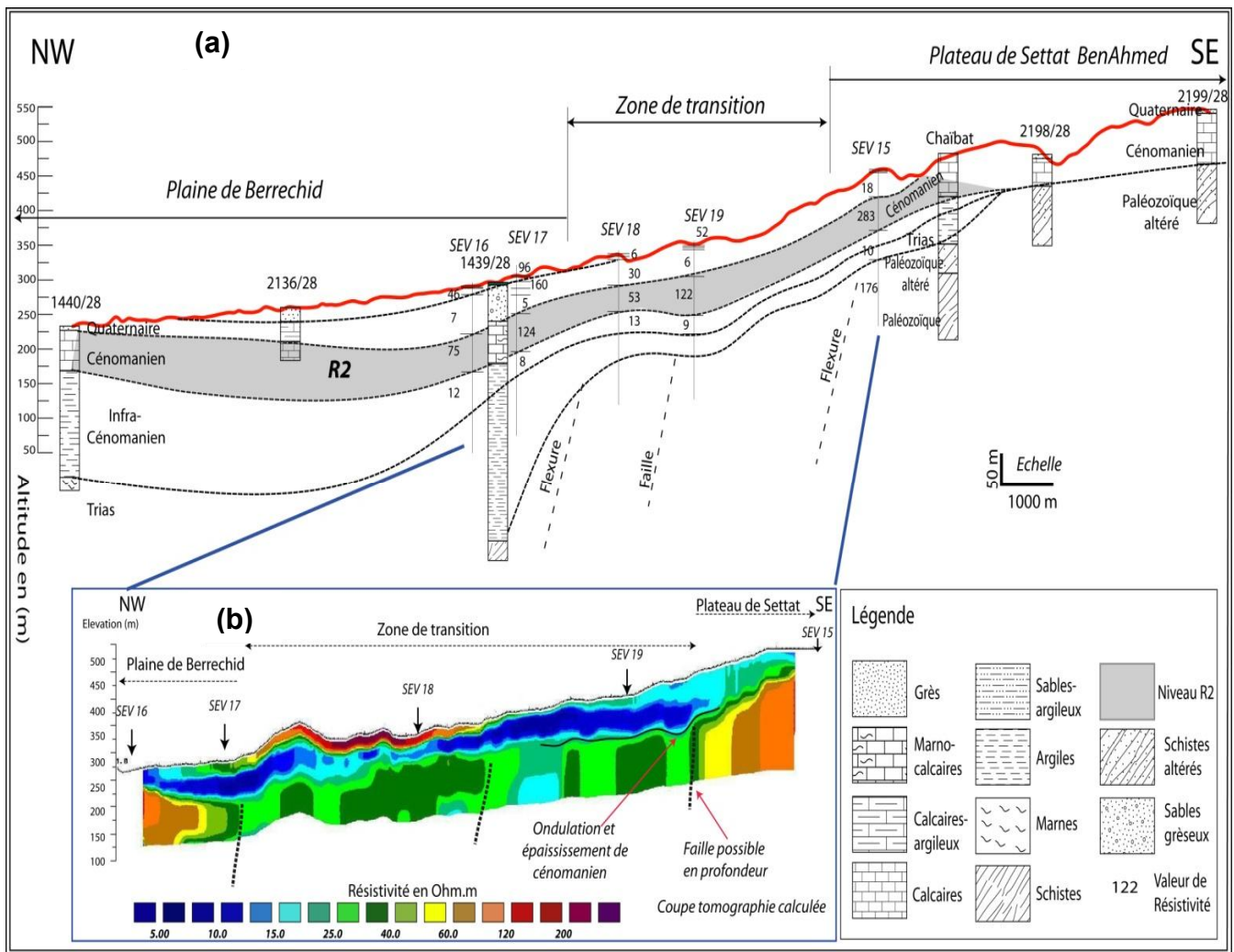


Figure 5. (a) : Coupe géoélectrique, (b) : coupe de tomographie calculée au NE de la zone d'étude.

Figure 5. (a) : Geoelectric section, (b) : section of calculated tomography (NE of the study area).

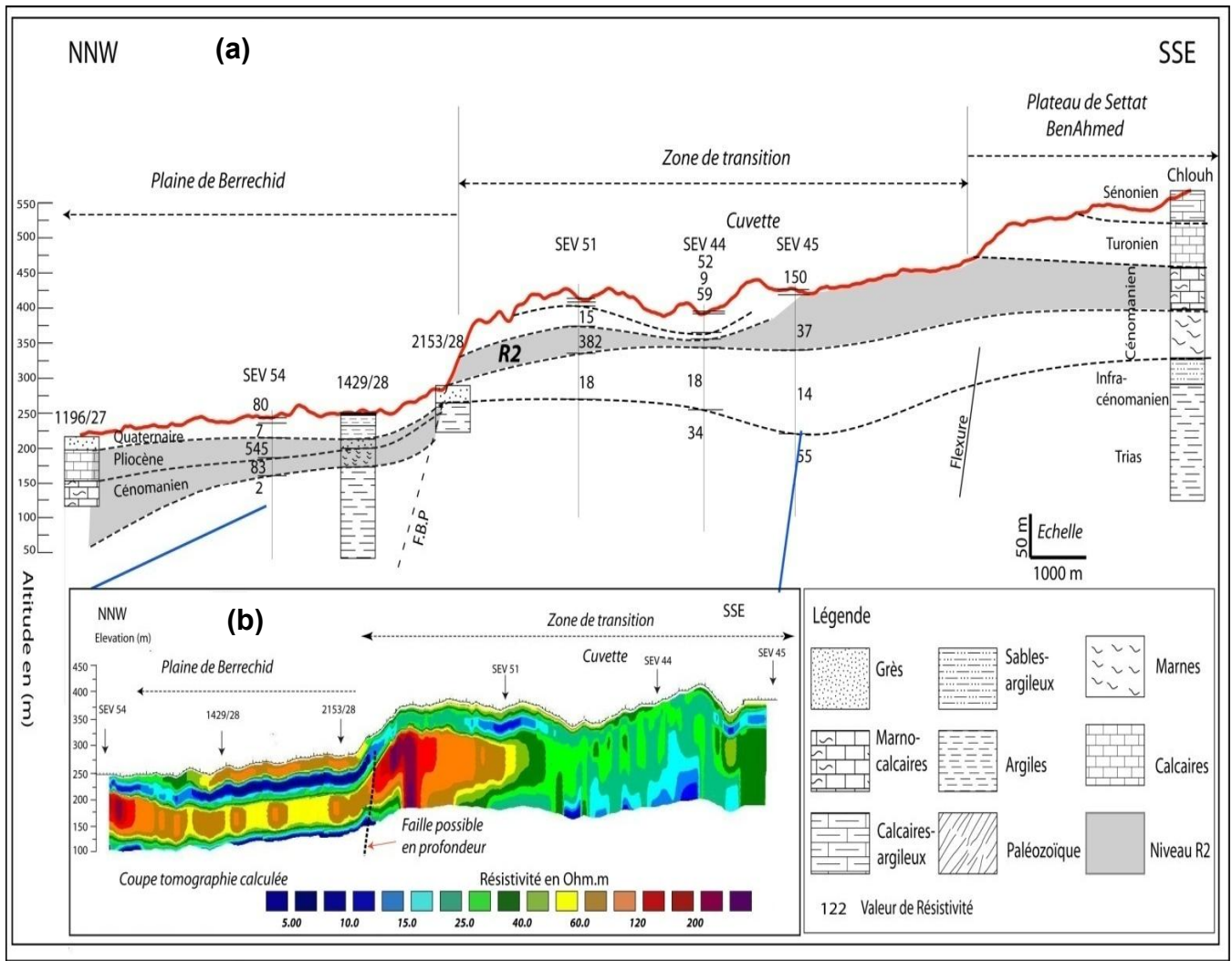


Figure 6. (a) : Coupe géoélectrique, (b) : coupe de tomographie calculée entre Oued Tamdrost et Oued Boumoussa.

Figure 6. (a) : Geoelectric section, (b) : section of calculated tomography between Oued Tamdrost and Oued Boumoussa.

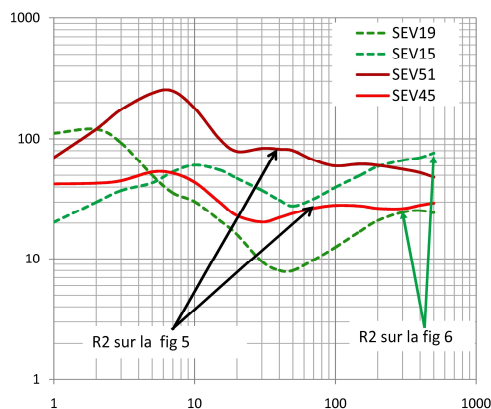


Figure 7. Comparaison des diagrammes des SEV entre la zone nord (coupe 1, Fig. 5) et Centre (coupe 2, Fig. 6).

Figure 7. Comparison of SEV diagrams between the northern zone (section 1, Fig. 5) and center (section 2, Fig. 6).

Les compartiments centres et sud au SO de la zone de transition sont dominés par des niveaux marno-calcaires, marneux et calcaires du Cénomanien, qui couvrent un conducteur argileux très probablement de l'Infra-Cénomanien et Jurassique. Leurs configurations sont sub-tabulaires (Fig. 8). La tomographie calculée pour cette coupe confirme

l'existence des compartiments sub-tabulaires en blocs et des variations latérales des faciès (Fig. 8).

SYNTHESE ET DISCUSSION

La compilation des données issues des analyses géologiques, des forages et leur confrontation avec les résultats des interprétations géophysiques a permis d'établir un schéma des éléments structuraux de la géologie de sub-surface de la zone de transition entre le plateau de Settat et la plaine de Berrechid (Fig. 9). La cartographie géophysique des éléments structuraux de la zone de transition entre le plateau de Settat et la plaine de Berrechid (Fig. 9) montre, ainsi, que dans ce domaine restreint, coexiste une mosaïque de compartiments (zone haute et basse) distribués le long des principales failles de la zone. Tous ces éléments géomorphologiques "buttent" sur une ondulation reconnue sur l'ensemble du plateau de phosphate (Mradek *et al.* 2011). Les fractures connues ou cartographiées dans le présent travail peuvent être groupées en deux systèmes (Fig. 9) :

Le premier système comporte deux familles. La première de direction NNE-SSW composée de fractures de direction hercynienne (FOM, Flexure ouest mesétienne, FOTJ, Faille Oued Touijjine, FM : faille de Mediouna....). Les affleure-

ments du Pliocène dans la plaine de Berrechid sont parallèles à cette famille (Fig. 1) et leurs configurations pourraient donc y être génétiquement liées. La deuxième famille de failles, oblique à la première, présente une direction NE-SW. Il semble que ces deux familles constituent l'une des composantes du système de la zone de failles Ouest mesétienne (ZFOM).

Le deuxième système de direction subéquatoriale à NW-SE, dont la plus importante est la faille de Settat (F.S), borde la zone de transition au sud. Les failles normales parallèles entre elles selon une direction moyenne N030°E, appartiennent probablement à l'une des familles de failles hercyniennes et plus spécialement à celle de la zone cisailée ouest-mesétienne au contact du môle côtier (Laville & Piqué 1991) et de la Meseta centrale (Piqué *et al.* 1979). Ce faisceau de failles représenterait des structures développées (horsts et grabens lors du jeu décrochant de la zone cisailée aux rejeux surtout normaux, lors de l'ouverture de l'Atlantique (Laville & Piqué 1991). Ces informations, ajoutées à celles relevées des données géomorphologiques (Beaudet 1969) (Flexure de Settat, allongement des zones basses, dépression de Sidi El Aidi et zone haute de Dhar Lahjar) permettent, à ce niveau de l'interprétation, et en

l'absence d'éléments structuraux indiquant les vrais mouvements des différents blocs tectoniques, de conclure que la zone de transition n'est pas une simple flexure où les séries plongent, sans déformation, depuis le plateau vers la plaine comme il a été jusqu'à présent admis (Archambault *et al.* 1975).

Il semble, au contraire, que cette zone est un nœud tectonique où interfèrent les linéaments paléozoïques et atlantiques générant les zones hautes et basses régulièrement distribuées le long des principaux linéaments. Il en résulte, du point de vue hydrogéologique, que le drainage entre les deux entités, au moins au niveau de cette zone de contact, ne se fait pas par abouchement direct mais il se réalise le long des principaux oueds et suivant les structures (zones hautes et basses) des calcaires fracturés du Cénomaniens. Ces nouveaux résultats constituent des nouvelles précisions aux idées des anciens auteurs selon lesquels, la variation de la nature physique de la limite entre le plateau et la plaine provoque une variation de flux qui transite le long de cette limite (Ferré & Hazan 1964). Selon le nouveau modèle ; les zones hautes, les zones basses et les zones de failles constituent des couloirs d'écoulements préférentiels entre les deux domaines.

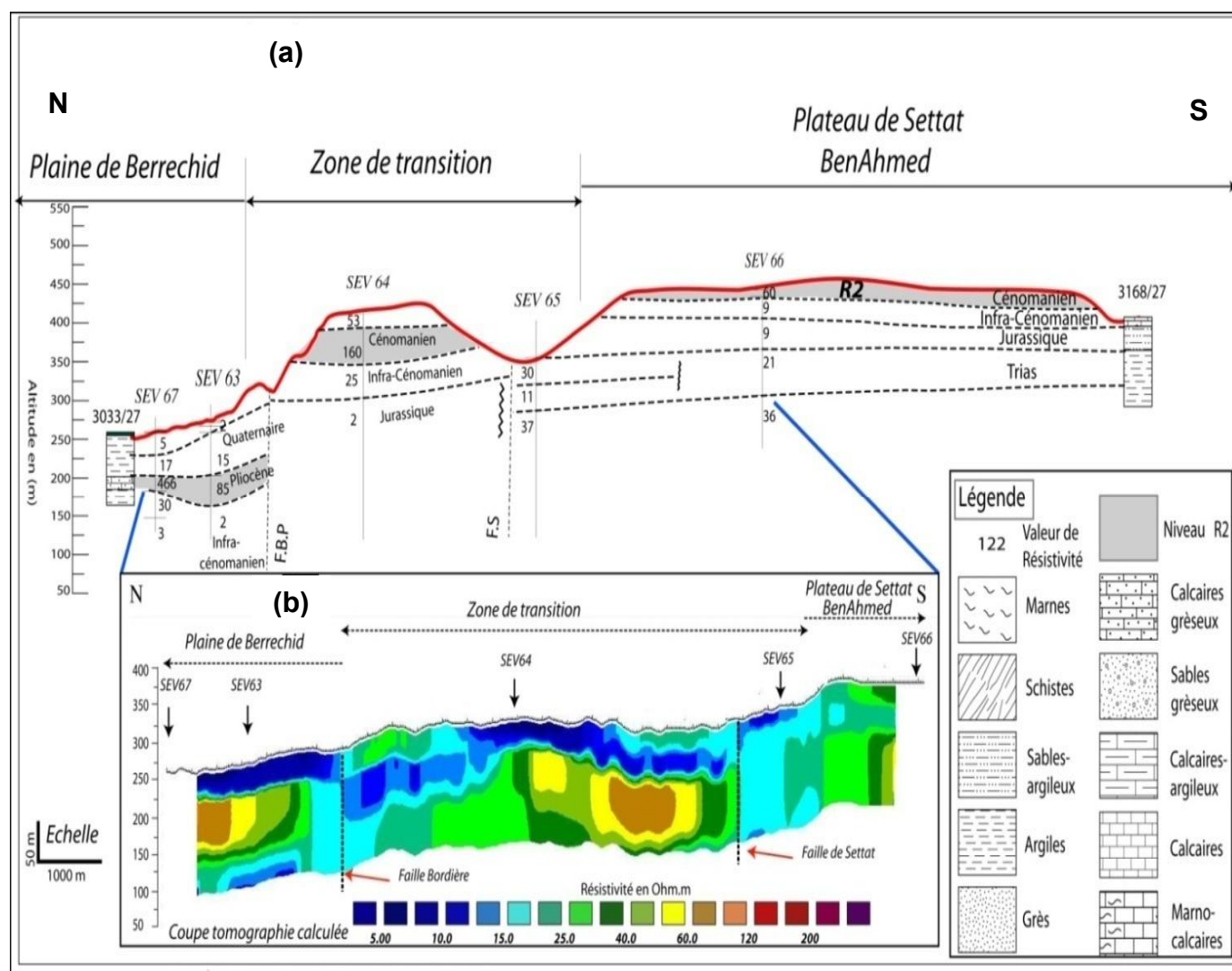


Figure 8. Coupe géoélectrique au niveau du site entre Oued Boumoussa et Oued Sekhana.

Figure 8. Géoélectric section at the site between Oued Boumoussa and Oued Sekhana.

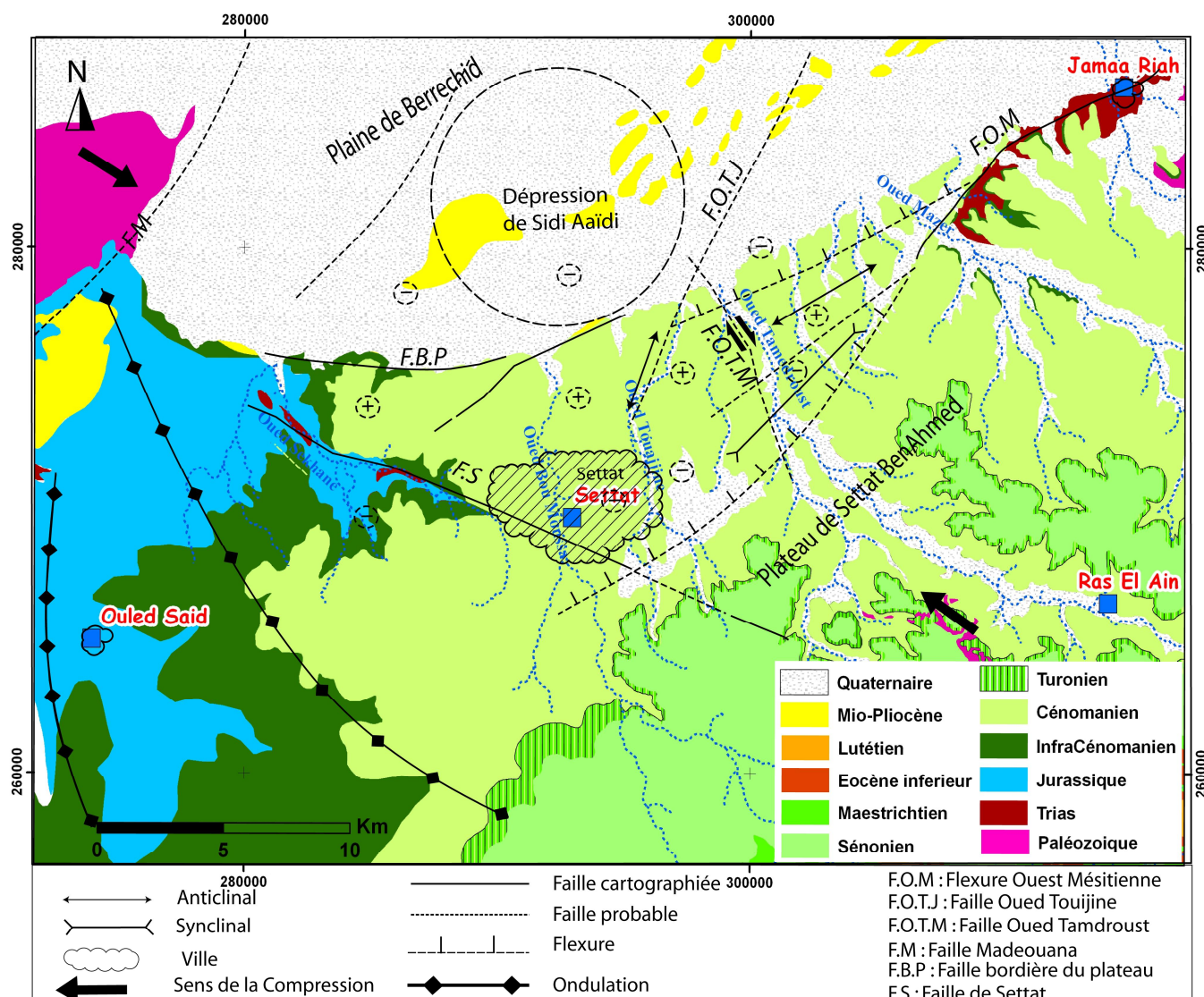


Figure 9. Fonctionnement dynamique de la zone de transition.

Figure 9. Dynamic function in the transition area.

CONCLUSION

Dans ce travail, il a été question d'établir un modèle géologique expliquant la relation entre le plateau Settât Ben Ahmed et la plaine de Berrechid. La confrontation des données d'affleurements, de forage et des données géophysiques permet de montrer que la zone de transition est affectée par une série de fractures de différentes directions, héritées de plusieurs phases de déformation ayant affecté le Maroc central. La phase ultime, phase atlasique connue par les ondulations qu'elle crée, semble se manifester par une flexure majeure et une mosaïque de zones hautes et zones basses régulièrement distribuées. L'existence de failles normales affectant la série du Crétacé supérieur peut être imputée soit à une extension n'ayant pas été compensée au cours de la phase atlasique, soit à un plan de chevauchement profond (à la base de la série triasique) ; les failles normales seront, en conséquence, des failles de réajustement.

En conséquence à cette structuration complexe, les circulations hydriques ne se font dans cette zone que par couloir le long des principaux oueds et les zones de faiblesse dans la zone de transition.

Ce modèle offre de nouvelles possibilités de conception des relations existant entre le plateau des phosphates et celui de Berrechid.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, et la Direction de la Recherche et la Planification de l'Eau pour avoir fourni les données sur les forages étudiés. Nous remercions également les évaluateurs de notre article Hakim Gabtni, Lahcen zouhri et un anonyme et le comité de rédaction du journal pour leurs commentaires constructifs, qui ont grandement contribué à l'amélioration du manuscrit.

ANNEXE

Le tableau de configuration Wenner-Schlumberger (Loke 2004), la profondeur efficace pour le Wenner-Schlumberger dépend de «K» et q*a (permet d'augmenter l'espace inter-électrodes pour augmenter la profondeur d'investigation)

$$L = (2k + 1) * qa$$

L représente la distance inter-électrodes

k level	$n = (2k+1)$	z_e/a	z_e/L
1	3	0.519	0.173
2	5	0.925	0.186
3	7	1.318	0.189
4	9	1.706	0.190
5	11	2.093	0.190
6	13	2.478	0.191
7	15	2.863	0.191
8	17	3.247	0.191

$q=1$ jusqu'à 6 coefficients multiplicatifs

La profondeur considérée est

$$\frac{z_{es} - z_{ws}}{z_{es}} = \text{erreur}\%$$

Avec :

z_{es} : profondeur efficace des sondages électriques de type Schlumberger.

z_{ws} : profondeur efficace de la tomographie de type Wenner-Schlumberger.

REFERENCES

- Arambourg C., Signeux J. & Bergonioux F.M. 1952. Les vertébrés fossiles des phosphates de l'Afrique du Nord. *Notes et Mémoires du Service. Géologique du Maroc*, 92, 396 p.
- Archambault C., Combe M. & Ruchard J.P. 1975. Le plateau des phosphates : ressources en eau. *Notes et Mémoires du Service. Géologique du Maroc*, 231, 239–258.
- Asfahani J., Radwan Y. & Layyous I. 2010. Integrated geophysical and morpho-tectonic survey of the impact of Ghab extensional tectonics on the Qastoon dam, Northwestern Syria. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 11, 2291–2311.
- Beaudet G. 1969. *Le plateau central marocain et ses bordures, étude géomorphologique (bordure sud-ouest et sud du plateau central)*. Thèse de Doctorat Lettres, Université Mohammed V, Rabat, 478 p.
- Boleli E. 1952. Plateau des phosphates "hydrogéologie du Maroc". *Notes et Mémoires du Service. Géologique du Maroc*, 77, pp. 197–204.
- Boujo A. & Rahhali I. 1971. Sur les microfaunes du bassin phosphaté crétacé-éocène des Ganntour (Maroc occidental), note préliminaire. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 31, 237, pp. 141–143.
- Choubert G. & Faure-Muret A. 1960. Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques. In : Livre-mémoire P. Fallût. *Service. Géologique de France*, 1, 447–527.
- Choubert M.G. 1959. La carte géologique du plateau du phosphate et la zone synclinale de Tadla au 1/200.000e. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, n° 137.
- Dobrin M.B. 1976. *Introduction to geophysical prospecting (3d 2d.): (A basic reference text that covers theoretical and practical aspects of the major surface geophysical methods, with emphasis on deep exploration)*. New York, McGraw - Hill, 630 p.
- Echarfaoui H. 2003. *Etude sismique du bassin des Doukkala-Abda. Déformation hercynienne précoce (Eovarisque) dans le socle et distension continentale triasico-liasique : implications géodynamiques*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Ibn Tofaïl, Kénitra, 308 p.
- El Hassani A. 1994. Tectonique de la Meseta nord occidentale. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 18, 107–124
- El Mansouri B. 1993. *Structure et modélisation quantitative de l'aquifère de Berrechid. Validation par l'approche géostatistique*. Doctorat de l'Université en géosciences, option : Hydrogéologie quantitative, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 232p.
- El Yakoubi N. 2006. *Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Ben Ahmed (Meseta marocaine occidentale)*. Thèse de Doctorat ès-sciences, Université Mohamed V, Rabat, 212 p.
- Ettazarini S. 2002. *-Altération des sédiments et leur relation avec les eaux souterraines et les circulations des eaux de surface de la série méso-cénozoïque dans le bassin de phosphates d'Ouled Abdoun (Maroc)*. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V-Agdal, Rabat, pp. 286.
- Ferré M. & Hazan R. 1964. Notice explicative de la carte hydrogéologique de la plaine de Berrechid au 1/100 000. *ONI/SRE, arch. MTPC/DH/DRE*.
- Frizon de Lamotte D., Zizi M., Missenard Y. *et al.* 2008. *The Atlas systems. In : A. Michard et al. (Eds.) - Continental Evolution: The Geology of Morocco*. Notes 133 in Earth Sciences, 116, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 133–202.
- Gentil L. 1922. L'âge des phosphates marocains. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, GLXXIV, 42–44.
- Gigout M. 1950. *Carte géologique de la meseta entre Settat et Mazagan (Dokkala et Chaouia occidentale)*, carte géologique; 1/200 000 ; publié par le Service Géologique du Maroc en 1954.
- Harmouzi O. 2010. *Interprétation de sondages électriques verticaux par combinaison des méthodes statistique, géostatistique et d'inversion*. Thèse de Doctorat. Université Moulay Ismail. Meknès 323 p.
- Hazan R. & Ferre M. 1964. Notice explicative de la carte hydrogéologique de la plaine de Berrechid. *Office national des irrigations, Service ressources en eau, Rabat*, 23 p.
- Laville E. & Piqué A. 1991. La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque : le rejeu des structures hercyniennes, *Bulletin. Socio-Géologique de France*, 162, 6, 1161–1171.
- Loke M.H. 2004. Tutorial : 2D and 3D electrical imaging surveys: Geotomo Software, *Notes 128p., accessed July 23, 2004, URL http://www.alberta.ca*.
- Lyazidi A. 2003. Evolution géodynamique du bassin triasique de Berrechid-El Gara-Ben Slimane : Dynamique sédimentaire et géométrie des dépôts (Méséta nord-occidentale, Maroc). *Pongéa*, 39/40, 23–35.
- Michard A., Sadiqi O., Chalouane A., *et al.* 2008. *Continental Evolution : The Geology of Morocco. Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction*. Advances in geographic information science. Springer, 438 p.
- Michard A. 1976. Eléments de Géologie Marocaine. *Notes et Mémoires du Service Géologique*, 252, 399 p.
- Mridekh A., Echarfaoui H., El Mansouri B *et al.* 2011. Imagerie électrique des structures crétacées et tertiaires sur la transversale Guisser-Ben Ahmed (plateau des phosphates, Maroc) : rôle des structures paléozoïques et implications hydrogéologiques. *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 2, 2, 2107–6510.
- Piqué A., Jeannette D. & Michard A. 1979. The Western Meseta Shear Zone, a major and permanent feature of the Hercynian belt in Morocco. *Journal of Structural Geology*, 2, 1/2, 55–61.
- Riss J., Fernández Martínez JL, Sirieix C., *et al.* 2011. A Methodology for Fast Reinterpretation of VES Historical

- Data. Application to the Saiss Basin (Morocco). *Geophysics*, 76, 6, B225–B236.
- Ruhard J.P. 1975. Chaouia et Plaine de Berrechid; Tome 2 : Ressources en Eau du Maroc. Plaines et bassins du Maroc atlantique *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 231, 197 p.
- Russo P. 1933. Recherches sur les fossiles du genre «*Fronicularia*» recueillis dans les couches phosphatées du Maroc central. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5, 3, 355–360.
- Saidi A., Tahiri A., Aït Brahim L., *et al.* 2002. États de contraintes et mécanismes d'ouverture et de fermeture des bassins permien du Maroc hercynien. L'exemple des bassins des Jebilet et des Réhamna. *Comptes Rendus Géoscience, Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS*, 334, 221–226.
- Salvan H. 1950. Introduction stratigraphique, in : A. Carpentier : Flore sénonienne de Sidi-Hajjaj. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 3, 76, 149-150.
- Salvan H. 1954. Les invertébrés fossiles des phosphates marocains. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 93, 258 p.
- Salvan H. 1960. Les phosphates de chaux sédimentaire du Maroc. Leurs caractéristiques et leurs problèmes (Essai de synthèse). *Notes de la Société Géographique du Maroc (n° spécial phosphates)*, 14, 7–20.
- Salvan H. 1969. Lamellibranches et Gastéropodes du Sénonien de Khouribga (Maroc), quelques remarques. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 213, 29, 59–62.
- Telford W.M., Geldart L.P. & Sherif R.E. 1990. Applied geophysics, Cambridge University press, 770 p.
- Termier H. & Termier G. 1951. Stratigraphie et paléobiologie des terrains primaires de Ben Ahmed (Chaouia Sud). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 85, 48-105.
- Salvan H. 1950. Introduction stratigraphique, in : A. Carpentier :

Manuscrit reçu le 14/11/2014

Version révisée acceptée le 17/06/2015

Version finale reçue le 16/11/2015

Mise en ligne le 26/11/2015