



Etude géophysique par imagerie électrique du système aquifère au nord-est du bassin d'Essaouira, Maroc

Zakaria Ouzerbane ^{1,*}, Abdessamad Najine ², Tahar Aïfa ³, Abdellah El Hmaïdi ¹, Ali Essahlaoui ¹ and Fadwa Radouani ²

¹ Equipe de recherche « Sciences de l'eau et Ingénierie de l'Environnement », Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, BP 11201 Zitoune, 50000 Meknès, Morocco

² Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Technologie, Université Sultan Moulay Slimane, BP 523 Mghila, 23000 Béni Mellal, Morocco

³ Géosciences-Rennes, CNRS UMR6118, Université de Rennes 1, Bat.15, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

Received : 20 August 2012

Accepted after revision: 9 December 2013

Published online: 10 December 2013

Résumé : Les ressources en eau des bassins atlantiques marocains sont en cours de destockage notamment celles des aquifères superficiels. L'utilisation des eaux profondes du bassin d'Essaouira nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques géophysiques des formations perméables. Pour cela nous avons utilisé les techniques de sondage et de tomographie électrique afin de cerner la structure géologique du système aquifère et de mieux comprendre ses implications hydrogéologiques et hydrodynamiques. Les résultats obtenus montrent que la structure du bassin est représentée par une succession d'anticlinaux et de synclinaux qui ont résulté de la combinaison des effets de la tectonique atlasique et du diapirisme. Suite à cette configuration, le système aquifère superficiel se trouve disloqué en blocs surélevés et affaissés par des failles. Il en résulte, un écoulement souterrain discontinu et une distribution hydrodynamique variable.

Mots clés : Plaine d'Essaouira, aquifère, prospection électrique, section de résistivité.

Geophysical study by electrical imagery of the aquiferous system north-east of the Essaouira Basin, Morocco

Abstract: Water resources of the Moroccan Atlantic basins are being destocked especially those of the superficial aquifers. The use of deep waters in the Essaouira Basin requires a thorough knowledge of permeable formations by geophysical methods. For this purpose we used the vertical electrical sounding and the electrical tomography survey techniques to identify the geological structure of the aquifer system and better understand its hydrogeologic and hydrodynamic implications. The results show that the structure of the basin is represented by a succession of anticlines and synclines that resulted from the combined effects of Atlassic tectonics and diapirism. Following this configuration, the superficial aquifer system is broken into collapsed and raised blocks activated by faults. It involved a discontinuous groundwater flow and a change in the hydrodynamic properties.

Keywords: Essaouira plain, aquifer, electrical prospection, resistivity section.

1. Introduction

De par sa situation géographique, le Maroc est soumis à des influences climatiques diverses variant du Nord au Sud sous l'effet de la latitude et d'Ouest en Est sous l'effet de la continentalité. L'analyse des informations pluviométriques disponibles depuis le début du siècle a montré que le Maroc a connu des excédents et des déficits pluviométriques qui s'équilibraient.

Mais depuis trois décennies, cet équilibre a été rompu et l'on a assisté à un très fort déséquilibre entraînant une sécheresse très aiguë. Cette sécheresse, la plus importante enregistrée depuis un siècle, a entraîné une baisse spectaculaire des ressources en eaux.

Le bassin d'Essaouira a connu à l'instar des autres régions du Maroc une décroissance significative des apports d'eau. Cette situation a entraîné la réduction de la productivité agricole et la dégradation de plusieurs écosystèmes. Toutefois ce bassin dispose d'un système aquifère formé d'un ensemble de nappes d'importances inégales. Ces nappes peuvent offrir une capacité de régularisation naturelle qui les rend précieuses pour assurer en toute sécurité un approvisionnement régulier. L'étude géophysique présentée ici a pour but de définir les caractéristiques géométriques de l'aquifère quaternaire superficiel, afin de mieux comprendre la structure géologique et prévoir l'implantation judicieuse des forages d'exploitation des eaux souterraines.

* Corresponding author: ouzerbanegephy@gmail.com
(Z. Ouzerbane)

2. Présentation de la zone d'étude

Situation géographique

La région d'étude, dite zone synclinale d'Essaouira, appartient au bassin d'Essaouira et a une superficie de 900 km² environ. Elle est limitée au Nord par Jebb Hadid, au Sud par oued Tidzi, à l'Est par les reliefs de Chiadma du sud et Haha du Nord et par le diapir de Tidzi et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (Fig. 1). Elle est peu accidentée et se caractérise par un relief de collines

basses, modelées par un réseau hydrographique peu dense. La zone synclinale d'Essaouira fait partie des zones semi-arides du Maroc avec des précipitations très irrégulières qui ne dépassent pas 300 mm/an en moyenne. La température moyenne oscille autour de 20°C, l'écart entre le mois le plus froid (janvier) et le mois le plus chaud (août) peut atteindre 17°C (Bahir et al., 2001).

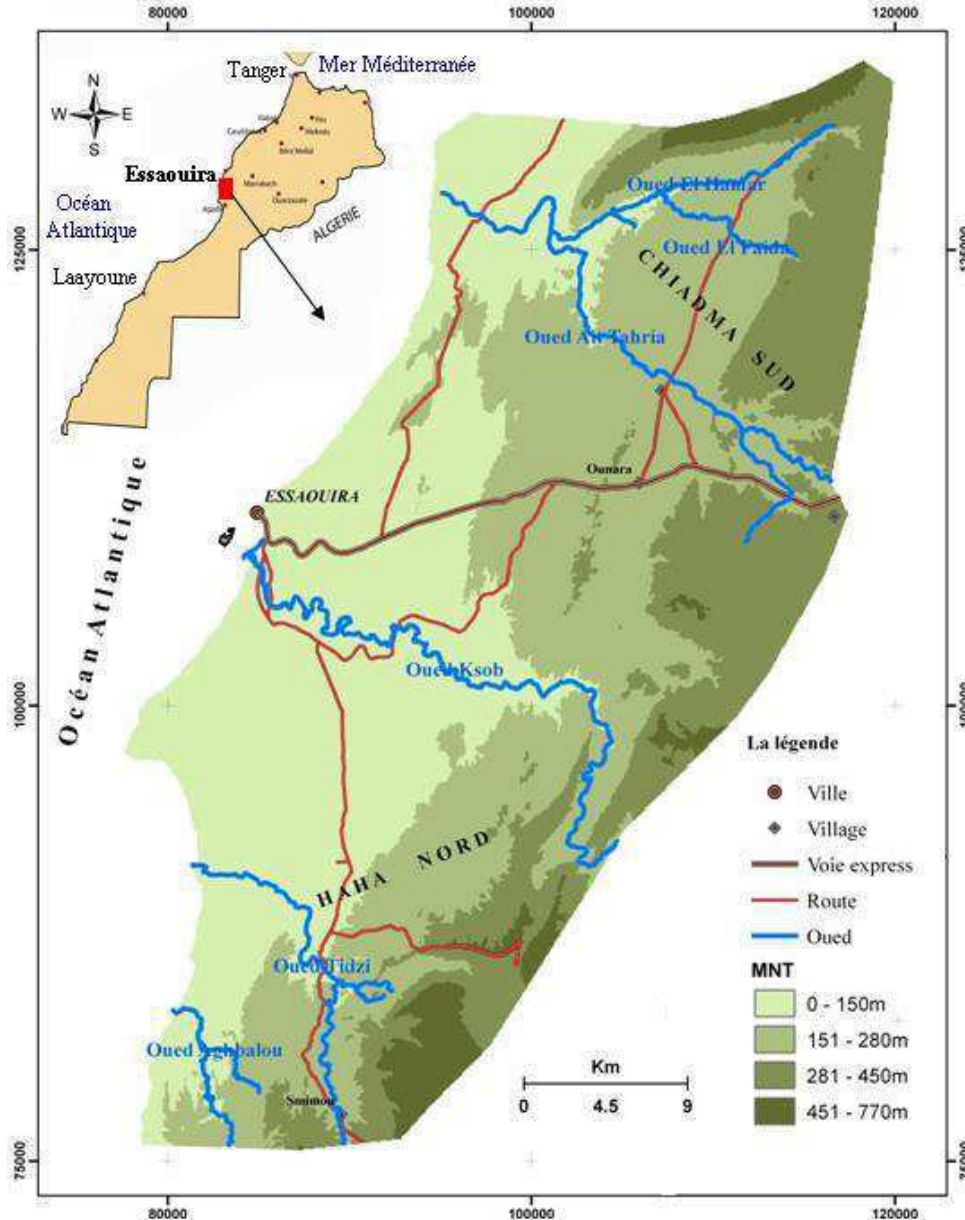


Fig. 1. Situation géographique et MNT de la zone d'étude. Location and DEM of the study area

Cadre géologique du bassin d'Essaouira

Du point de vue géologique, la zone synclinale d'Essaouira est moins accidentée avec un relief moins élevé, caractérisé par des collines basses, façonnées par un réseau hydrographique peu dense. Le bassin d'Essaouira compte deux séries tectonostratigraphiques :

- Une série synrift d'âge Trias-Lias inférieur, mise en place au-dessus d'un substratum paléozoïque structuré par l'orogénèse hercynienne. Cette série triasico-liasique est formée principalement par des dépôts détritiques lacustres, fluvio-deltaïques à marins, des dépôts évaporitiques et des coulées basaltiques ;
- Une série post-rift d'âge lias supérieur-éocène, formée par des dépôts de plateforme proximale en général.

Du point de vue structural, le bassin fait partie du sillon nord-atlasique défini par Ambroggi (1963) comme étant une zone de plissements modérés. La structure du bassin est représentée par une succession d'anticlinaux et de synclinaux qui ont résulté de la combinaison des effets

de la tectonique atlasique et du diapirisme (Fig. 2). L'ensemble du bassin est fragmenté par d'importants accidents qui se prolongent sous la couverture et qui sont hérités de la phase tectonique hercynienne (Souid, 1983; Medina, 1994).

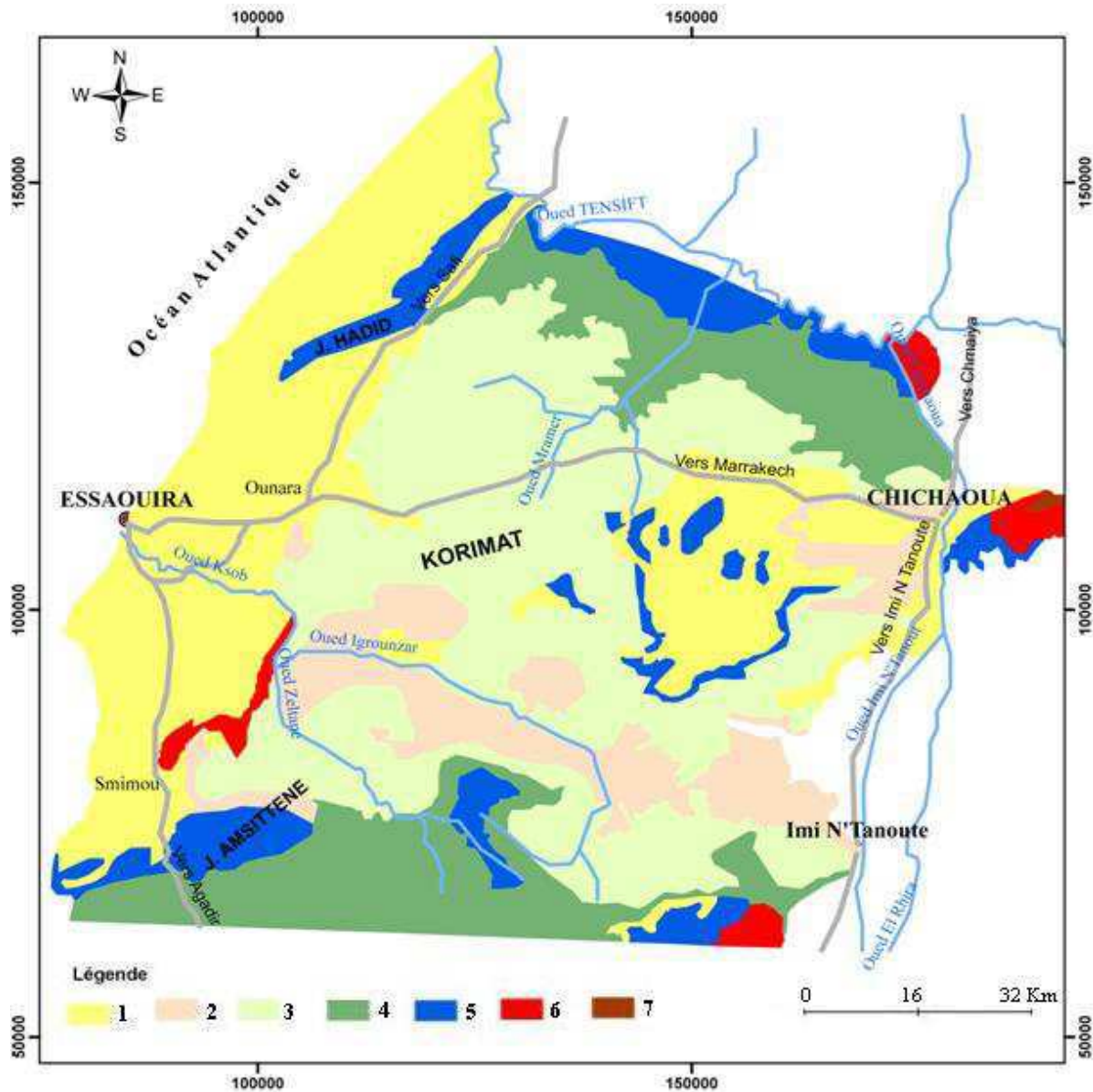


Fig.2. Esquisse géologique du bassin d'Essaouira. 1: Quaternaire et pliocène (calcaire coquillier, grès dunaire), 2: Eocène (série phosphatée, marne et marno-calcaire), 3: Cénoomanien-Turonien (calcaire lithologique et marno-calcaire), 4: Crétacé inférieur (marne et argile verte ou bleue avec bancs gréseux), 5: Jurassique supérieur (calcaire gypseux), 6: Trias (formation rouge et dolérite), 7: Paléozoïque (schiste). Geological sketch of the Essaouira Basin. 1: Quaternary and Pliocene (shaly limestone, sandstone dune), 2: Eocene (phosphate series, marl and calcareous marl), 3: Cenomanian-Turonian (lithologic and marly-limestone), 4: Lower Cretaceous (green or blue marl and clay with sandstone beds), 5: Upper Jurassic (limestone gypsum), 6: Triassic (red formations and dolerite), 7: Paleozoic (shale).

Cadre hydrogéologique

Dans le bassin d'Essaouira, les eaux souterraines constituent la principale ressource en eau pour la consommation quotidienne des habitants. Les effets combinés de la tectonique et du diapirisme ont provoqué la compartimentation du bassin en plusieurs systèmes aquifères dont le fonctionnement et les relations hydrauliques sont mal connus. Parmi ces sous-bassins,

les cuvettes synclinales d'Essaouira et de Bouaboub, séparées par le diapir de Tidsi, correspondent à l'essentiel des ressources en eau.

Dans la cuvette synclinale d'Essaouira, les ressources en eau souterraine sont contenues dans deux réservoirs principaux : le Plio-Quaternaire et le Turonien. Le Plio-Quaternaire à formation de grès calcaire marin ou dunaire présente une conductivité hydraulique primaire par porosité et renferme une nappe libre importante dont

le mur est formé, dans la structure synclinale, par les marnes du Crétacé supérieur (ex. Sénonien). Il est exploité en domaine rural et assure l'alimentation en eau potable, les besoins domestiques (Bahir et al., 2000) et d'une façon moins importante l'irrigation des terres agricoles. Le Turonien renferme une nappe très rapidement captive sous les marnes sénoniennes dans la structure synclinale et probablement en contact direct avec le Plio-Quaternaire sur les bordures de cette structure, vers l'oued Ksob, à l'Ouest à l'approche du diapir caché d'Essaouira, à l'Est et au Sud au voisinage du diapir de Tidzi. Il a été sollicité depuis la fin des années 80 par des forages profonds qui sont surtout destinés à satisfaire les besoins en eau de la ville d'Essaouira et de quelques villages importants.

3. Méthodes et moyens

L'étude géophysique entreprise a commencé par quelques sondages électriques d'étalonnage sur des affleurements représentatifs de la série stratigraphique

(Fig. 3). Par la suite quatre lignes de tomographie P1 à P4 totalisant une longueur de 145 km ont été également établis en utilisant un système d'acquisition multi-électrodes. Ces profils ont été orientés de manière à : (i) traverser orthogonalement les failles et structures plissées présumées jouant un rôle dans les écoulements (vecteur et/ou siège tampon) ; (ii) capter le maximum de la série stratigraphique afin de tester le comportement hydraulique des principales formations (aquifères, aquitards, imperméables, toit, mur, etc.) et de disposer du maximum d'information sur leur géométrie ; (iii) toucher les structures anomaliques plus particulièrement les diapirs ; (iv) traverser les secteurs 'frontaliers' en espérant intercepter les principaux 'conduits' d'eau souterraine si l'hypothèse de la dominance des écoulements préférentiels se confirme, sinon, infirmer ou nuancer une telle hypothèse le cas échéant.

Le dispositif de mesure est constitué d'un résistivimètre de type PASI et d'un système de connexion pouvant recevoir jusqu'à 32 électrodes espacées de 1 m.

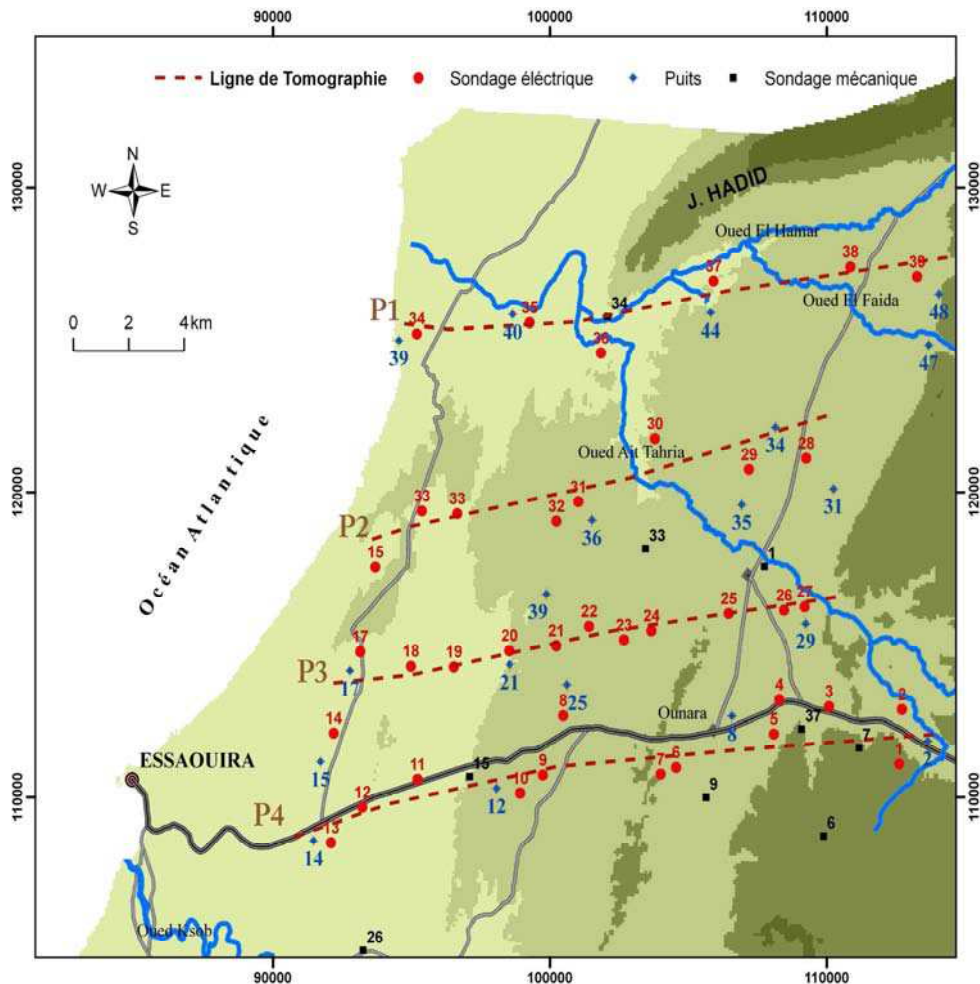


Fig. 3. Implantation des sondages électriques verticaux et des lignes de tomographie électrique. Location of the vertical electrical soundings and electrical tomography lines.

Les données acquises sont présentées sous forme de panneaux de résistivité apparente dont les axes horizontal et vertical correspondent respectivement à la distance le long du profil et à la séparation entre les

électrodes mobiles. Sur les panneaux, les mesures sont reportées au milieu du dispositif d'acquisition à une cote correspondant à la valeur de la séparation courante des électrodes mobiles (Parasnis, 1997 ; Telford et al.,

1995). Des modèles du sous-sol montrant la distribution en coupe de la résistivité, sont calculés à partir des panneaux en utilisant la méthode d'inversion des données de Loke et Barker (1996).

4. Présentation des résultats

L'interprétation des données acquises a été effectuée en deux étapes.

Premièrement, on a analysé les courbes des sondages électriques par le logiciel IPI2win pour mettre en évidence les contrastes physiques existant entre les différentes formations et deuxièmement on a tenté, des corrélations latérales à l'échelle de l'ensemble de la zone concernée par les mesures géophysiques afin d'établir des correspondances entre la nature lithologique et la valeur de la résistivité électrique. L'interprétation a été effectuée à l'aide d'un logiciel approprié Res2Dinv basé sur une technique inverse développée par Loke et Barker (1996). Il s'agit d'un programme interactif qui calcule la réponse théorique d'un terrain constitué de plusieurs couches horizontales ayant chacune une résistivité propre. On modifie à volonté le nombre de couches, leur épaisseur et leur résistivité afin d'obtenir un résultat compatible avec les données recueillies sur le terrain. Comme plusieurs solutions sont possibles, on impose au modèle certaines limites fondées sur les données géologiques de la région étudiée. Dans la zone qui nous intéresse, les données géologiques recueillies dans le secteur immédiat, nous ont permis de mieux caler la modélisation.

On s'est appuyé également sur les résultats des puits et sondages carottés existant dans la zone d'étude (Fig. 3). On s'assure pour chaque hypothèse faite de la compatibilité de la courbe résultant de l'hypothèse faite avec la courbe mesurée sur le terrain. Des ajustements vont être réalisés tout en restant dans les limites d'équivalence. En effet, l'interprétation a été complétée en fonction de la comparaison de chaque diagramme avec ceux des autres diagrammes de la zone. Ceci conduit à une représentation en coupes où l'on peut par corrélation montrer l'allure du développement de chaque couche, les variations d'épaisseur et/ou de résistivité et de mettre en évidence soit la continuité soit la présence de discontinuités qui pourraient les affecter (changement de faciès, failles, etc.).

Analyse et interprétation des sondages électriques

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des sondages électriques effectués sous forme de coupes géo-électriques ainsi qu'une interprétation qualitative et quantitative des modèles ainsi élaborés par le logiciel IPI2win. Selon l'allure de leurs courbes, les sondages électriques réalisés sont regroupés en deux types : A et B (Fig. 4,5).

Type A : Pour cette famille, la courbe de sondage représentant l'évolution de la résistivité apparente en fonction de la demi-longueur $AB/2$ du dispositif de mesure présente une forme en « fond de bateau » qui se traduit, d'abord, par une diminution des valeurs de la

résistivité apparente suivie d'une augmentation légère de celles-ci. Cette forme du diagramme de sondage électrique est typiquement celle d'un modèle du sous-sol à trois couches correspondant à la superposition de deux terrains résistants séparés par un troisième relativement conducteur. En effet, au fur et à mesure de l'augmentation des dimensions du dispositif, le courant injecté dans le sous-sol atteint des formations de plus en plus profondes. Il circule au début du sondage exclusivement dans le résistif superficiel, ce qui donne des valeurs un peu élevées. Ensuite, quand il atteint le terrain intermédiaire conducteur, les valeurs diminuent peu à peu au fur et à mesure qu'un volume de plus en plus important de celui-ci contribue à la mesure. De la même façon, les valeurs de la résistivité apparente augmentent lorsque les lignes de courant atteignent le résistif profond. D'où la forme observée de la courbe de sondage (Fig. 4).

Cette famille de sondage de type A est représentée par les courbes des sondages électriques SE1-2, SE5-8, SE13-15, SE18, SE21 et SE23-26 (Fig. 3).

Les données recueillies à partir de ces sondages électriques ont permis d'aboutir à des courbes de sondages identiques. Leur interprétation a conduit pratiquement à un modèle de terrain constitué de haut en bas par les entités suivantes (Fig. 4) :

- un terrain relativement résistant R1 de résistivité intrinsèque comprise entre 200 et 450 $\Omega.m$. Il correspond vraisemblablement au niveau congolomératique alluvionnaire du Plio-Quaternaire;
- un niveau conducteur C1 de résistivité inférieure à 100 $\Omega.m$ correspondant aux marnes du Sénonien. Ces marnes représentent d'une part le substratum imperméable de l'aquifère plio-quaternaire et le toit de la nappe turonienne.

Le complexe alluvionnaire montre une épaisseur variable et une résistivité qui ne dépasse guère les 500 $\Omega.m$. Il présente, généralement, une forme prismatique, épaisse au centre du bassin et s'amincit en s'éloignant d'oued Ksob. Ce complexe abrite une nappe phréatique qui joue un rôle important dans la vie socio-économique de la population locale.

- un niveau résistant R2 de résistivité inférieure à 100 $\Omega.m$. Ce niveau, correspondant à des marno-calcaires et des calcaires attribués au Turonien, représente l'aquifère souterrain le plus important du bassin d'Essaouira.

On constate ainsi que cette première famille de sondages électriques (Type A) met en évidence une structure typique du sous-sol constituée d'une alternance de trois ou quatre terrains électriquement différenciés.

Type B : Pour cette famille, la courbe de sondage représentant l'évolution de la résistivité apparente en fonction de la demi-longueur $AB/2$ du dispositif de mesure présente une forme en « cloche » qui se traduit, d'abord, par une augmentation des valeurs de la résistivité apparente suivie d'une diminution de celles-ci. Cette forme du diagramme de sondage électrique est typiquement celle d'un modèle du sous-sol à trois

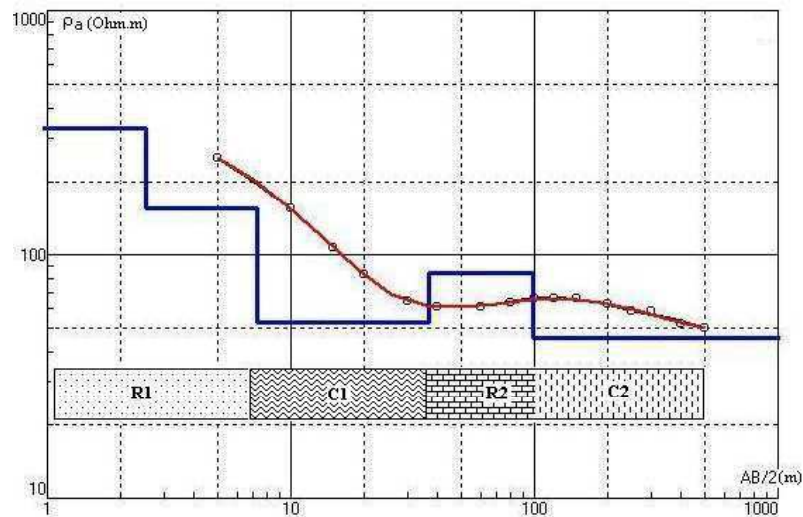


Fig. 4. Sondage électrique vertical de type A. vertical electrical sounding of type A.

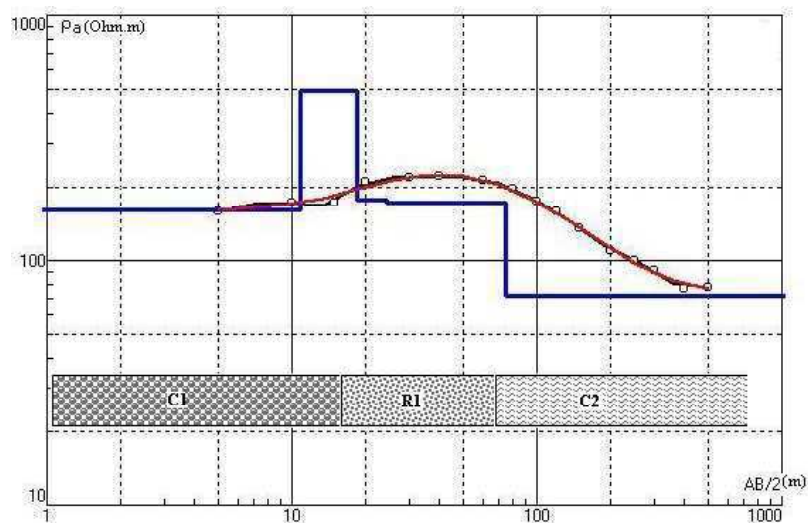


Fig. 5. Sondage électrique vertical de type B. vertical electrical sounding of type B.

couches correspondant à la superposition de deux terrains conducteurs séparés par un troisième résistant. Ensuite, quand il atteint le terrain intermédiaire résistant, les valeurs augmentent peu à peu au fur et à mesure qu'un volume de plus en plus important de celui-ci contribue à la mesure. De la même façon, les valeurs de la résistivité apparente diminuent lorsque les lignes de courant atteignent le conducteur profond. D'où la forme observée de la courbe de sondage (Fig. 5).

Cette famille de sondage de type B est représentée par les courbes des sondages électriques SE3-4, SE9-12, SE16-17, SE19-20, SE22, SE27-29 (Fig. 3).

En effet, au fur et à mesure de l'augmentation de l'envergure du dispositif, le courant injecté dans le sous-sol atteint des formations de plus en plus profondes. Il circule au début du sondage exclusivement dans le conducteur superficiel, ce qui donne des valeurs faibles.

Les données recueillies au niveau de ces sondages électriques ont abouti à des courbes de sondages dont l'interprétation a conduit pratiquement à un modèle de terrain constitué de haut en bas par les entités suivantes :

- un terrain très conducteur C1 de résistivité intrinsèque inférieure à 500 Ω .m et d'épaisseur variable.

Ce terrain correspond sans doute au recouvrement alluvionnaire superficiel très abondant dans la région ;

- un niveau résistant R3 correspondant à un niveau gréseux de faible épaisseur mais de résistivité importante. La résistivité mesurée dépasse parfois 1500 Ω .m.

- un niveau conducteur profond C2 avec une résistivité pouvant parfois atteindre 5 Ω .m est responsable de la baisse finale de la courbe de sondage type dont le toit se situe à 45 m. Il s'agit d'une couche marneuse qui constitue le substratum imperméable de l'aquifère C1 (Fig. 5).

Analyse et interprétation des pseudo-sections de tomographie

La première étape de l'interprétation des données de tomographie électrique a été effectuée à l'aide de la méthode d'inversion de Loke et Barker (1996). L'efficacité de cette méthode de modélisation a été largement prouvée dans de multiples cas d'étude de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance

géologique et la cartographie structurale des aquifères souterrains profonds et superficiels.

Cette méthode a été systématiquement appliquée à l'ensemble des profils de tomographie enregistrés au niveau de la zone d'étude (Fig. 3). Ceci nous a permis d'obtenir des modèles du sous-sol sous forme de section de la résistivité réelle des terrains investigués. L'analyse fine des pseudo-sections permet de se rendre compte des variations importantes de la résistivité intrinsèque témoignant ainsi du caractère morcelé des structures géologiques et de l'influence remarquable de la paléogéographie (milieux de dépôts différents, transgression, régression, etc.)

Les résultats du levé géophysique (Fig. 6-9) montrent des données mesurées sous forme de modèles de résistivité réelle du sous-sol obtenue par inversion de ces données. Un premier examen de l'ensemble des résultats obtenus révèle l'existence d'importantes variations de la résistivité électrique du sous-sol témoignant de son hétérogénéité. Schématiquement, la zone couverte par le levé géophysique est formée par 4 niveaux géo-électriques correspondant à 4 grandes unités lithologiques :

1- un niveau résistant de résistivité supérieure à 800 Ω .m correspondant au niveau calcaro-dolomitique du Turonien. Ce constat est justifié par le premier sondage d'étalonnage réalisé à la surface des affleurements du Turonien présents dans le Nord-Est du bassin (Fig. 3).

2- un niveau conducteur de résistivité inférieure à 200 Ω .m correspondant aux marnes du Sénonien ;

3- un banc gréseux résistant bien représenté sur les profils, sa résistivité est située autour de 1100 Ω .m. Ce résistant a été attribué aux grès consolidés du Plio-Quaternaire.

4- un niveau très conducteur de résistivité inférieure à 150 Ω .m correspondant aux alluvions quaternaires situées au centre du bassin.

Ligne P1 : Le modèle de résistivité du sous-sol obtenu le long de la ligne P1 montre une importante zone résistante à l'extrême nord de la section séparée d'une autre zone plus conductrice située vers le sud (Fig. 6). Compte tenu de l'emplacement de ce profil, il est clair que le résistant R1 observé en surface au niveau de l'extrémité nord du profil correspond au niveau gréseux du Plio-Quaternaire. Ce résistant est séparé d'un bloc plus conducteur situé vers le Sud et montre deux niveaux bien individualisés :

1- Le conducteur C1 superficiel situé au milieu et au sud du profil représenterait la masse alluvionnaire qui s'épaissit au centre de la vallée (résultat confirmé par les deux sondages électriques d'étalonnage SE2 et SE3)

2- Le conducteur C2 correspondant à la masse marneuse du Sénonien ;

La pseudo-section 4 (Fig. 6) présente un niveau résistant important, représenté par les calcaires dolomitiques du Turonien, qui apparaît à des profondeurs variables sous une forme ondulatoire. Elle se comporte comme un empilement de synclinaux et d'anticlinaux morcelés par des failles de rejets différents.

Ligne P2 : La pseudo-section de résistivité obtenue le long de cette ligne montre deux masses résistantes d'importances inégales séparées par une zone conductrice C1 qui correspondrait à la couche marno-calcaire inférieure (Fig. 7). Comme pour la ligne P1, les deux masses résistantes représenteraient les bancs gréseux inférieur et supérieur. Toutefois au niveau de cette ligne, la barre gréseuse inférieure apparaît plus étendue vers l'Est. Elle continue jusqu'à environ 150 m de l'extrémité ouest de la ligne P2 (Fig. 7, pseudo-sections 5) où elle s'arrête brutalement. Ce qui laisse présager un prolongement nord de la faille relevée également au niveau de la ligne P3.

Ligne P3 : Sur cette ligne, on retrouve la succession stratigraphique prévue par la géologie locale (Fig. 8). Ainsi, en plus du conducteur superficiel (C1) qui devrait correspondre à une couche alluvionnaire, on retrouve les trois unités lithologiques schématisées sur la ligne P2, à savoir le banc gréseux supérieur (résistant R1), la couche marno-calcaire (conducteur C2) et le banc gréseux inférieur (résistant R2). Conformément à la géologie de surface, la série présente un dérangement vers l'Est en raison de la présence d'une série de failles et flexures déjà détectées dans la première section. La barre gréseuse inférieure est continue vers l'Est sur l'ensemble de la ligne P3. Une baisse relative de la résistivité à cet endroit pourrait correspondre au prolongement sud de la faille évoquée précédemment mais qui ne manifeste pas un rejet vertical à cet endroit.

Ligne P4 : elle met principalement en évidence les 3 entités géologiques précitées (Fig. 9). En effet, le modèle de résistivité obtenu montre un résistant profond (R2) qui matérialiserait la continuité de la couche turonienne. Ce dernier est surmonté par un conducteur C2 qui représenterait la couche marneuse supérieure du Sénonien. L'augmentation brutale de la résistivité au milieu de la ligne P4 pourrait s'expliquer par des remontées diapiriques. Ce constat a été déjà mentionné dans plusieurs études et rapports techniques réalisés dans le bassin d'Essaouira, ce diapirisme se manifeste par des intrusions d'argiles salifères (Bahir et al., 2001b).

5. Discussion et conclusions

Les quatre lignes étudiées dans le présent papier sont complémentaires. Un assemblage des quatre modèles de résistivité de ces quatre lignes permet d'avoir une vision d'ensemble de la variation de la résistivité en direction EW et NS à travers la zone prospectée. Rappelons que l'emplacement de ces quatre lignes a été guidé par des puits hydrogéologiques existants afin de mieux clarifier la structure du sous-sol profond du secteur d'étude. Compte tenu du fort contraste de résistivité entre les grès, les calcaires, les marnes et les argiles, la mise en évidence de telles structures aurait été très évidente.

Les masses gréseuses apparaissent clairement sur les pseudo-sections et se matérialisent sur le terrain par les reliefs dominants, séparés des terrains sus-jacents par des failles régionales de direction NE-SW.

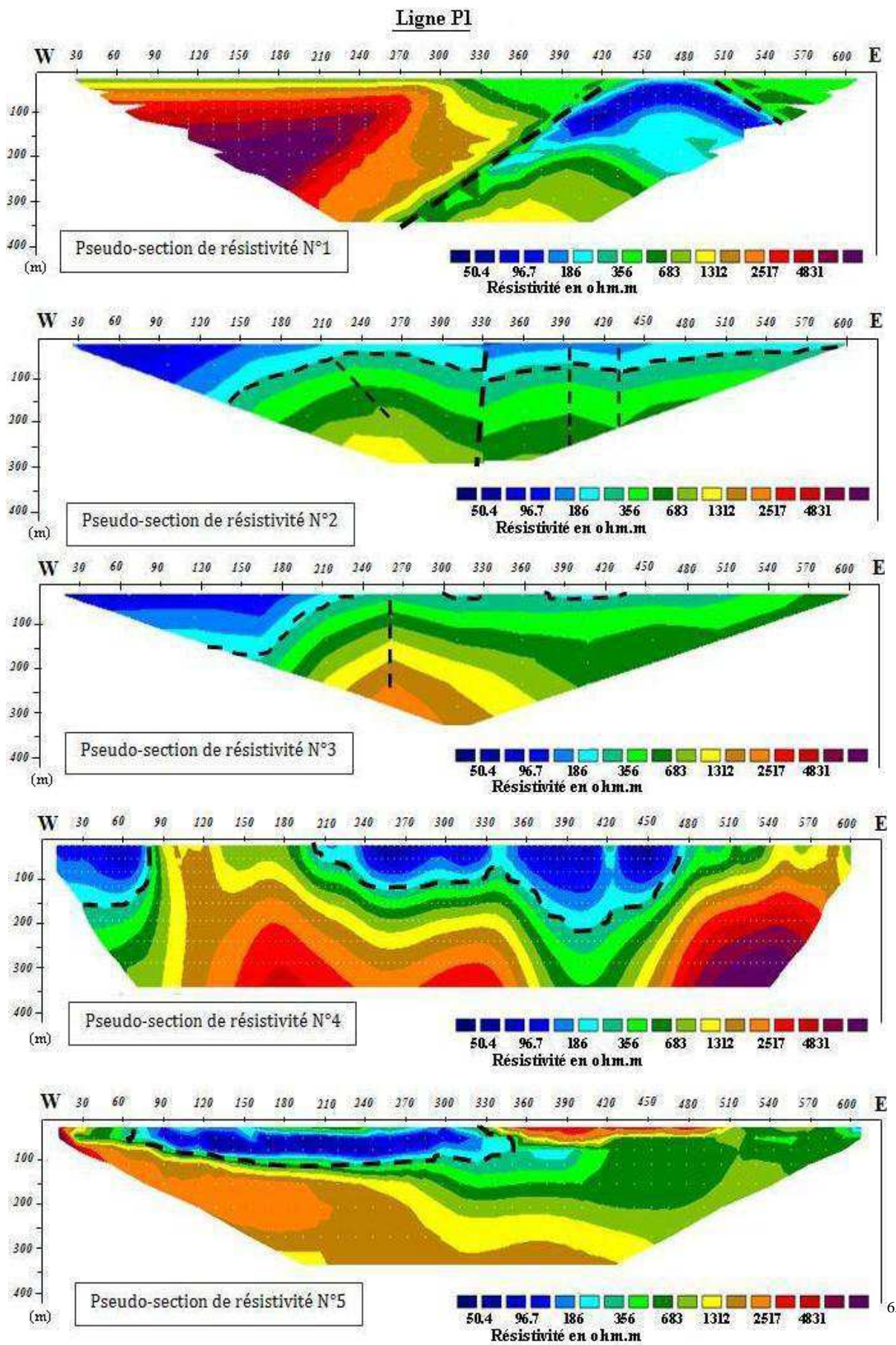


Fig. 6. Pseudo-sections de résistivité obtenues le long de la ligne P1. Pseudo-resistivity sections obtained along line P1.

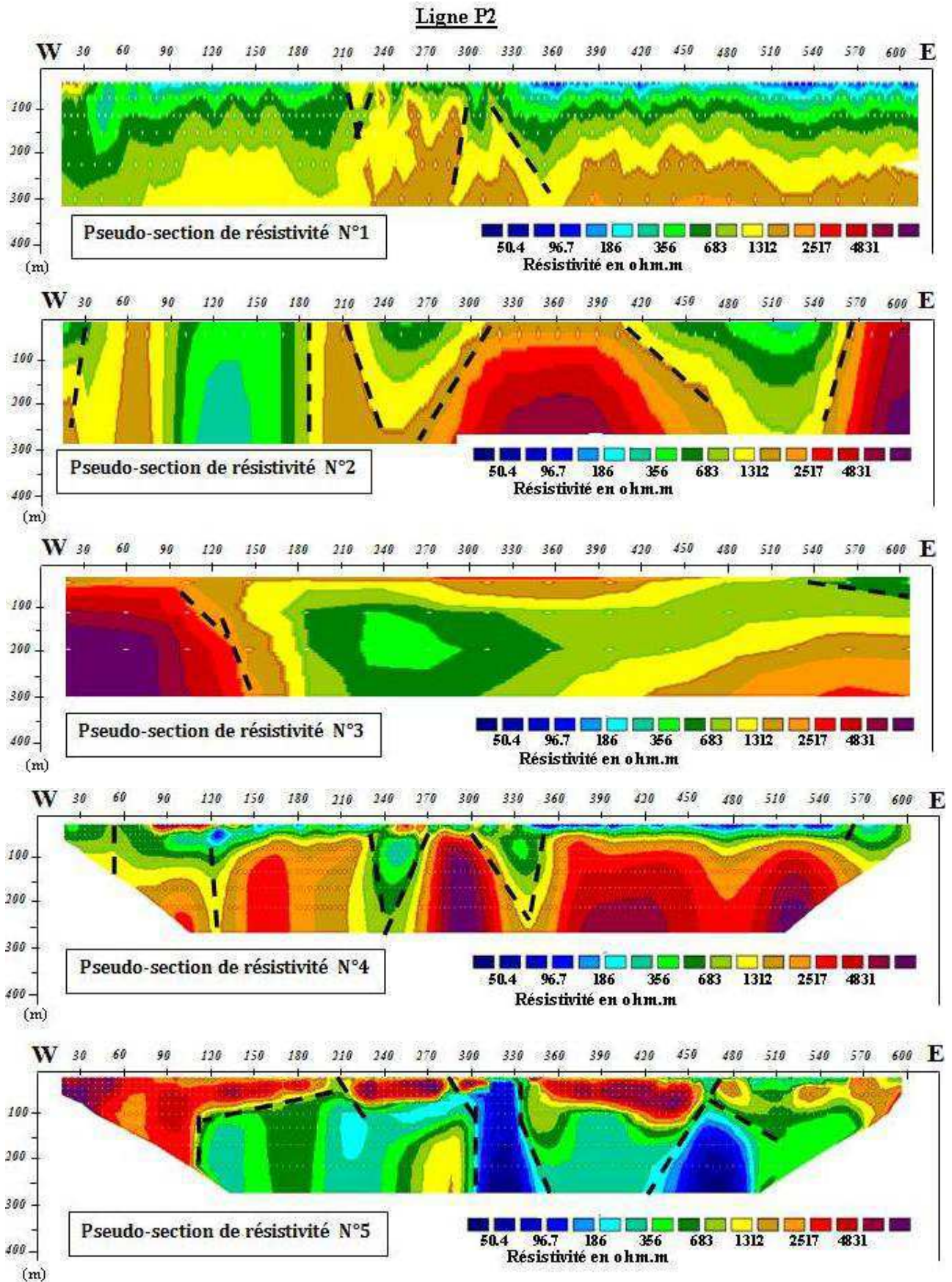


Fig. 7. Pseudo-sections de résistivité obtenues le long de la ligne P2. Pseudo-resistivity sections obtained along line P2.

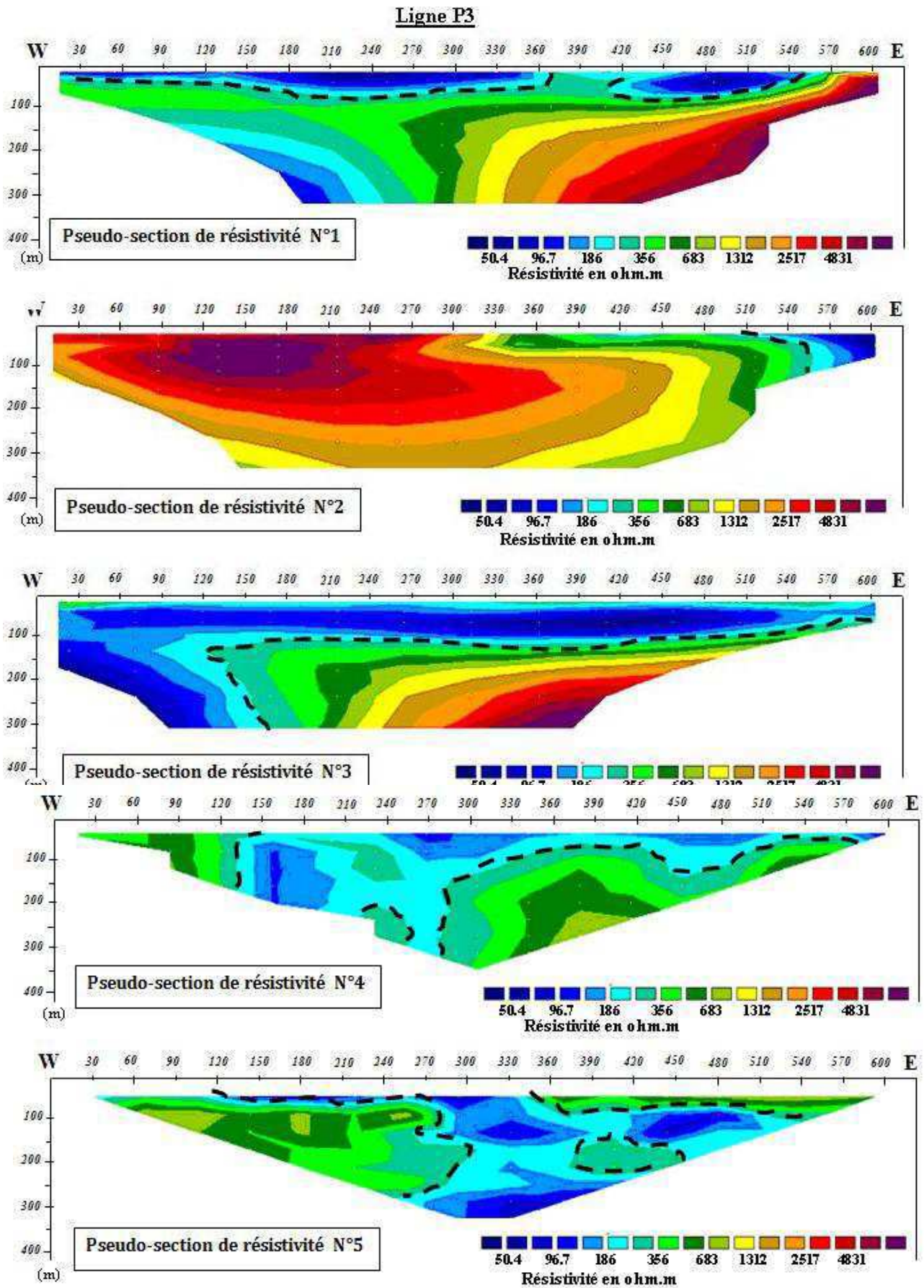
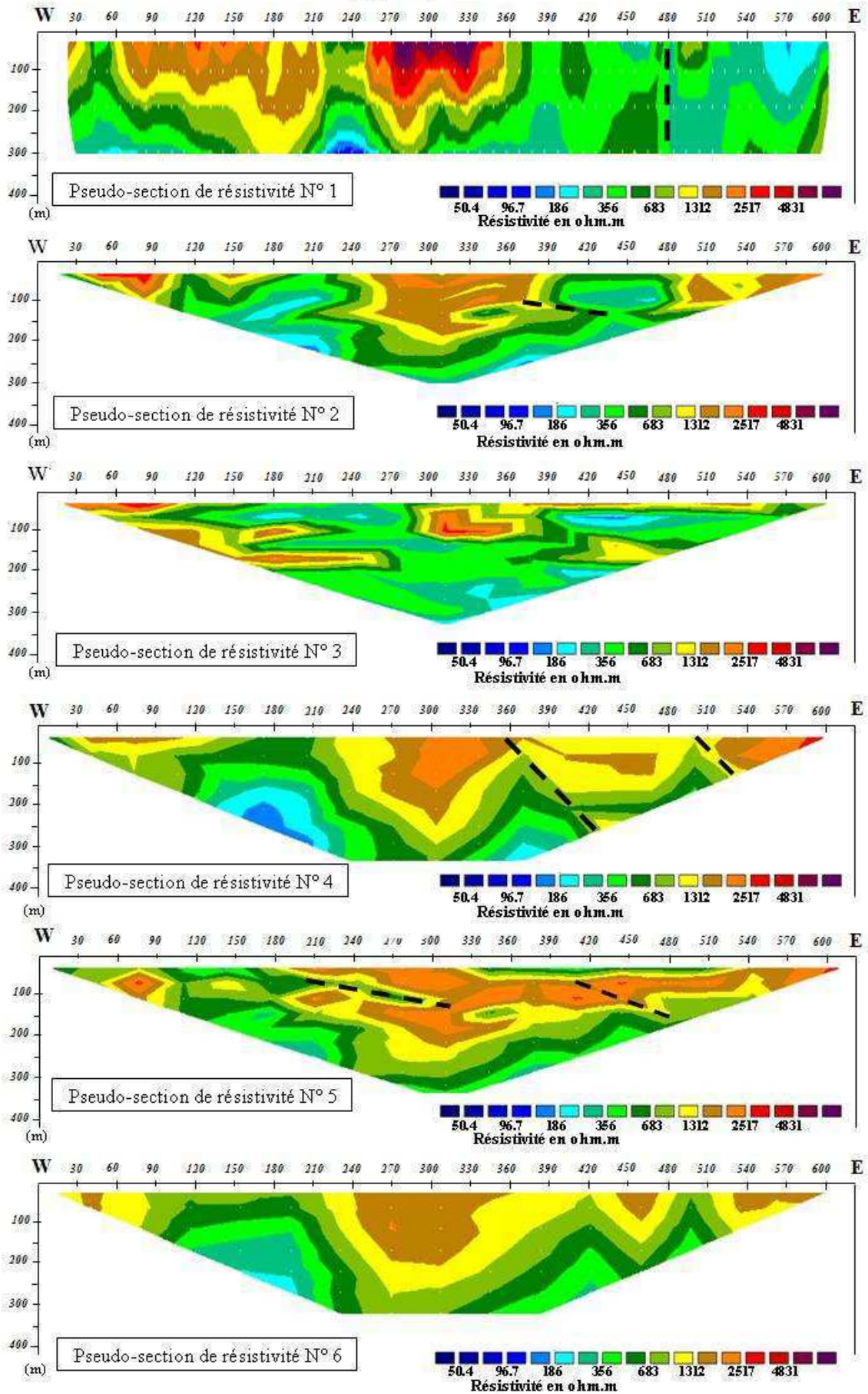


Fig. 8. Pseudo-sections de résistivité obtenues le long de la ligne P3. Pseudo-resistivity sections obtained along line P3.

Ligne P4



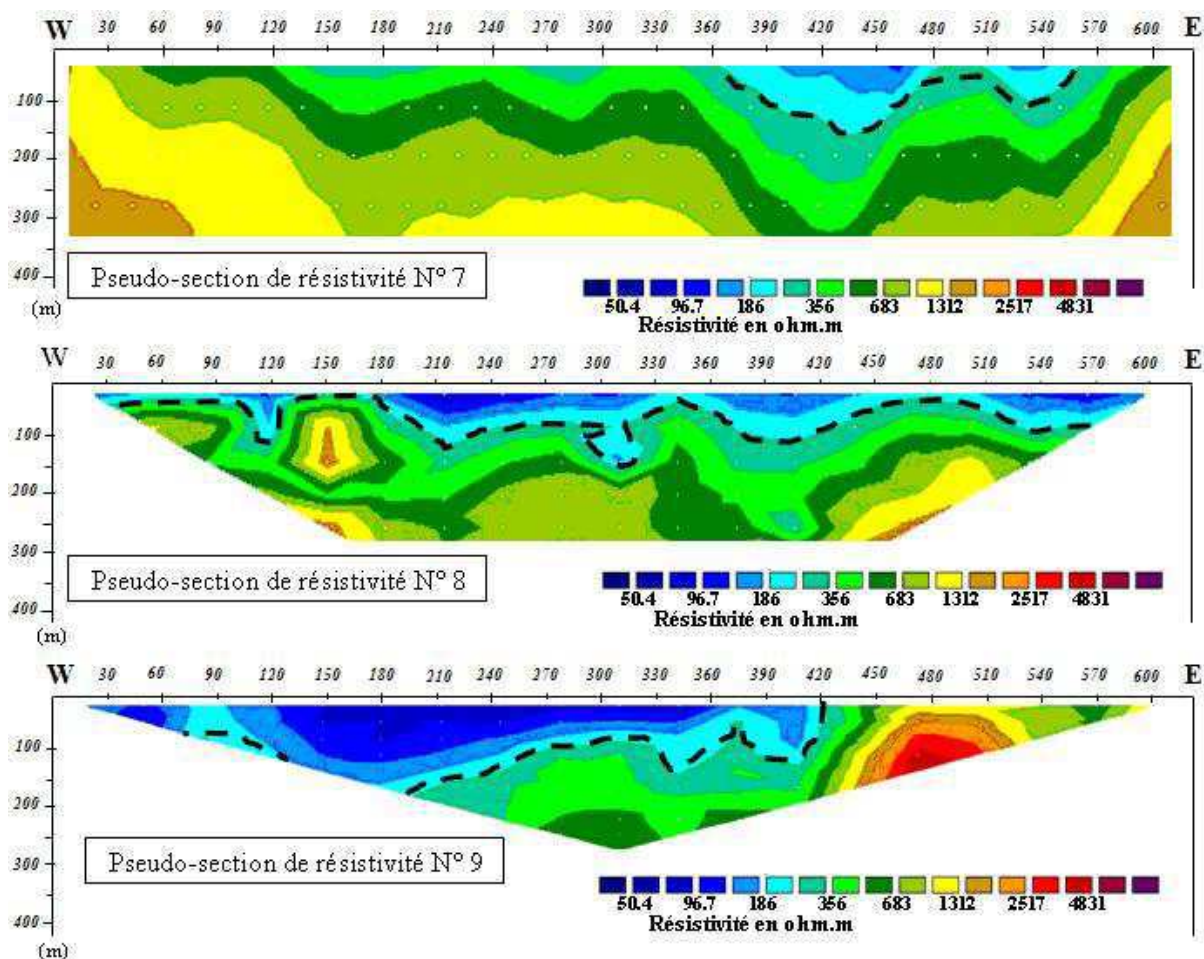


Fig. 9. Pseudo-sections de résistivité obtenues le long de la ligne P4. Pseudo-resistivity sections obtained along line P4.

La structure de la région se trouve ainsi morcelée et fragmentée en lambeaux d'anticlinaux et de synclinaux de dimensions réduites par rapport à la partie Ouest. Cette structure discontinue et plissée a favorisé la mise en place de diapirs d'importance inégale. Vers le nord des lignes étudiées, les structures morcelées ont cédé la place à des formes stratigraphiques plus monotones.

D'après ce qui précède, il apparaît clairement que le bassin d'Essaouira se présente comme une vaste zone synclinale ouverte sur l'océan. Cette zone est affectée par plusieurs plissements et accidents, qui permettent l'individualisation de nombreuses cuvettes synclinales: la cuvette synclinale de Bouabout, qui est traversée par l'Oued Igrounzar, la cuvette synclinale de Korimat, la cuvette synclinale d'Essaouira traversée par l'Oued Ksob et séparée du synclinal de Bouabout par le diapir de Tidzi et enfin au Nord de l'anticlinal de Jbel Hadid s'ouvre le synclinal côtier de la plaine d'Akermod.

D'un point de vue stratigraphique, les affleurements sont constitués de terrains dont l'âge s'échelonne entre le Crétacé à la base à dominance carbonaté alternant avec des passées de marnes, le Tertiaire formé de marnes phosphatées et de grès et le Quaternaire constitué de grès et conglomérats.

Le Trias visible au niveau du diapir de Tidzi est formé d'argiles rouges salifères et de dolérites.

Sur le plan géologique, les affleurements du bassin versant du Ksob sont constitués de faciès très diversifiés d'âges compris entre le Trias et le Quaternaire. Cependant, la majeure partie des faciès rencontrés dans le bassin est constituée de séries carbonatées d'âge jurassique et crétacé. Les observations déduites des cartes géologiques au 1/50 000 d'Essaouira et de Khemis Meskala et des prospections de terrain montrent que les roches tendres à moyennement tendres représentent plus de 60% de l'étendue du bassin. Ceci explique la grande quantité des matériaux solides charriée par le Ksob durant les périodes de crue. L'histoire tectonique de cette partie du Maroc est complexe; la morphologie actuelle est le résultat combiné de l'orogénèse atlasique avec des directions de raccourcissement N120° à N140° et de la tectonique salifère qui est une des particularités morpho-tectonique de ce bassin. En effet, l'abondance du diapirisme a pour origine les argiles salifères du Trias plus profond.

Le haut bassin d'Igrounzar est occupé principalement par des marnes et des marno-calcaires respectivement cénomaniens et sénoniens sur lesquels le ruissellement est intense. Vers le centre du bassin l'oued coule sur des calcaires turoniens assez fissurés pour permettre l'infiltration d'une quantité d'eau non négligeable.

Le sous-bassin versant de Zelten draine des séries du Jurassique supérieur aux structures plus complexes. Ces formations sont en majeure partie constituées par des argiles et des marnes. Le ruissellement y est par conséquent plus intense.

Vers l'aval de la confluence entre l'oued Igrounzar et oued Zelten (Fig. 2), les formations dunaires consolidées et mobiles du Plio-Quaternaire occupent la totalité du sous-bassin versant d'Adamna, où les eaux s'infiltrent rapidement dans les alluvions du lit de l'oued.

Du point de vue structural, le bassin fait partie du sillon nord-atlasique défini par Ambroggi (1963) comme étant une zone de plissements modérés. La structure du bassin est représentée par une succession d'anticlinaux et de synclinaux qui ont résulté de la combinaison des effets de la tectonique atlasique et du diapirisme. L'ensemble du bassin est fragmenté par d'importants accidents qui se prolongent sous la couverture et qui sont hérités de la phase tectonique hercynienne (Souid, 1983; Medina, 1994).

Le réservoir du Crétacé supérieur est de loin l'aquifère le plus important de par son extension et de ses caractéristiques hydrodynamiques. Il constitue un système multicouche. Il regroupe les calcaires dolomitiques et dolomies du Sénonien, les calcaires fissurés et karstifiés du Turonien et les calcaires lumachelliques et marnes du Cénomaniens. La base de ce système est formée par les calcaires dolomitiques massifs du Vraconien. Ces propriétés aquifères sont liées à l'existence de discontinuités au sein de ces formations. Ces discontinuités sont représentées par les plans de stratifications (qui donnent parfois naissance à des sources), par la fracturation et aussi par le développement de phénomènes de karstification).

Nous avons montré ainsi que le système aquifère du Crétacé est formé par un assemblage de blocs surélevés et affaissés séparés par des failles. Ceux-ci sont organisées selon trois directions majeures (NNE-SSW, NNW-SSE et EW), qui se trouvent à l'échelle régionale et correspondent à la réactivation des failles profondes du socle hercynien (Souid, 1983 ; Medina, 1985, 1988, 1994 ; Laville et Piqué, 1991 ; Broughton et Trepanier, 1993 ; Hafid, 2000). 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.

Suite à cette configuration en blocs de l'aquifère, l'écoulement hydrodynamique de la nappe est discontinu. Il peut y avoir des interconnexions hydrodynamiques entre blocs voisins à la faveur notamment de ces failles conductrices.

Remerciements

Nous remercions vivement l'Otan (Brussels) pour sa participation financière au projet CLG983954: "Assessment of fresh groundwater in coastal lands.

Application of Hydrochemical, Geophysical Methods, Remote Sensing and Geographic Information System".

Références

- Ambroggi, R., 1963. Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas occidental et de la plaine du Souss. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 157, 321p.
- Bahir, M., Mennani, A., Jalal, M., Youbi, N., 2000. Contribution à l'étude des ressources hydriques du bassin synclinal d'Essaouira, Maroc. *Estudios Geologicos*, 56(3-4), 185-195.
- Bahir, M., Jalal, M., Mennani, A., Laftouhi, N.E., 2001a. Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat (Bassin synclinal d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geologicos*, 56(5-6), 47-52.
- Bahir, M., Jalal, M., Mennani, A., 2001b. Pollution nitratée des eaux souterraines du bassin synclinal d'Essaouira. *Journal of Environmental Hydrology*, 18(9), 1-9.
- Broughton, P., Trepanier, A., 1993. Hydrocarbon generation in the Essaouira Basin of western Morocco. *A.A.P.G Bull.*, 77(6), 999-1015.
- Hafid, M., 2000. Triassic-early Liassic extensional systems and Tertiary inversion, Essaouira Basin (Morocco). *Marine and Petroleum Geology*, 17, 409-429.
- Laville, E., Piqué A., 1991. La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque : le rejeu des structures hercyniennes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162(6), 1161-117.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Medina, F., 1985. Chronologie des phases et style tectonique dans le Haut Atlas occidental (Maroc). *Garcia de Orta. Série Geologia*, Lisboa, 8(1-2), 43-53.
- Medina, F., 1988. Tilted-blocks pattern, paleostress orientation and amount of extension, related to Triassic early rifting of the central Atlantic in the Amezri area (Argana Basin, Morocco). *Tectonophysics*, 148, 229-233.
- Medina, F., 1994. "Evolution structurale du Haut Atlas occidental et des régions voisines du Trias à l'actuel, dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision Afrique-Europe. " *Thèse d'université*, Université Mohamed V, Rabat, 272p.
- Parasnis, D.S., 1997. Principles of applied geophysics. *Fifth Edition, Chapman & Hall (Eds) London*, 429p.
- Souid, A.K., 1983. Etude tectonique et microtectonique des injections du Trias du bassin d'Essaouira pendant les compressions alpines dans l'avant-pays atlantique (Maroc). *Thèse de 3ème cycle*, Université de Montpellier, France, 90p.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1995.
Applied Geophysics. *Second Edition*, Cambridge
University Press, 770p.

© Ouzerbane et al., *Licensee J. hydrocarb. mines environ. res.*, All rights reserved.

This is an open access article licensed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted, non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the work is properly cited.

Pièce 128/1, Géosciences-Rennes, CNRS UMR6118, Université de Rennes 1, Bat.15, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France
Tél/Fax: +33 (0)2 23236785/6097, E-mail: jhmer@univ-rennes1.fr, Web: <http://jhmer.univ-rennes1.fr>