

Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc)

Azzouz Kchikach^a, Mohammed Jaffal^a, Tahar Aïfa^{b,*}, Lahcen Bahi^c

^a Faculté des sciences et techniques, université Cadi-Ayyad, BP 618, Marrakech, Maroc

^b Géosciences Rennes, CNRS-UMR 6118, université Rennes-1, campus de Beaulieu, bât. 15, 35042 Rennes cedex, France

^c École Mohammadia des ingénieurs, université Mohamed-V, Rabat Agdal, Maroc

Reçu le 28 janvier 2002 ; accepté le 12 mars 2002

Présenté par Xavier Le Pichon

Abstract – Sterile bodies mapping under Quaternary cover using resistivity-sounding method in the phosphatic bearing of Sidi Chennane (Morocco). In the Ouled Abdoun sedimentary basin (Morocco), the phosphatic series is composed of regular interbedded phosphatic and marly limestone layers. Some phosphatic deposits in this basin show sterile bodies causing two kinds of problems: (1) as they are hard, compact and masked by a Quaternary cover, they disturb the exploitation in some yards and give bad reserve calculations; (2) even the use of wells and mechanical boreholes did not evidence their delimitation. Therefore, electric prospecting method has been used to evidence their geometrical shape. Petrographical and geometrical studies on these sterile bodies allowed us to choose the appropriate geophysical method to map them. The electrical resistivity survey that we used in the Sidi Chennane area shows that this technique is a good tool to contour these sterile bodies. This method is now considered as useful to the mining engineers to get round them during the exploitation. *To cite this article: A. Kchikach et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 379–386.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Morocco / Sidi Chennane / sterile bodies / phosphatic series / electrical prospecting / resistivity

Résumé – Dans le bassin sédimentaire des Ouled Abdoun (Maroc), la série phosphatée est formée d'une intercalation régulière de niveaux phosphatés et marno-calcaires. Certains gisements de phosphate dans ce bassin montrent des corps stériles qui sont à l'origine de deux types de problèmes. D'une part, par leur aspect dur et compact, ils alourdissent les travaux d'exploitation dans certains chantiers. D'autre part, du fait qu'ils sont stériles et toujours masqués par une couverture quaternaire, ils ne permettent pas de réaliser un calcul précis des réserves et par conséquent une bonne étude de faisabilité pour chaque gisement. La reconnaissance directe des ces corps stériles par puits et sondages mécaniques n'a pas permis de les délimiter. Par conséquent, le recours à une méthode de prospection indirecte s'avère nécessaire. Les coupes géologiques que nous avons réalisées et l'utilisation des données de puits de reconnaissance a permis, d'une part, de caractériser pétrographiquement et géométriquement certains d'entre eux et, d'autre part, de discuter le choix de la méthode géophysique à utiliser pour tenter de les cartographier. Le levé de résistivité électrique exécuté dans le secteur de Sidi Chennane montre que la technique des traînées électriques peut être utilisée pour délimiter ces corps sous couverture et permettre ainsi aux ingénieurs miniers de les contourner au cours de l'exploitation. *Pour citer cet article : A. Kchikach et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 379–386.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Maroc / Sidi Chennane / corps stériles / série phosphatée / prospection électrique / résistivité

* Correspondance et tirés à part.

Adresses e-mail : kchikach@fstg-marrakech.ac.ma
(A. Kchikach), jaffal@fstg-marrakech.ac.ma (M. Jaffal),
aifa@univ-rennes1.fr (T. Aïfa).

Abridged version

The Ouled Abdoun sedimentary basin located in the central part of Morocco contains the biggest phosphatic deposits of the world [2, 3] (Fig. 1). Exploration of these deposits shows sterile bodies in the phosphatic series. These bodies disturb seriously the kinematic chain of the exploitation in some yards because of their hard aspect (Fig. 2A). The present study concerns electrical prospecting in Sidi Chennane area to evidence their shape.

Geologically, the tabular phosphatic series has a thickness of about 50 m (Fig. 2B). It starts by Maastrichtian phosphatic marls overlain by uncemented phosphatic layers and limestones containing many bony debris [4]. Palaeocene is mainly composed of uncemented phosphates; its submittal part corresponds to a level of limestones formed of coprolites and silex nodules that constitutes a regional reference marker [8]. Eocene corresponds to an alternation of uncemented phosphates levels, phosphatic marly limestones, discontinuous horizons of silex and silto-pelitic levels. The whole sequence is overlain by a fossiliferous marly limestones known as ‘Thersitae slab’ [1, 2, 9, 10].

In some deposits under exploitation, we observed three types of sterile bodies that are illustrated in Fig. 3. These bodies are mainly composed of a silicified limestone. They have a sub-circular form; their diameter varies from 10 to more than 150 m. Their presence in the phosphatic layers causes two kinds of problems: (1) as we do not know their volume proportion in the phosphatic layers, the reserves estimations can be wrong; (2) they are generally hard, so they complicate the phosphate extraction. Indeed, in an area containing sterile bodies, boring grid may always be tightened and boreholes filled with dynamites: borehole tools, explosives and time consuming increase drastically.

As exploration works achieved in Sidi Chennane area did not allow any delimitation of the sterile bodies, we tested electrical prospecting method [11] to map these structures. Realisation of three vertical electrical soundings helped us: (1) to determine the intrinsic resistivity for the

different terms of the phosphatic series, (2) to select the appropriate length of the measurement device for the profiling survey [6, 7]. We have voluntarily planted an electrical sounding near a borehole crossing a sterile body and the others beside boreholes realised on a normal phosphatic series. Moreover, some tests of resistivity profiles have also been done in old trenches of exploitation where these bodies are visible (Fig. 4). Eleven electrical resistivity profiles have been realised and helped to establish an apparent resistivity map of the studied area.

Test profiles show that the apparent resistivity values above the sterile bodies are higher than 200 Ω m, while the observed values on normal phosphatic series are around 80 Ω m. Interpretation of these electrical soundings has been conducted using a software based on the Marquardt–Levenberg technique [12]. It shows that the substratum depth of the phosphatic sequence is at about 40–50 m, leading us to choose 60 m for the device length of the resistivity profiling survey (Fig. 5).

On the computed apparent resistivity map of the studied area, five anomalies can be distinguished (Fig. 6). Anomalies An1 and An2 are controlled by mechanical boreholes (Fig. 7) that confirm the existence of sterile bodies [5]. The other anomalies are of the same amplitude and must be confirmed.

In conclusion, we may suggest the following points:

- sterile bodies of type I (Fig. 3A), formed exclusively of silicified limestone, show a high resistivity contrast, so they can be easily detected using this technique;
- sterile bodies of the type II and III (Figs. 3B and 3C), which are less silicified, give weak anomalies; we have often observed hematite and goethite near these sterile bodies, which probably testify a local iron enrichment;
- a geochemical study may help in the understanding of the sterile bodies formation and their possible chemical elements enrichment;
- the absence of stratification inside the sterile bodies in relationship with a normal stratified and tabular series may be a criterion of detection of these massive bodies, which could be characterised using a Georadar.

1. Introduction

Le bassin sédimentaire des Ouled Abdoun, au Centre du Maroc (Fig. 1), renferme les plus grands gisements phosphatés du monde [2, 3]. La série phosphatée est formée, dans ce bassin, d’une succession de niveaux phosphatés et d’intercalaires stériles marno-calcaires sur plus de 50 m de puissance. Dans plusieurs endroits, cette succession verticale et régulière de niveaux phosphatés et stériles n’existe plus et tous les termes constituant la série phosphatée se trouvent mélangés et transformés pour donner lieu, le plus souvent, à des corps stériles formés exclusivement de calcaires silicifiés ou, parfois, à des poches remplies

de blocs de calcaires noyés dans une matrice argileuse. La présence de ces corps dans la série phosphatée est à l’origine de deux problèmes majeurs. D’une part, lors du calcul des réserves, paramètre déterminant pour réussir l’étude de faisabilité de n’importe quel projet minier, on ne peut savoir la part qu’ils représentent dans le volume global du gisement, étant donné qu’ils n’affleurent pas en surface. D’autre part, leur existence dans certains chantiers alourdit sérieusement les travaux d’exploitation. En effet, en présence d’un corps stérile, il faut ralentir ou arrêter complètement le chantier d’exploitation (Fig. 2A) pour forer et décaper ce dernier. Cette opération peut durer plusieurs jours, voire plusieurs semaines, et néces-

Figure 1. Situation de la zone étudiée dans le bassin sédimentaire des Ouled Abdoun. 1. Massif hercynien. 2. Découpage des gisements phosphatés. 3. Extension probable de la minéralisation phosphatée. 4. Routes.

Figure 1. Location of the studied area in the sedimentary basin of Ouled Abdoun. 1. Hercynian massif. 2. Phosphatic areas. 3. Probable extension of phosphatic mineralisation. 4. Roads.

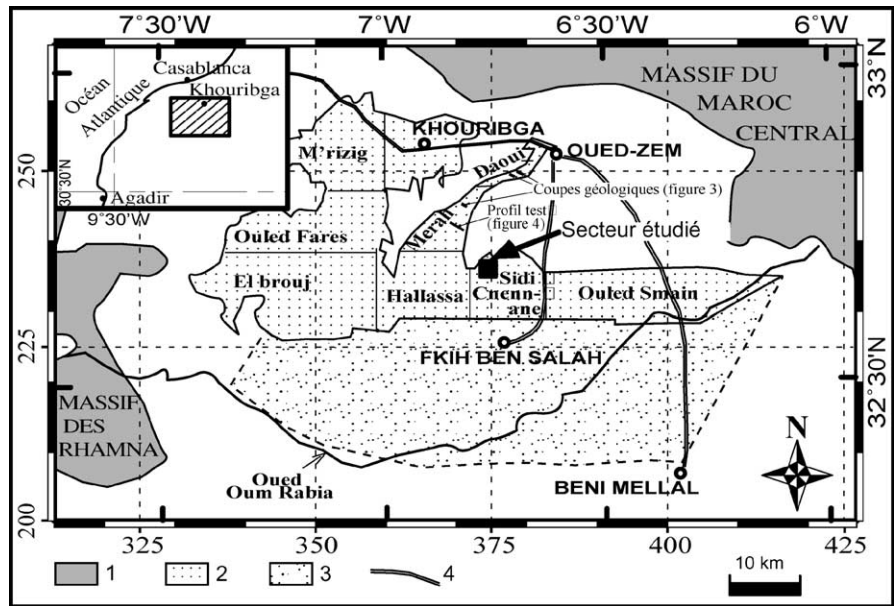
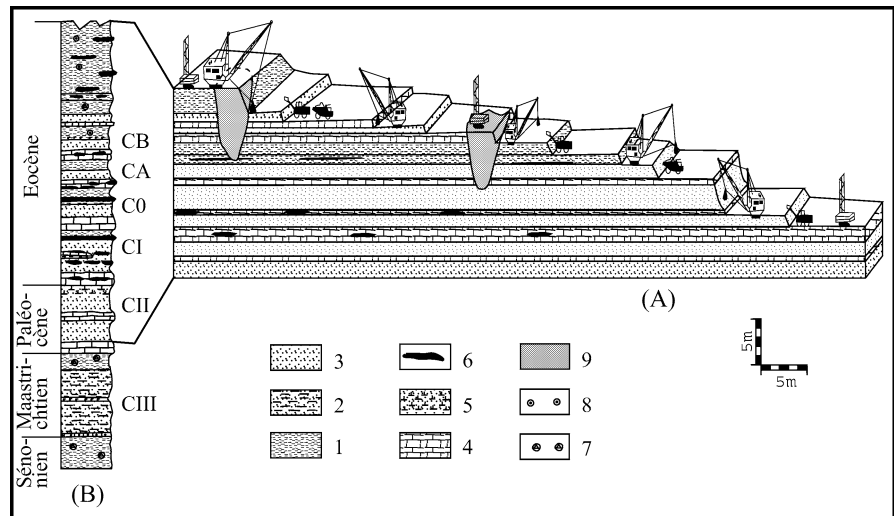


Figure 2. A. Coupe montrant la perturbation de l'exploitation par la présence de corps stériles. **B.** Log stratigraphique de la série phosphatée de Sidi Chen-nane : 1, marnes ; 2, marnes phosphatées ; 3, couche phosphatée ; 4, calcaires ; 5, calcaire phosphaté ; 6, banc discontinu de silex ; 7, concentration de calcite ; 8, nodule de silex ; C_{III}, C_{II}, C_I, C₀, C_A, C_B : couches phosphatées exploitées ; 9, corps stérile.

Figure 2. A. Section showing the disruption of the exploitation caused by sterile bodies. **B.** Stratigraphical log of the phosphatic series of Sidi Chen-nane: 1, marls; 2, phosphatic marls; 3, phosphatic layer; 4, limestones; 5, phosphatic limestone; 6, discontinuous silex bed; 7, calcite concentration; 8, silex nodule; C_{III}, C_{II}, C_I, C₀, C_A, C_B: exploited phosphatic layers; 9, sterile body.



site une consommation excessive en explosifs et, par conséquent, une augmentation du prix de revient.

Les corps stériles sont masqués par des terres végétales et du recouvrement quaternaire et ne peuvent donc être directement cartographiés à partir de la surface. Leur localisation offrirait aux ingénieurs miniers une meilleure planification des tranchées d'exploitation, qui permettrait de les contourner lors de l'exploitation des niveaux phosphatés.

Nous n'allons pas aborder ici l'origine et le mode de formation de ces corps stériles ; nous nous limiterons simplement à leur caractérisation pétrographique et géométrique. Ceci a permis de bien les situer dans le contexte géologique local et de discuter le choix de la méthode géophysique appropriée pour les localiser. À la suite d'une série de tests de la méthode électrique sur des corps visibles dans d'anciennes tran-

chées d'exploitation, nous avons opté pour la couverture d'une partie du gisement de Sidi Chen-nane par profils de résistivité. La carte des résistivités élaborée à l'issue de cette étude présente les résultats obtenus.

2. Cadre géologique et description des corps stériles

L'entité morphologique désignée sous le nom du plateau de phosphate marocain comprend plusieurs gisements phosphatés et s'étend sur plus de 9000 km² [2]. Les travaux de reconnaissance réalisés par l'Office chérifien des phosphates (OCP), à Sidi Chen-nane, consistent essentiellement en une campagne de puits qui traversent la totalité de la série phosphatée [5]. Ces derniers sont exécutés selon une maille de 500 m

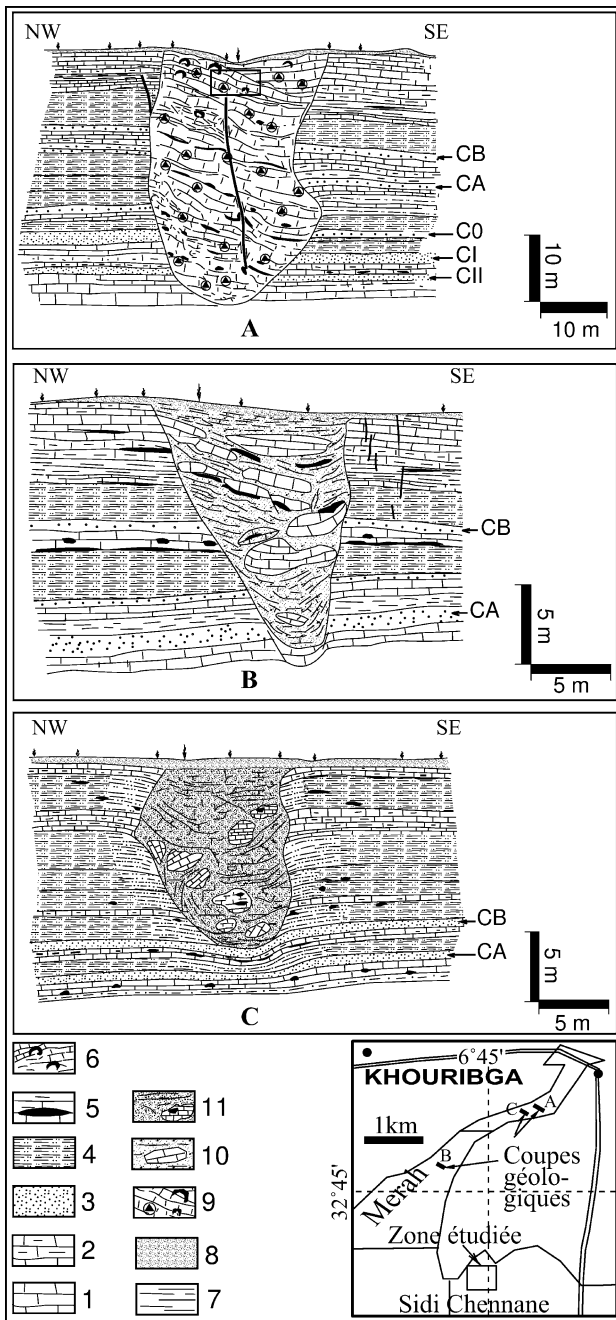


Figure 3. Coupes géologiques montrant les trois types de corps stériles. **A.** Type I, observé dans une tranchée d'exploitation à Sidi Daoui. **B.** Type II observé dans le gisement de Merah. **C.** Type III observé à Sidi Daoui : 1, calcaires ; 2, calcaires marneux ; 3, phosphates ; 4, marnes siliceuses ; 5, silex ; 6, cavité de dissolution ; 7, argiles ; 8, recouvrement quaternaire ; 9, corps stérile ; 10, corps stérile de type I ; 11, corps stérile de type III. C_{II}, C_I, C₀, C_A, C_B : couches phosphatées exploitées.

Figure 3. Geological sections showing the three type of sterile bodies. **A.** Type I observed in an exploitation trench at Sidi Daoui. **B.** Type II observed in Merah deposit. **C.** Type III observed at Sidi Daoui: 1, limestones; 2, marly limestones; 3, phosphates; 4, marly siltsones; 5, silex; 6, dissolution cavity; 7, mudstones; 8, Quaternary cover; 9, sterile body; 10, sterile body of type I; 11, sterile body of type III. C_{II}, C_I, C₀, C_A, C_B: exploited phosphatic layers.

× 500 m. Les logs de ces puits et les coupes géologiques que nous avons réalisées dans plusieurs tranchées en cours d'exploitation nous ont permis de décrire la série phosphatée dans ce gisement. En utilisant la terminologie en vigueur dans les chantiers d'exploitation, on distingue les couches suivantes (Fig. 2B) :

- la couche C_{III}, d'âge Maastrichtien, forme la base de la série phosphatée et repose directement sur les marnes indurées sénoniennes de couleur jaunâtre [4] ; elle débute par des marnes phosphatées et des niveaux calcaires très riches en débris osseux, connus sous le nom de calcaires à *bone-beds* [2] ; ces derniers sont surmontés par une succession de niveaux de phosphates meubles grossiers et de calcaires phosphatés ; le toit de la couche C_{III} est formé de calcaires marneux et de marnes grises ;

- la couche C_{II}, correspondant au Paléocène, est presque entièrement à phosphate meuble ; elle est surmontée par un niveau de calcaire à coprolites et à nodules de silex, qui constitue l'intercalaire minier C_I/C_{II} [8] ;

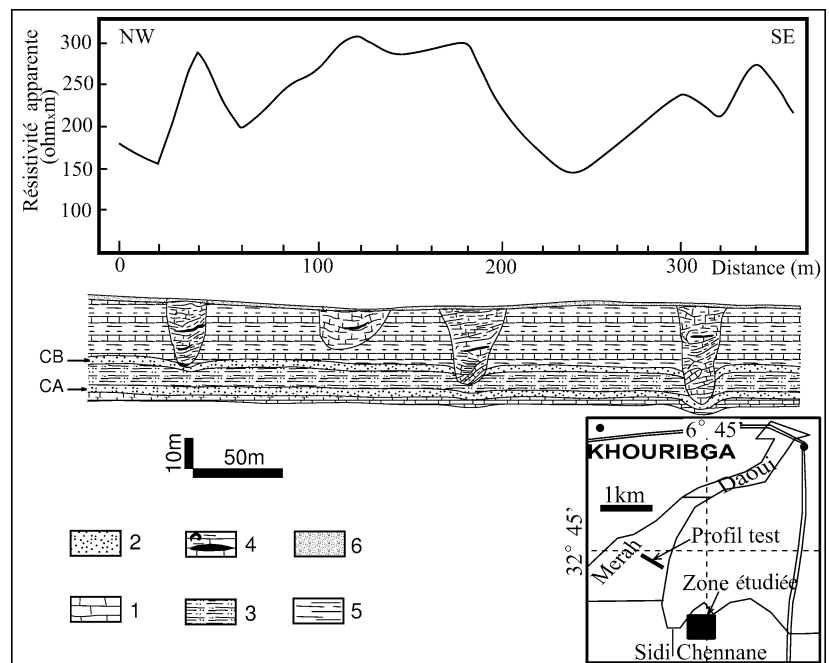
- les couches minières C_I, C₀, «sillon A» et «sillon B» [1], d'âge Éocène, sont formées d'une alternance de bancs réguliers de calcaires marneux et phosphatés, de niveaux de phosphates meubles à grains grossiers, d'horizons continus de silex et, parfois, de niveaux silto-péltiques ; sur l'ensemble repose la « dalle à thersités », formée de calcaire marneux et/ou siliceux coquillé [1, 2, 9, 10].

Cette série phosphatée normale, décrite brièvement, s'organise selon une structure tabulaire sur l'ensemble du bassin des Ouled Abdoun [1, 2]. Aucune étude géologique réalisée dans ce bassin n'a décrit l'existence de structures plissées ou de failles importantes [1, 2]. En revanche, dans plusieurs tranchées d'exploitation, on trouve quelques petites flexures, particulièrement dans la zone de transition latérale entre la série phosphatée saine et les corps stériles (Fig. 3). Ces derniers sont essentiellement formés par du matériel entièrement stérile et généralement très compact. Cet aspect serait dû à un enrichissement en silice et en carbonate, qui accompagne leur mise en place [5].

Les coupes géologiques que nous avons réalisées sur les anciennes tranchées d'exploitation nous ont permis de décrire trois types de corps stériles, en se basant sur la nature des matériaux qui les constituent. L'exemple de la Fig. 3A illustre le type I – le plus fréquent –, formé exclusivement de calcaire silicifié. Il montre bien le contraste pétrographique et, par conséquent rhéologique, qui existe entre la série phosphatée normale, formée de niveaux phosphatés et marno-calcaires, et la masse homogène de calcaire silicifié à nodules de silex. Le type II (Fig. 3B) est constitué d'un mélange de blocs de calcaires à gros nodules de silex, de marnes, d'argiles et

Figure 4. Profil test de résistivité, réalisé dans une ancienne tranchée d'exploitation dans le gisement de Merah. 1, Calcaires ; 2, phosphates ; 3, marnes siliceuses ; 4, corps stérile ; 5, argiles ; 6, recouvrement quaternaire. C_A, C_B : couches phosphatées exploitées.

Figure 4. Resistivity profile test achieved in an old trench of the Merah deposit. 1, Limestones; 2, phosphates; 3, marly siltstones; 4, sterile body; 5, mudstones; 6, Quaternary cover. C_A, C_B: exploited phosphatic layers.



de portions de bancs de silex. Dans le type III (Fig. 3C), on retrouve ces mêmes constituants, avec une nette prédominance des marnes siliceuses. Les deux premiers types affectent généralement la totalité de la série phosphatée, alors que le troisième n'a été observé qu'au toit du sillon B. Deux faits importants sont à noter : d'une part, l'absence de toute trace de stratification à l'intérieur de ces corps stériles et, d'autre part, l'existence de petites flexures dans la zone de transition latérale entre ces derniers et la série normale.

Du point de vue géologique, ces corps stériles peuvent être considérés comme une variation latérale de faciès au niveau de la série phosphatée. En effet, on passe latéralement de termes phosphatés et marno-calcaires, plus ou moins tendres, soit à des calcaires silicifiés très compacts, soit à des poches de marnes siliceuses, contenant quelques blocs de calcaires silicifiés. Ce changement de faciès se traduit par une variation latérale du comportement rhéologique des roches, attesté par la résistance que montrent les corps stériles au cours des opérations de forages nécessaires pour l'exploitation du phosphate [5].

Dans les gisements en cours d'exploitation de Sidi Daoui et de Merah, ces corps stériles ont été rarement rencontrés. En revanche, la description des coupes de puits de reconnaissance réalisés à Sidi Chennane a montré que, sur 157 puits, 53 ont révélé une série phosphatée « dérangée », soit 33% des puits de reconnaissance [5]. La dimension et la forme des corps stériles délimités par sondages mécaniques à Sidi Chennane [5] ou de ceux visibles sur les tranchées d'exploitation à Sidi Daoui et à Merah sont très variables. On trouve des structures sub-

circulaires, coniques, cylindriques ou quelconques, dont le diamètre varie de 10 m à plus de 150 m.

Nous retiendrons de la description pétrographique et géométrique des corps stériles une nette variation latérale de la rhéologie des roches en passant de ces derniers à la série phosphatée normale. Les profils de résistivité tests que nous avons réalisés sur certains corps stériles visibles dans d'anciens chantiers, montrent que cette variation s'accompagne d'un important contraste de résistivité électrique. Ceci justifie notre choix de la méthode électrique pour localiser ces corps sous une mince couverture quaternaire. Toutefois, l'absence de stratification à l'intérieur des corps stériles laisse penser qu'un levé de géoradar permettrait de situer ces corps au sein de la série phosphatée bien stratifiée et tabulaire. En effet, compte tenu de leur aspect dur et de leur forme, les corps stériles donneraient une réponse similaire à celle des dômes de sel en exploration pétrolière. Par ailleurs, lors des différentes missions que nous avons réalisées sur le terrain, nous avons souvent constaté l'existence d'indices de ferruginisation, particulièrement au voisinage des corps de types II et III. Une étude pétrographique de détail et un levé magnétique au sol devraient être menés sur les zones test, afin de vérifier si ces corps sont caractérisés par un enrichissement en fer.

3. Prospection électrique des corps stériles

La méthode des résistivités électriques utilisée dans ce travail consiste à injecter un courant électrique à l'aide de deux électrodes et à mesurer la différence

de potentiel électrique entre deux autres électrodes. L'espacement de ces électrodes définit le volume de roche exploré. Ces mesures permettent de déterminer la résistivité électrique de ce volume et de suivre sa variation verticale et latérale. Dans cette étude, nous avons essentiellement mis l'accent sur la variation latérale de la résistivité apparente, étant donné que l'objectif recherché consiste à cartographier les corps stériles. Les mesures ont été effectuées selon le dispositif Wenner, constitué de deux électrodes de courant (A et B) et de deux électrodes de potentiel (M et N) équidistantes [11]. Le matériel utilisé est un résistivimètre de type Syscal R2, dont la précision sur les voltages mesurés est de l'ordre d'un microvolt. L'injection du courant dans le sol a été assurée par une source d'une puissance de 250 W, utilisant une batterie de courant continu de 12 V.

La présente étude a été menée dans le gisement de Sidi Chennane, dans lequel nous avons couvert une superficie de 2,5 km² par un levé de traîné électrique. Au total, 11 profils ont été réalisés, dont neuf (1E à 9E) sont orientés nord-sud, espacés de 60 m, et dont les deux autres (1N et 2N) sont de direction est-ouest. Sur chaque profil, 26 stations de mesure ont été implantées, avec un pas de 20 m. Nous avons au préalable réalisé trois sondages électriques, dont un a été volontairement implanté près d'un puits de reconnaissance recoupant un corps stérile. Ceci nous a permis, d'une part, de déterminer la résistivité réelle des différents termes de la série phosphatée et, d'autre part, de déterminer la longueur du dispositif qui permettrait d'explorer la totalité de cette série [6, 7]. Par ailleurs, pour avoir une idée quant à la signature électrique des corps stériles, des profils tests de résistivité recoupant ces derniers ont été réalisés dans d'anciennes tranchées d'exploitation à Merah et à Sidi Daoui. La Fig. 4 présente un exemple de ces profils.

4. Résultats et discussion

Du point de vue géologique, le substratum de la série phosphatée est représenté par les marnes sénoniennes. L'épaisseur moyenne de cet étage à travers le bassin sédimentaire des Ouled Abdoun est de l'ordre de 100 m [1, 2]. L'interprétation des sondages électriques a été effectuée au moyen d'un programme basé sur la technique de Marquardt-Levenberg [12]. Elle montre que la plus profonde formation atteinte correspond à un résistant, qui se situeraient à une profondeur de plus de 120 m (Fig. 5). Ce résistant correspond probablement aux termes inférieurs de l'étage sénonien, riches en intercalaires calcaires, ou carrément au calcaire turonien. La longueur du dispositif qui a permis d'atteindre ce corps résistant est de 200 m. Les diagrammes de sondages électriques (Fig. 5) montrent également que la base de la série phosphatée

est atteinte avec une longueur du dispositif de 60 m (AB/2 = 30 m). Étant donné que, dans les gisements en cours d'exploitation, la plupart des corps stériles ne s'enracinent pas jusqu'à la base de cette série, nous avons donc adopté cette même longueur de dispositif pour les profils de résistivité réalisés à Sidi Chennane. D'ailleurs, le profil test de la Fig. 4, réalisé dans une ancienne tranchée d'exploitation montrant des corps stériles, a donné des résultats très satisfaisants, avec une longueur de dispositif de 60 m.

Pour une longueur de dispositif de 20 m (AB/2 = 10 m, Fig. 5), on constate que la résistivité obtenue dans le diagramme du haut (100 Ω m) est nettement inférieure à son équivalent sur celui du bas (600 Ω m). Ceci confirme que les corps stériles sont plus résistants que la série phosphatée normale, étant donné que le premier sondage a été implanté près d'un puits de reconnaissance qui a recoupé une série normale, alors que le second a été implanté à côté d'un puits qui a recoupé un corps stérile.

Les profils tests de résistivité montrent que, lorsque les quatre électrodes du dispositif de mesure sont dans la série phosphatée normale, les valeurs de résistivité apparente enregistrées ne dépassent guère 100 Ω m, alors que celles-ci deviennent largement supérieures à

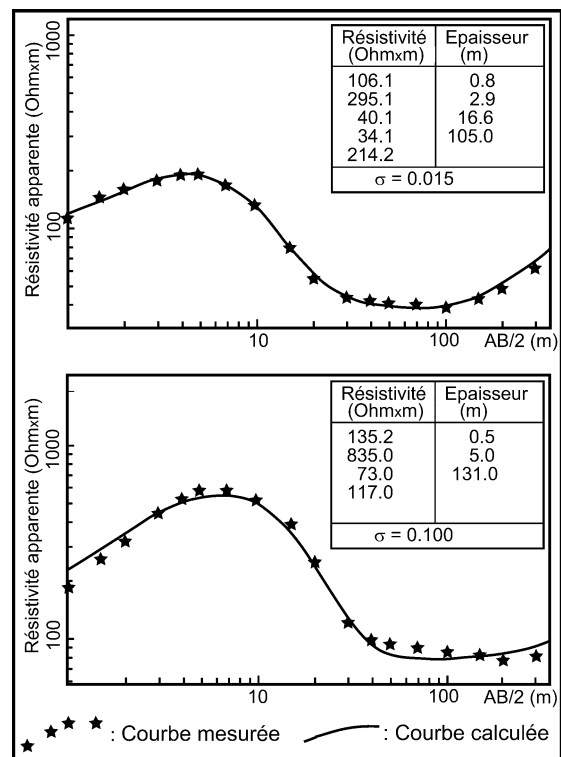


Figure 5. Exemples de diagrammes de sondages électriques réalisés à Sidi Chennane et modèles issus de leur interprétation.

Figure 5. Samples of electrical sounding diagrams achieved in Sidi Chennane and their interpretation models.

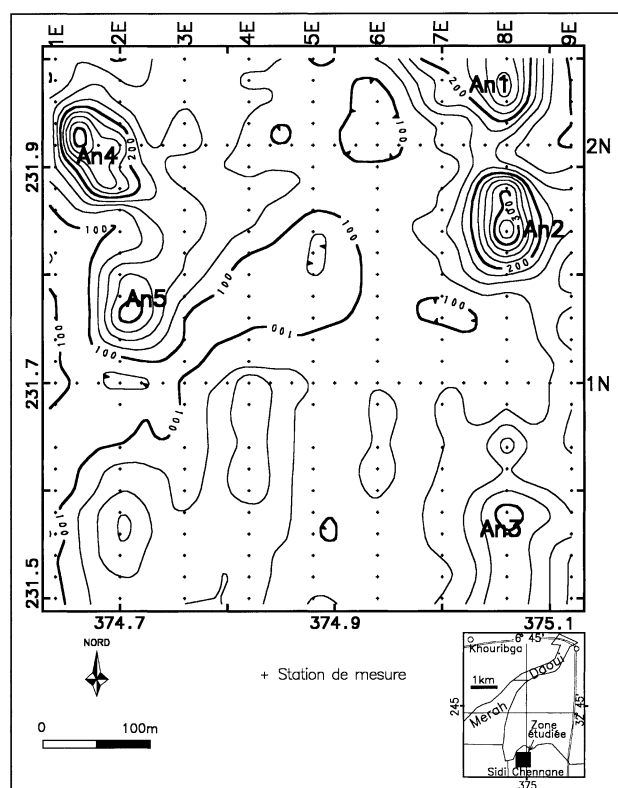


Figure 6. Carte de résistivité apparente de la zone étudiée. Isocontours en Ω m.

Figure 6. Apparent resistivity map of the studied zone. Isocontours in Ω m.

250 Ω m au-dessus des corps stériles. Statistiquement, une population de 50 mesures de résistivité apparente, effectuées au-dessus de la série phosphatée normale, a donné une valeur moyenne de 80 Ω m et un écart type de 20 Ω m. Une dizaine de mesures réalisées à l'aplomb des corps stériles donnent une valeur moyenne de 200 Ω m et un écart type de 50 Ω m. Il en ressort qu'on ne peut parler de corps stérile que lorsque les valeurs de résistivité enregistrées sont au moins de 150 Ω m, les valeurs inférieures correspondraient à une série phosphatée normale. Ces ordres de grandeur ont permis de délimiter les anomalies sur la carte de résistivité correspondant à la zone étudiée à Sidi Chennane (Fig. 6). Sur cette carte, on distingue cinq anomalies. Dans la zone extrême nord-est (anomalies An1 et An2), les valeurs de la résistivité apparente atteignent un maximum de 380 Ω m. Au sud-est de la zone étudiée, on observe une autre anomalie (An3), de l'ordre de 200 Ω m. Deux autres anomalies (An4 et An5), de même amplitude que An3, se situent dans la zone extrême nord-ouest. Dans le reste de la carte, les valeurs dépassent très rarement 150 Ω m et seraient attribuées à la série phosphatée normale. Les anomalies An1 et An2 ont été contrôlées par des sondages mécaniques

qui ont révélé l'existence de corps stériles [5], les autres anomalies restant à confirmer. En se basant sur les données géologiques des puits de reconnaissance PR6859 et PR4966, d'une part, et sur les résultats des sondages mécaniques précités, d'autre part, nous avons établi la coupe interprétative correspondant au profil de résistivité 8E (Fig. 7). Cette coupe montre que les corps stériles mis en évidence ont un diamètre moyen de 50 m et affectent particulièrement la partie supérieure de la série phosphatée. En plus des deux corps stériles déjà confirmés à la verticale des anomalies An1 et An2, nous avons mis en évidence un autre corps à l'aplomb de An3, dont l'amplitude est comparable à celle de An2.

5. Conclusion

Au terme de cette étude, la méthode de prospection électrique, facile à mettre en œuvre sur le terrain, a donné des résultats satisfaisants dans la zone couverte par les mesures à Sidi Chennane. Le présent travail a permis d'identifier cinq anomalies de résistivité, dont deux ont été contrôlées par sondages mécaniques et ont révélé l'existence de corps stériles. Les autres anomalies seront ultérieurement contrôlées par le service des sondages de l'OCF pour confirmation.

Compte-tenu des informations issues des données géologiques, des sondages mécaniques et du levé de la carte de résistivité que l'on a pu tirer sur le terrain tout au long de cette étude, nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

- les corps stériles de type I, formés exclusivement de calcaires silicifiés, offrent un contraste de résistivité largement suffisant pour être détecté par la technique des traînées électriques, à condition d'utiliser les paramètres géométriques du dispositif adaptés ;
- les corps stériles du type II et III qui ne sont pas accompagnés par de notables phénomènes de silicification et de calcification au cours de leur formation, donnent de faibles anomalies de résistivité, voire des valeurs comparables à celles obtenues à l'aplomb d'une série phosphatée normale ; il nous semble que les indices d'hématite et de goëthite que nous avons souvent rencontrés au voisinage de ces deux types de corps stériles témoignent d'un enrichissement local en fer ; si ce test est positif, la carte magnétique compléterait les informations qui seront déduites de la carte des résistivités ;
- une étude géochimique de détail serait intéressante pour voir si les corps stériles sont caractérisés par un enrichissement possible en éléments chimiques ;
- l'absence de stratification à l'intérieur des corps stériles, comparée à la série normale bien stratifiée et tabulaire, laisse à penser que sa géométrie pourrait être caractérisée par méthode de prospection géoradar.

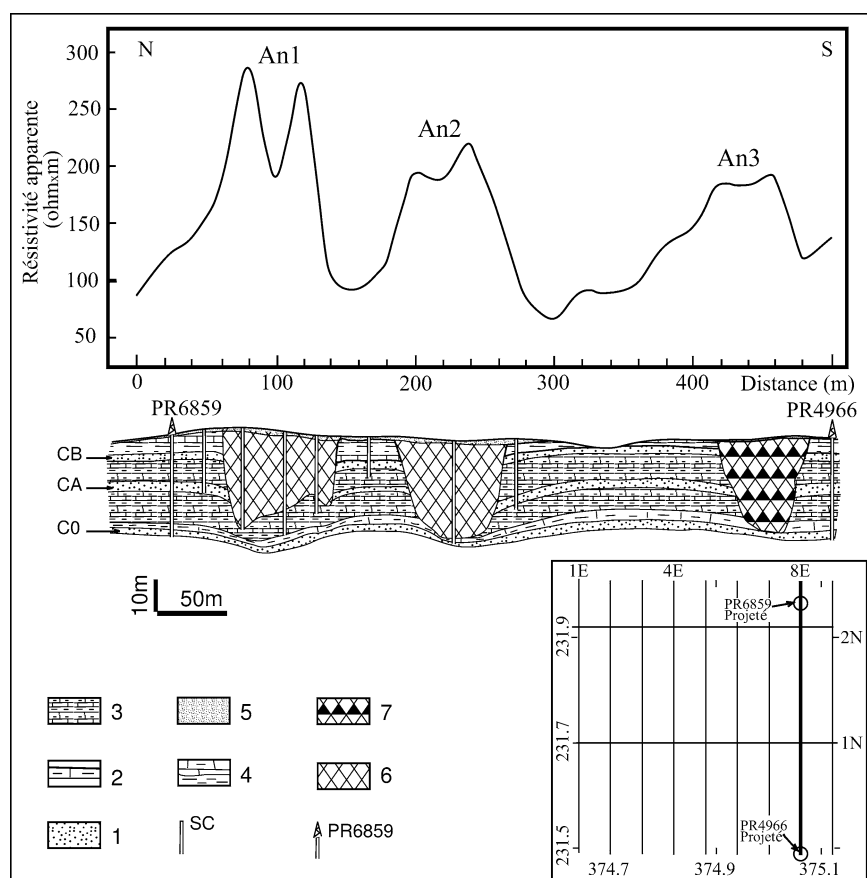


Figure 7. Interprétation du profil de résistivité 8E. 1, Phosphates ; 2, calcaires marneux ; 3, intercalation de calcaires et de marnes ; 4, marnes siliceuses et calcaires marneux ; 5, recouvrement quaternaire ; 6, corps stérile confirmé par sondages mécaniques ; 7, argiles. SC : Sondages de contrôle ; PR6859 : puits de reconnaissance. C₀, C_A, C_B : couches phosphatées exploitées.

Figure 7. Interpretation of the resistivity profile 8E. 1, Phosphates ; 2, marly limestones ; 3, limestones and mudstones interbedded ; 4, marly siltstones and limestones ; 5, Quaternary cover ; 6, sterile body confirmed by mechanical soundings ; 7, mudstones. SC: Soundings of control ; PR6859: exploration well. C₀, C_A, C_B: exploited phosphatic layers.

Remerciements. Nous remercions les dirigeants du ministère marocain de l'Énergie et des Mines (Direction des bassins sédimentaires) et ceux du Groupe chérifien de phosphate à Khouribga (service d'exploitation), respectivement pour avoir mis à notre disposition le matériel de sondage électrique et pour son soutien logistique sur le terrain. Nos remerciements vont également au Pr. P. Louis pour ses remarques constructives.

Références

- [1] M. Azmany, Évolution des faciès sur le gisement des Ouled Abdoun, Mines, Géologie et Énergie, Rabat 44 (1979) 35–38.
- [2] M. Azmany, X. Farkhany, H.M. Salvan, Gisement des Ouled Abdoun, Géologie des gîtes minéraux marocains, t. 3, Phosphates, Notes et Mém. Serv. géol. Maroc 276 (1986) 200–249.
- [3] A. Bouda, M. Salvan, État des connaissances sur le plateau continental marocain et ses dépôts phosphatés, Mines, Géologie et Énergie (1971).
- [4] G. Choubert, H.M. Salvan, Essai sur la paléogéographie du Sénonien au Maroc, Notes et Mém. Serv. géol. Maroc 2 (74) (1949) 18–50.
- [5] E. El Felah, Étude des dérangements à Sidi Chennane, rapport interne, Serv. Méthodes et Planning, OCP, 1990.
- [6] P. Louis, Utilisation des méthodes électriques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus, Mém. Soc. Géol. France 161 (1992) 17–23.
- [7] A. Osella, A. Favetto, P. Martinelli, D. Cernadas, Electrical imaging of an alluvial aquifer at the Antinaco–Los Colorados tectonic valley in the Sierras Pampeanas, Argentina, J. Appl. Geophys. 41 (1999) 359–368.
- [8] H.M. Salvan, Étude préliminaire du gisement de Sidi Daoui, rapport inédit., Serv. Carte géol. Maroc, 1960.
- [9] H.M. Salvan, Étude préliminaire du gisement de Merah El Areh, rapport inédit, Serv. Études des gisements, OCP, 2, 1961.
- [10] H.M. Salvan, Étude complémentaire sur le gisement de Merah El Areh. Étude d'ensemble des niveaux supérieurs, rapport inédit, Étude des gisements OCP 14 (1963).
- [11] W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, D.A. Keys, Applied Geophysics, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [12] B.P.A. Vander Velpen, R.J. Sporry, Resist. A computer program to process resistivity sounding data on PC compatibles, Comput. Geosci. 19 (5) (1993) 691–703.