

Géophysique interne (Géophysique appliquée)

Les sondages électromagnétiques temporels comme outil de reconnaissance du gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc) : apport à la résolution d'un problème d'exploitation

Azzouz Kchikach^{a,*}, Pierre Andrieux^b, Mohammed Jaffal^a, Mostafa Amrhar^c,
Mohammed Mchichi^d, Baadi Boya^d, Mbarek Amaghzaz^d, Thierry Veyrieras^b,
Khadija Iqizou^a

^a Faculté des sciences et techniques, BP 549, Marrakech, Maroc

^b Laboratoire de géophysique appliquée, université Pierre-et-Marie-Curie (Paris-6), 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^c Faculté des sciences Semlalia, BP 2390, Marrakech, Maroc

^d Groupe office chérifien des phosphates, Casablanca et Khouribga, Maroc

Reçu le 5 juillet 2005 ; accepté après révision le 31 janvier 2006

Disponible sur Internet le 5 avril 2006

Présenté par Xavier Le Pichon

Résumé

L'exploitation des couches phosphatées dans le gisement de Sidi Chennane (Maroc) se heurte fréquemment à des problèmes liés à l'existence, dans la série phosphatée, de corps stériles qualifiés de *dérangements*. Notre étude a démontré l'efficacité de la méthode des sondages électromagnétiques temporels (SEMt) à cartographier ces derniers, masqués par la couverture quaternaire. Elle est basée sur l'acquisition et l'interprétation de deux types de données : une série de tests effectués à la verticale d'un *dérangement* visible dans une ancienne tranchée d'exploitation, d'une part, 2500 SEMt réalisés dans une zone vierge du gisement, d'autre part. L'article est consacré à l'analyse des résultats obtenus et à la démarche à adopter en cas de levés géophysiques de grande envergure. **Pour citer cet article : A. Kchikach et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Time-Domain electromagnetic soundings as tool to recognition the phosphatic bearing of Sidi Chennane (Morocco): Contribution to the resolution of an exploitation problem. Exploitation of the phosphatic layers in Sidi Chennane deposit (Morocco) collides frequently with problems bound to the existence, in the phosphatic series, of sterile bodies qualified as *derangements*. Our study shows that these bodies, masked by the Quaternary cover can be mapped using the Time-Domain ElectroMagnetic Soundings method (TDEM). It is based on the acquisition and the interpretation of a series of tests carried out above a visible *derangement* in an old trench of exploitation and on 2500 TDEM soundings carried out in a virgin area of the deposit. The article concerns to the analysis of the results and of the proceeding for a possible large geophysics survey. **To cite this article: A. Kchikach et al., C. R. Geoscience 338 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : kchikach@fstg-marrakech.ac.ma, kchikach@yahoo.fr (A. Kchikach).

Mots-clés : Maroc ; Sidi Chennane ; Série phosphatée ; *Dérangement* ; Sondages électromagnétiques temporels ; Cartographie

Keywords: Morocco; Sidi Chennane; Phosphatic series; *Dérangement*; Time-Domain ElectroMagnetic soundings; Cartography

Abridged English version

The Moroccan basement contains more than three quarters of the phosphatic reserve of the world [4]. The biggest phosphatic deposits exist in the Ouled Abdoun sedimentary basin located in the central part of Morocco (Fig. 1A). In this basin, the tabular phosphatic series is composed of regular interbedded phosphatic and marly limestone layers down to about 50 m of thickness [3–5]. In some parts, this regularity does not exist; sterile bodies replace the phosphatic layers. These bodies (Fig. 1B), qualified as *derangements*, cause two kinds of problems: (1) as they are masked by a Quaternary cover, we do not know their volume proportion in the phosphatic layers, so the reserve calculations can be wrong; (2) they are generally hard and compact, they disturb seriously the kinematic chain of the exploitation. Indeed, in an area containing *derangement*, the boring grid may always be tightened and boreholes filled with dynamites: borehole tools, explosives and time consuming increase drastically, the cost of phosphate extraction [10]. Their localisation would permit the mining engineers to get around them during the exploitation. The present study concerns electromagnetic prospecting in two parts of Sidi Chennane area to evidence their location and size.

Geologically, the phosphatic series has a tabular structure in the Ouled Abdoun basin. Its base is a Maastrichtian formation that corresponds to phosphatic marls, uncemented phosphatic layers and limestones [7]. 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 [9,16]. Eocene corresponds to an alternation of uncemented phosphates levels, phosphatic marly limestones, discontinuous horizons of silex and silto-pelitic levels. The phosphatic series is overlain by a fossiliferous marly limestone known as ‘Thersitae slab’ [5,7]. The whole sequence is covered by a thin Quaternary cover.

In some places of deposits under exploitation, the above described sequence is replaced by *derangements* that correspond to a homogeneous mass of a silicified limestone or to a full pocket of limestone blocks and marls [12]. They have a sub-circular form; their diameter varies from 10 to more than 150 m. As they are sterile and they disturb seriously the kinematic chain

of exploitation, several exploration works by wells and mechanical boreholes have been achieved in attempt to localize them below the Quaternary cover. They did not succeed. *Dérangements* mapping using electrical resistivity profiling achieved by Kchikach et al. [12] has demonstrated the interest of the ‘electrical-resistivity’ parameter, but the weak amplitude of anomalies and the heaviness of the method did not seem sufficiently convincing to run a large program of electrical prospecting. Electromagnetic methods are a priori well adapted to this problem: (1) in fact they do not require a direct contact with soil when measuring, they are not sensitive to the surface heterogeneities; (2) they are more focalized and faster in the field than the electrical resistivity profiling method [1,2].

Time-Domain ElectroMagnetic (TDEM) method is based on the principle of using electromagnetic induction to generate measurable responses from sub-surface features. When a steady current in a cable loop is abruptly terminated a time varying magnetic field is generated [8,11]. As a result of this magnetic field, eddy currents are induced in underground conductive materials. The decay of the eddy currents in these materials is directly related to their conduction properties, and may be measured by a suitable receiver coil on the surface. The resulting curve gives the variation of the resistivity according to the time. It can be interpreted as a pseudo-section in depth [1,2,14,17].

In 2003, we have achieved several TDEM soundings tests planted on the vertical of a visible *derangement* in an old trench of exploitation in Sidi Chennane area (Fig. 2A). The gotten results (Fig. 2B) confirm that it is more resistive than the normal phosphatic series. The apparent resistivity values above the *derangement* are higher than 100 Ohm.m, while the observed values on normal phosphatic series are less than 70 Ohm.m. Delimitation of this *derangement* by TDEM soundings is in a good agreement with the exam of the *cuttings* extracted from mechanical boreholes necessary for the exploitation.

Considering these first positive conclusions, we have carried out 2500 TDEM soundings in a virgin area of 25 ha in Sidi Chennane deposit, with a 10 m spacing between two adjacent soundings. On the computed apparent resistivity map corresponding to 7 and 30 μ s samples, five main anomalies can be distinguished (An1, ..., An5, Fig. 3). Quantitative interpretation of

some TDEM sounding curves has been conducted using a software based on the Tem-Fast ProSystem technique [2]. The results corroborate the known geological model of the phosphatic series and show that the investigation depth is more than 35 m (Fig. 4). It means that the geological structures to the origin of anomalies affect the totality of this series, which is about 40 m thick in the studied area. All these anomalies are controlled by mechanical boreholes that confirm the existence of *dérangements*. An1 anomaly coincides with the recognition well CM 11774 crossing a deranged phosphatic series. Besides, progressing exploitation in the studied area revealed the existence of a great *dérangement* plumb with the An2 anomaly.

To conclude, we think that *dérangements* can be detected and delimited under Quaternary cover in the entire perimeter of Sidi Chennane deposit and in the other neighboring areas using TDEM method. However, some *dérangements* essentially formed of marly [12] can give an anomaly comparable to the normal phosphatic series. Lateral variations in this series, can also generate anomalies of weak amplitude, which may not correspond to *dérangements*. Interpretation of the resistivity map becomes then relatively difficult and must be superimposed to other maps based on the measure of another physical parameter. Considering the absence of stratification inside the *dérangement* in relationship with a normal stratified and tabular series, we think that the combination of Georadar and TDEM methods would give the required results, for all those derangements close enough to the surface of the ground.

1. Introduction

Le sous-sol marocain recèle plus des trois quarts des réserves mondiales en phosphate [4]. Ces réserves existent dans trois bassins sédimentaires dont le plus important est celui des Ouled Abdoun, au Centre du Maroc (Fig. 1A). Dans ce bassin, la couverture sédimentaire de structure tabulaire s'échelonne du Cénomaniens au Lutétien [7]. La partie supérieure de cette couverture correspond à la série phosphatée, formée d'une succession de niveaux phosphatés et d'intercalaires stériles marnocalcaires sur plus de 50 m de puissance [3–5]. Toutefois, en 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 [12]. La présence de ces corps, qualifiés de *dérangements*

par les exploitants, est à l'origine de sérieux problèmes d'exploitation :

- premièrement, lors du calcul des réserves, paramètre déterminant pour réaliser 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 ;
- deuxièmement, au cours de l'exploitation, l'existence des *dérangements* perturbe l'avancement normal des travaux (Fig. 1B). En effet, il faut forer et décaper ces derniers, ce qui constitue une consommation excessive en explosif et une usure des outils de foration, car ils sont généralement compacts et durs. Cette opération peut prendre plusieurs jours, voire quelques semaines et engendre, par conséquent, une augmentation significative du prix de revient de la tonne du phosphate exploitée [10].

Les *dérangements* sont masqués par des terres végétales et du recouvrement quaternaire et ne peuvent donc être cartographiés à partir de la surface. Les travaux de reconnaissance, jusqu'à présent réalisés par l'Office chérifien des phosphates (OCP), consistent en une campagne de puits qui traversent la totalité de la série phosphatée. Ces derniers sont exécutés selon une maille de 500 × 500 m et ne permettent pas de localiser les *dérangements* dont le diamètre varie de 10 à 150 m [12]. Leur localisation offrirait aux ingénieurs miniers de l'OCP une meilleure planification des tranchées d'exploitation, qui permettrait de les contourner lors de l'exploitation des niveaux phosphatés.

Des essais de détection et de cartographie des *dérangements* ont été tentés par Kchikach et al. à l'aide de la méthode des traînés électriques [12]. L'intérêt de l'étude du paramètre « résistivité électrique » a été en partie démontré, mais la faible amplitude des anomalies, la lourdeur de la méthode utilisée et sa trop grande sensibilité aux hétérogénéités de surface nous ont conduits à renoncer à un programme de mesures de plus grande envergure.

Les méthodes électromagnétiques (EM) sont a priori bien adaptées au problème posé. D'une part, elles sont peu sensibles aux hétérogénéités de surface et ne nécessitent pas un contact direct avec le sol. D'autre part, elles sont plus focalisantes et plus rapides de mise en œuvre que les méthodes des résistivités à courant continu. Une boucle de mesure carrée de 15 à 20 m permet d'atteindre en général une profondeur d'investigation comparable à celle qu'offrirait une ligne d'injection de courant continu de plus de 100 m de longueur [1,2].

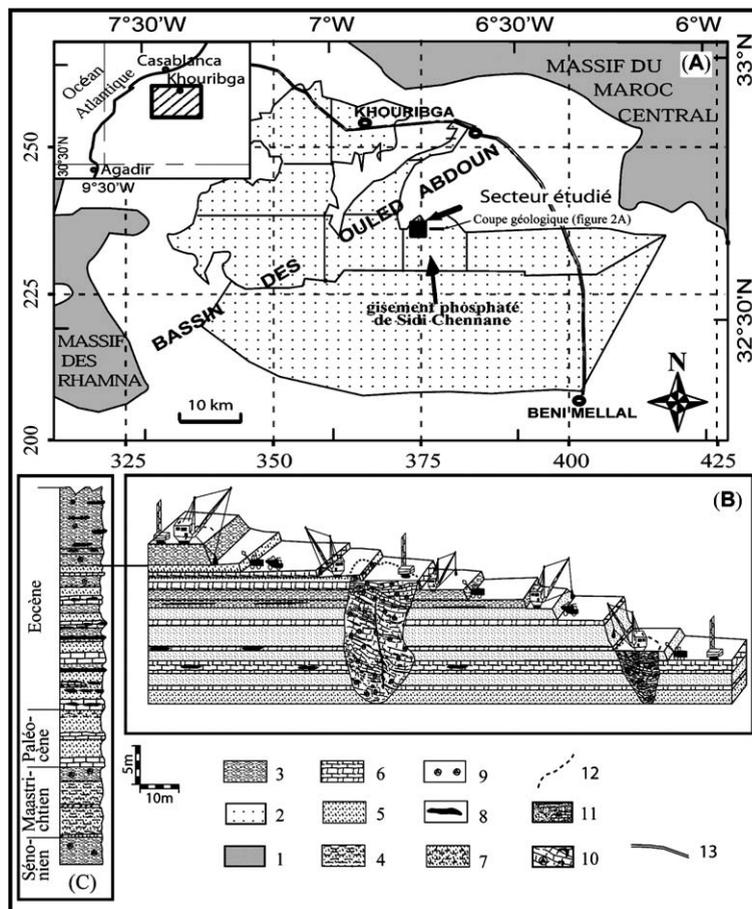


Fig. 1. (A) Situation de la zone étudiée dans le bassin sédimentaire des Ouled Abdoun. (B) Coupe montrant la perturbation de l'exploitation des couches phosphatées par la présence des *dérangements*. (C) Log stratigraphique de la série phosphatée de Sidi Chennane : (1) massif hercynien ; (2) découpage des gisements phosphatés ; (3) marnes ; (4) marnes phosphatées ; (5) couche phosphatée ; (6) calcaires ; (7) calcaire phosphaté ; (8) banc discontinu de silex ; (9) nodule de silex ; (10) *dérangement* formé exclusivement de calcaire silicifié ; (11) *dérangement* constitué d'un mélange de blocs de calcaires, de marnes et d'argiles ; (12) limite du *dérangement* ; (13) route.

Fig. 1. (A) Location of the studied area in the sedimentary basin of Ouled Abdoun. (B) Section showing the disruption of the exploitation caused by *derangements*. (C) Stratigraphical log of the phosphatic series of Sidi Chennane: (1) Hercynian massif; (2) phosphatic areas; (3) marls; (4) phosphatic marls; (5) phosphatic layer; (6) limestones; (7) phosphatic limestone; (8) discontinuous silex bed; (9) silex nodule; (10) *derangement* formed exclusively of silicified limestone; (11) *derangement* constituted of a blend of limestone blocks, marls and clays; (12) *derangement* limit; (13) roads.

Une étude géophysique expérimentale par la méthode des sondages électromagnétiques temporels (SEMt) a été menée en 2003 dans deux parties du gisement de phosphate de Sidi Chennane. Nous avons tout d'abord effectué une série de tests sur un *dérangement* visible dans une ancienne tranchée d'exploitation et ensuite réalisé 2500 sondages SEMt dans une zone vierge de ce gisement. Les cartes de résistivité apparente élaborées à l'issue de cette étude synthétisent les résultats obtenus. Nous proposons de discuter ces résultats et nous présentons ceux qui correspondent aux premiers travaux de contrôle par tranchées et sondages mécaniques déjà réalisés sur les anomalies EM mises en évidence.

2. Description de la série phosphatée et des *dérangements*

Les puits de reconnaissance réalisés dans l'ensemble des gisements phosphatés du bassin des Ouled Abdoun ont permis aux géologues de l'OCF et à d'autres chercheurs de donner une description détaillée de la série phosphatée. Celle-ci (Fig. 1C) débute par une formation d'âge Maastrichtien [7] où alternent des horizons de calcaires, de marnes phosphatées et de phosphates sableux. Le Paléocène est représenté par des phosphates meubles et des calcaires phosphatés. Il se termine par un niveau de calcaire à coprolithes et à nodules de silex, qui

constitue un horizon repère au cours de l'exploitation [9, 16]. Ce dernier est surmonté par une puissante formation d'âge Éocène, formée d'une alternance de niveaux de phosphates meubles à grains grossiers, des bancs réguliers de calcaires marno-phosphatés et d'horizons de silex. La série phosphatée se termine par une barre calcaire coquillée dite « dalle à thersités » d'âge Éocène supérieur, qui a joué un rôle important par sa résistance à l'érosion [5,7].

La série phosphatée a une structure tabulaire sur l'ensemble du bassin des Ouled Abdoun. Elle n'a été que très légèrement affectée par les mouvements orogéniques tertiaires, provoquant quelques flexures et petites failles, particulièrement visibles dans la zone de transition latérale, entre la série phosphatée saine et les *dérangements*. Ces derniers sont formés, soit exclusivement de calcaire silicifié à nodules de silex, soit par un mélange de blocs de calcaires et de marnes siliceuses, et constituent par conséquent des corps stériles au sein de la série phosphatée. Ils ont le plus souvent une forme conique ou cylindrique dont le diamètre varie de 10 à plus de 150 m. Ils sont subaffleurements et affectent généralement la totalité de la série phosphatée dont l'épaisseur moyenne est de 40 m. Du point de vue rhéologique, ils sont nettement plus durs que les termes constituants la série phosphatée normale, à tel point qu'ils posent de sérieuses difficultés aux sondeurs au cours des opérations de forages nécessaires pour l'exploitation du phosphate [10]. Les nombreuses coupes géologiques que nous avons réalisées dans des tranchées d'exploitation et dans divers affleurements montrent, qu'au-dessous de la série phosphatée, existent de puissantes formations sénoniennes où alternent des bancs de marnes, de calcaires et de gypses. Ces formations sont affectées par le phénomène de dissolution. Elles reposent elles-mêmes sur les calcaires turoniens nettement karstifiés à l'affleurement. Ces constatations nous conduisent à dire que les *dérangements* sont probablement le résultat d'effondrements gravitaires à l'aplomb de cavités, issues de la dissolution du gypse et/ou du calcaire. De telles structures ont été décrites dans des contextes sédimentaires similaires à travers le monde [6,13,15]. Une étude sédimentologique et paléogéographique sera menée très prochainement dans le cadre d'une thèse de doctorat pour tenter de comprendre et de prévoir les *dérangements* à l'échelle du bassin des Ouled Abdoun.

3. Travaux effectués et discussion des résultats

Les méthodes EM se basent sur le phénomène de diffusion d'un champ EM dans le sous-sol pour déterminer

sa résistivité électrique. Pour la méthode SEMt utilisée, ce champ EM, appelé primaire, est créé par la coupure brusque d'un courant circulant dans une bobine émettrice disposée au sol. Le champ secondaire, associé aux courants induits, est mesuré par une bobine réceptrice après la coupure.

Le matériel utilisé est de type Tem-Fast ProSystem du laboratoire de géophysique appliquée de l'université Pierre-et-Marie-Curie. Les sondages ont été réalisés en adoptant une boucle d'émission carrée de 20 m de côté et tractée au sol par quatre ouvriers. Le temps nécessaire pour effectuer un sondage est d'environ dix minutes et la durée totale de la campagne de mesure est de 50 jours.

Les courbes des sondages SEMt donnent la variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction du temps, autrement dit en fonction de la profondeur, qui croît avec le temps au cours duquel le champ secondaire est mesuré [8,11]. Les courbes enregistrées peuvent, par conséquent, être assimilées à des pseudo-profondeurs [1,2,14,17]. La profondeur d'investigation est fonction des résistivités des formations et du rapport signal sur bruit, mais aussi de la dimension de la boucle de mesures. Elle est estimée à 1,5 à 2,5 fois la grandeur de cette boucle [2].

Une première série de sondages SEMt tests a été exécutée le long de profils traversant un *dérangement* visible dans la tranchée d'exploitation T7 du gisement de Sidi Chennane (Fig. 2A). L'extension spatiale de ce *dérangement* est délimitée grâce à l'examen des *cuttings* issus des forages nécessaires aux travaux d'exploitation. Il s'agissait de la première tentative ; différents essais ont été réalisés concernant la taille du dispositif, la durée d'enregistrement et la sensibilité de l'instrument de mesure. Au total, 18 sondages avec une boucle de 20 m de côté ont été réalisés à l'aplomb de la zone dérangée et de la série phosphatée normale. Les courbes enregistrées ont été interprétées au moyen du programme TEM-RES, basé sur la technique Tem-Fast ProSystem [2]. Elles fournissent deux types d'informations positives (Fig. 2B) :

- l'ordre de grandeur des valeurs de résistivité apparente et la loi de leur variation avec le temps sont nettement établis à la verticale de la zone dérangée et de la série phosphatée saine ;
- il y a clairement deux familles de réponses relativement bien séparées. L'organisation spatiale de ces familles est en bon accord avec la connaissance *a priori* du *dérangement*. Il existe une réponse type de la série phosphatée normale ; c'est la courbe obtenue par superposition des courbes des sondages

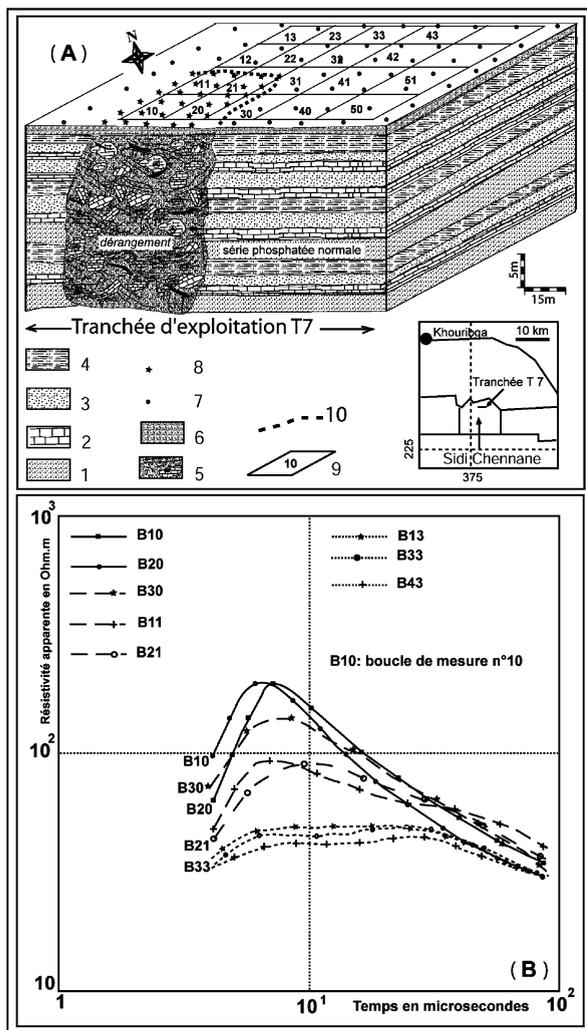


Fig. 2. (A) Coupe géologique de la tranchée d'exploitation T7 à Sidi Chennane montrant un *dérangement* et plan de position des sondages SEMt tests. (B) Courbes des sondages SEMt montrant la variation de la résistivité apparente, en passant de la zone dérangée à la série phosphatée normale : (1) marnes phosphatées ; (2) calcaires ; (3) couche phosphatée ; (4) marnes ; (5) *dérangement* ; (6) recouvrement quaternaire ; (7) forage traversant une série phosphatée normale ; (8) forage traversant un *dérangement* ; (9) boucle de mesures n° 10 ; (10) limite du *dérangement*.

Fig. 2. (A) Geological section of the T7 exploitation trench showing a *dérangement* and position plan of the SEMt soundings tests. (B) TDEM sounding curves showing the variation of the apparent resistivity while passing from the deranged zone to a normal phosphatic series: (1) phosphatic marls; (2) limestones; (3) phosphatic layer; (4) marls; (5) *dérangement*; (6) Quaternary cover; (7) borehole crossing a normal phosphatic series; (8) borehole crossing a *dérangement*; (9) measures loop number 10; (10) *dérangement* limit.

12, 13, 22, 23, 33, 40, 41, 42, 43, 50 et 51, et une signature propre à la zone dérangée (sondages 10, 20, 30, 11 et 21).

Après ces premières conclusions positives, il a été décidé de couvrir une zone vierge d'environ 25 ha du gisement de Sidi Chennane par une campagne de mesures systématiques. Cette zone a été choisie non loin de la limite d'exploitation pour faciliter ultérieurement le contrôle des anomalies géophysiques par travaux miniers et par sondages mécaniques. Au total, 2500 sondages SEMt ont été effectués selon une maille de 10×10 m. Nous avons établi des cartes de résistivité apparente pour les temps 7 et $30 \mu\text{s}$ (Fig. 3). La superposition de ces cartes permet de suivre l'évolution des anomalies EM en fonction de la profondeur et d'imager ainsi la structure du sous-sol dans la zone d'étude.

Cinq principales anomalies positives de résistivité apparente (An1 à An5, Fig. 3) ont été mises en évidence par cette étude. L'extension spatiale (quelques dizaines de mètres) et la forme grossièrement subcirculaire de ces anomalies rappellent celles des *dérangements* observés dans les tranchées d'exploitation. Ces anomalies sont aussi caractérisées par un fort gradient de résistivité à leur périphérie, traduisant vraisemblablement une variation brutale du faciès géologique en passant de la zone non anormale à la zone anormale. De plus, l'anomalie An1 coïncide avec le puits de reconnaissance CM 11774 implanté par hasard dans une zone dérangée. Ces constatations nous laissent penser que les anomalies An1 à An5 correspondent aux *dérangements* recherchés.

L'amplitude des anomalies EM mises en évidence, importante sur la carte de résistivité apparente correspondant au temps de $7 \mu\text{s}$ (Fig. 3A), s'atténue avec la profondeur, comme le montre la carte établie au temps de $30 \mu\text{s}$ (Fig. 3B). Nous avons réalisé une interprétation quantitative des courbes de certains sondages effectués à la verticale de la série phosphatée normale, où les conditions de tabularité et d'extension infinie du modèle géologique nécessaires pour l'opération d'inversion sont satisfaites. Les modèles issus de cette inversion (voir exemple, Fig. 4) confirment le relevé géologique connu de la série phosphatée et montrent une profondeur d'investigation nettement supérieure à 35 m. Cela veut dire que les structures géologiques à l'origine des anomalies An1 à An5 s'enracinent au-delà de cette profondeur et affectent probablement la totalité de la série phosphatée dont la puissance moyenne est de 40 m dans la zone d'étude.

À l'issue de cette étude, des sondages mécaniques ont été réalisés pour contrôler les anomalies EM mises en évidence et confronter l'interprétation géophysique aux données réelles du terrain. Les logs de ces sondages établis par les géologues de l'OCP montrent que la série phosphatée est nettement dérangée à la verticale des

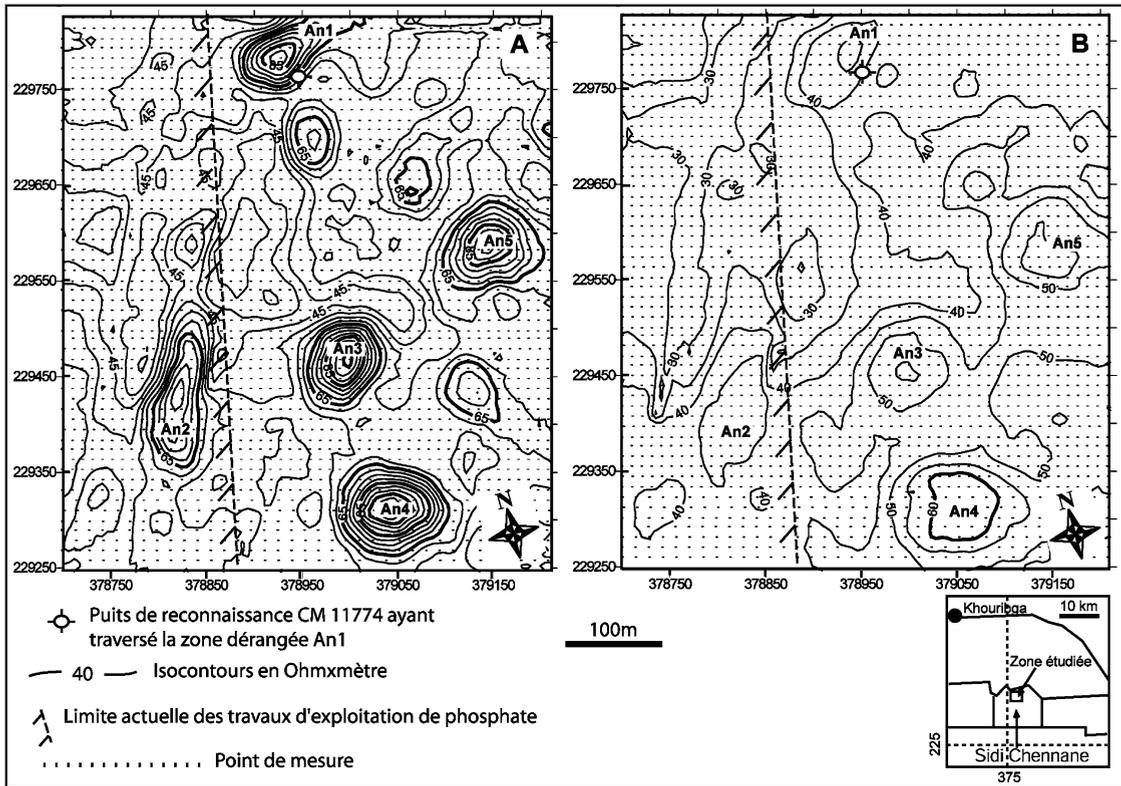


Fig. 3. (A) Carte de résistivité apparente de la zone étudiée, établie à partir de l'échantillonnage des courbes des SEMt au temps de 7 μ s. (B) Carte de résistivité apparente de la zone étudiée, établie à partir de l'échantillonnage des courbes des SEMt au temps de 30 μ s. Les axes sont gradués en coordonnées Lambert.

Fig. 3. (A) Apparent resistivity map of the studied area established from the sampling of the TDEM sounding curves at 7 μ s. (B) Apparent resistivity map of the studied area established from the sampling of the TDEM sounding curves at 30 μ s. Axes are graduated in Lambert coordinates.

anomalies An1 à An5. De plus, les travaux d'exploitation en cours dans la zone étudiée (voir limite actuelle, Fig. 3) ont révélé l'existence d'un grand *dérangement* à l'aplomb de l'anomalie An2.

4. Conclusion

Bien que le contraste de résistivité entre la série phosphatée normale et la zone dérangée soit assez faible, les résultats de cette première expérience avec les méthodes EM dans les gisements phosphatés du bassin des Ouled Abdoun sont positifs :

- la signature électromagnétique de la série phosphatée normale et des zones dérangées a pu être établie ;
- le modèle géo-électrique déduit de l'inversion des courbes des sondages SEMt, réalisés à la verticale de la série phosphatée normale, est cohérent avec les observations géologiques connues de cette série ;

- la limite de la zone dérangée est cartographiée avec une incertitude de l'ordre d'une dizaine de mètres ; elle est en excellent accord avec les résultats de l'examen des *cuttings* issus des forages nécessaires pour l'exploitation et des sondages mécaniques effectués sur les anomalies An1 à An5.

Nous pensons que la méthode des SEMt peut être utilisée pour cartographier les *dérangements* sous couverture quaternaire, dans tout le périmètre du gisement de Sidi Chennane et dans les autres gisements avoisinants. Les cartes de résistivité constitueront des documents utiles pour les ingénieurs géologues et miniers de l'OCF et leur permettront de sélectionner les secteurs où il faut concentrer l'effort de reconnaissance des gisements et les zones où l'exploitation pourra se heurter aux problèmes liés à l'existence des *dérangements*. Toutefois, certains *dérangements*, formés essentiellement d'un faciès marneux, peuvent donner une réponse comparable à celle de la série phosphatée normale ; des variations latérales de faciès, au sein de cette série, peuvent égale-

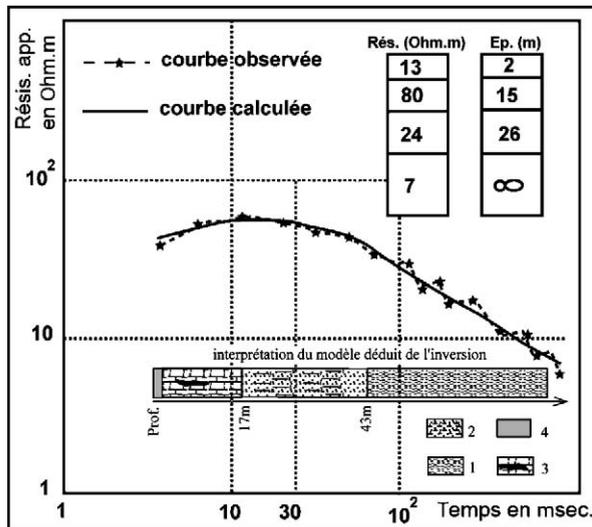


Fig. 4. Interprétation quantitative des données du sondage SEMt B33 (Fig. 2). Le modèle géologique obtenu est comparable à ceux issus de l'inversion des courbes de tous les sondages réalisés à la verticale de la série phosphatée normale. (1) marnes sénoniennes ; (2) partie inférieure de la série phosphatée à dominance de niveaux phosphatés et de marnes ; (3) partie supérieure de la série phosphatée où dominent des bancs de calcaires et de silex ; (4) recouvrement quaternaire.

Fig. 4. Quantitative interpretation of the TDEM sounding B33 (Fig. 2). The obtained geological model is comparable to those resulting from the inversion of all others soundings achieved at the vertical of the normally phosphatic series. (1) Senonian marls; (2) lower part of the phosphatic series formed essentially of phosphate horizons and marls; (3) upper part of the phosphatic series that corresponds of regular interbedded limestones and silex levels; (4) Quaternary cover.

ment engendrer des anomalies de faible amplitude, sans que celles-ci correspondent à des *dérangements*. Ceci rend relativement difficile l'interprétation des cartes de résistivité. La superposition de ces cartes avec celles qui seraient obtenues par une autre méthode géophysique pourrait faciliter l'interprétation. Vu l'absence de stratification au niveau des zones dérangées, comparée à la série phosphatée normale bien stratifiée et tabulaire, un levé par géoradar pourrait être combiné avec la méthode des SEMt.

Remerciements

Les auteurs remercient les responsables de l'OCP pour leur collaboration, leur soutien logistique et leur autorisation à publier les résultats de ce travail, ainsi que R. Lagabrielle (LCPC, Nantes) et B. Bourgeois (BRGM, Orléans) pour leurs suggestions constructives.

Références

- [1] Y. Albouy, P. Andrieux, G. Rakotondraso, M. Ritz, M. Descloitres, J.-L. Join, et al., Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TDEM soundings. Three case histories, *Ground Water* 39 (1) (2001) 87–97.
- [2] Applied Electromagnetic Research (AEMR), manual for TemFast ProSystem, Netherlands, 1997 (62 p.).
- [3] M. Azmany, X. Farkhany, H.M. Salvan, Gisement des Ouled Abdoun, in: *Géologie des gîtes minéraux marocains*, t. 3, Phosphates, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 276 (1986) 200–249.
- [4] A. Bouda, M. Salvan, État des connaissances sur le plateau continental marocain et ses dépôts phosphatés, *Mines, Géologie et Énergie*, 1971 (132 p.).
- [5] A. Boujo, Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphates des Ganntour, Maroc occidental, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 262 (1976) (227 p.); *Sci. Géol. Mém. Strasb.* 43 (1976) (227 p.).
- [6] A. Boujo, E.A. Menor, F.V. Lima, P. Magate, A.J. Melfi, O fosfato sedimentar de Congaçari (Bacia Pernambuco-Paraíba): uma jazida de concentração residual, *An. Acad. Bras. Ci.* 70 (3) (1998) 627–645 (en brésilien).
- [7] G. Choubert, H.M. Salvan, Essai sur la paléogéographie du Sénonien au Maroc, Notes Mém. Serv. Géol. Maroc 2 (74) (1949) 18–50.
- [8] M. Descloitres, R. Guérin, Y. Albouy, A. Tabbagh, M. Ritz, Improvement in TDEM sounding interpretation in case of induced polarization. A case study in high polarizable resistive rocks of Fogo volcano, Cape Verde Islands, *J. Appl. Geophys.* 45 (2000) 1–18.
- [9] M. El Mountassir, La zone rubéfiée de Sidi Daoui, altération météorique du phosphate de chaux des Oulad Abdoun (Maroc), thèse de 3^e cycle, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1977 (126 p.).
- [10] E. El Felah, Étude des dérangements à Sidi Chennane, rapport interne, Serv. méthodes et planning, OCP, 1990 (25 p.).
- [11] P.Y. Galibert, R. Guérin, P. Andrieux, Structural mapping in Basin and Range like geology by E.M. methods: a powerful aid to seismic, *Geophys. Prospect.* 44 (6) (1996) 1019–1040.
- [12] A. Kchikach, M. Jaffal, T. Aïfa, L. Bahi, Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane, Maroc, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 379–386.
- [13] J. Lucas, R. Flicoteaux, Y. Nathan, L. Prévôt, Y. Shahar, Different aspects of phosphorite weathering, *SEPM Spec. Publ.* 29 (1980) 41–51.
- [14] J.D. McNeill, Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding: Geonics technical note TN-27, Mississauga, Ontario, 1994, pp. 1–15.
- [15] E.A. Menor, La sédimentation phosphatée, pétrographie, minéralogie et géochimie des gisements de Taïba (Sénégal) et Olinda (Brésil), thèse, université Louis-Pasteur, Strasbourg, France, 1975 (153 p.).
- [16] H.M. Salvan, Étude préliminaire du gisement de Merah El Areh, rapport inédit, Serv. études des gisements, OCP 2, 1961 (14 p.).
- [17] M. Schmutz, R. Guérin, O. Maquaire, M. Descloitres, J.J. Schott, Y. Albouy, Apport de l'association des méthodes TDEM (*Time-Domain Electromagnetism*) et électrique pour la connaissance de la structure du glissement-coulée de Super Sauze (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. Ila* 328 (1999) 797–800.