

« DEBRUITAGE » D'UNE CARTE DE RESISTIVITÉ DES “DERANGEMENTS” DES PHOSPHATES MAROCAINS PAR ONDELETTE ANALYSANTE

SAAD BAKKALI*
MAHACINE AMRANI**

RESUMÉ

Une campagne de prospection électrique de type Schlumberger a été réalisée sur une zone couvrant une surface 50 ha dans le bassin phosphatier Oulad Abdoun. Un nouveau procédé basé sur le « débruitage » des données de résistivité apparente par ondelette analysante a été réalisé afin de circonscrire les zones anormales de « dérangements » des séries phosphatées. La transformée en ondelette est particulièrement indiquée pour filtrer, analyser et « débruiter » les données géophysiques singulières. L'approche par ondelette analysante appliquée à l'analyse des anomalies géoélectriques des phosphates marocains a permis de caractériser spatialement les « dérangements » tout en amoindrissant leurs caractères aléatoires. Les estimations de calcul des réserves des phosphates se trouvent fortement circonscrites.

MOTS CLEFS: résistivité ; Schlumberger ; phosphates ; ondelette ; « débruitage » ; Maroc.

RESUMEN

Se realizó un trabajo de prospección eléctrica de tipo Schlumberger en una zona de 50 ha en la cuenca de fosfatos de Oulad Abdoun. Se aplicó un nuevo método basado en “la eliminación de ruido” de los datos de resistencia aparente por ondita analizante con el fin de circunscribir las zonas anómalas de “perturbaciones” de las series fosfatadas. La transformada en ondita se indica especialmente para filtrar y analizar los datos geofísicos singulares y eliminar su ruido. El enfoque por ondita analizante aplicado al análisis de las anomalías geoeléctricas de los fosfatos marroquíes permitió caracterizar espacialmente las “perturbaciones”

* Earth Sciences Department, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier, Morocco, saad.bakkali@menara.ma

** Engineering Process Department, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier, Morocco,
amrani.mahacine@menara.ma

reduciendo al mismo tiempo sus caracteres aleatorios. Las estimaciones de cálculo de las reservas de los fosfatos se encuentran muy circunscritas.

PALABRAS CLAVE: resistencia; Schlumberger; fosfatos; ondita; eliminación de ruido; Marruecos.

ABSTRACT

Resistivity surveys have been successfully used in the Oulad Abdoun phosphate basin. A Schlumberger resistivity survey over an area of 50 hectares was carried out. A new field procedure based on analytic signal response of resistivity data was tested to deal with the presence of phosphate deposit disturbances. A resistivity map was expected to allow the electrical resistivity signal to be imaged in 2D. 2D wavelet is standard tool in the interpretation of geophysical potential field data. Wavelet transform is particularly suitable in denoising, filtering and analyzing geophysical data singularities. Wavelet transform tools is applied to analysis of a Moroccan phosphate deposit "disturbances". Wavelet approach applied to modeling surface phosphate "disturbances" was found to be consistently useful.

KEY WORDS: resistivity; Schlumberger; phosphates; wavelet; denoising; Morocco.

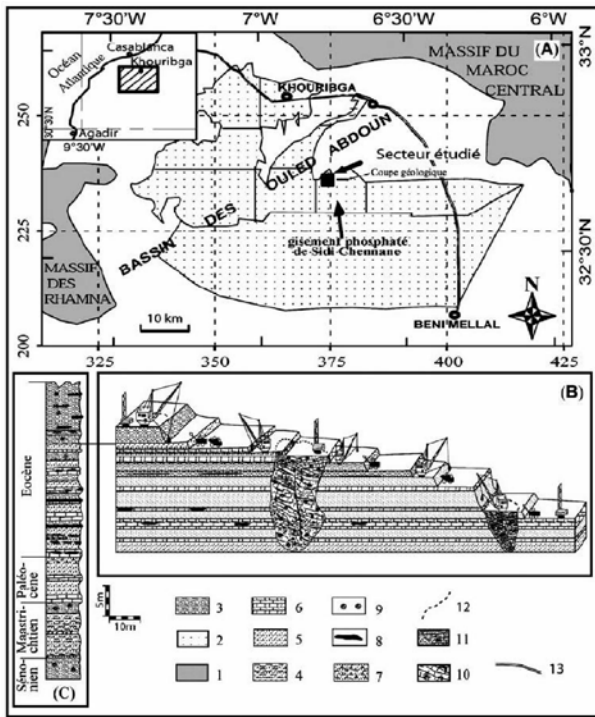
INTRODUCTION

La resistividad des matériaux est un bon indicateur et marqueur de leur nature et de leur état d'altération. Les méthodes de prospection électrique sont depuis longtemps utilisées en géologie de l'ingénieur et géotechnique. Ces méthodes, à la fois quantitatives et qualitatives, sont basées sur le principe de la loi d'Ohm. L'injection d'un courant dans le sol et la mesure du potentiel permettent de remonter à la résistivité vraie de ce dernier. La zone d'étude est le bassin de phosphate dit Oulad Abdoun (figure 1). Le secteur d'étude a été choisi pour sa représentativité. Dans la zone étudiée, et tenant compte du contexte géologique, des profils de traînée électrique sur zones « dérangées » et sur zones saines sont réalisés (Kchikach *et al.*, 2002, 2006). Ces profils, corroborés par des sondages électriques verticaux d'étalonnage, montrent et confirment l'existence des fortes valeurs de résistivité apparente. Ces fortes résistivités correspondent au phénomène constaté des « à coups de prise ». Les « à coups de prise » apparaissent au passage d'une faille sub-verticale séparant 2 terrains de résistivités différentes ; ils apparaissent également

au passage d'une zone de broyage généralement conductrice, comme au passage sur une zone localement plus résistante comme les poches de graviers et les alluvions quartzeux emballés dans un amas argileux. (Bakkali, 2005 ; Bakkali, 2006 ; Bakkali *et Bahi*, 2006). Ces zones spécifiques sont assimilées aux « dérangements » (figure 2). La résistivité apparente observée sur ces profils de traînés électriques correspondante aux « dérangements » confirmés est supérieure à 200 Ω m.

DONNÉES EXISTANTES

Les mesures de résistivité apparente ont été réalisées avec le Resistivimetre Syscal 2 de BRGM-Instruments aux sommets d'une maille de dimensions 20 m x 5 m. Le dispositif utilisé est un dispositif Schlumberger centré de longueur de ligne AB = 120 m. Pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude et afin de cibler des profondeurs de « dérangements » moyennes de 40 m, 51 profils de traînées électriques régulièrement espacés de 20 m ont été exécutés. Chacun des profils électriques représente 101 stations de mesure équidistantes de



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.

Figure 1. Localisation du bassin phosphatier Oulad Abdoun

5 m. L'équidistance entre les profils est de 20 m. L'ensemble de cette étude pilote représente ainsi 5151 mesures de résistivité apparente (figure 3).

L'interprétation directe des caractéristiques d'une anomalie géoélectrique permet d'obtenir rapidement différentes informations qualitatives et semi-quantitatives sur la nature et la position du corps perturbateur. Le corps perturbateur est supposé constitué essentiellement de « dérangements ». Les « dérangements » sont les corps potentiants. L'amplitude est proportionnelle au volume du corps perturbateur et au contraste de résistivité entre celui-ci et les roches encaissantes. Une structure n'apparaîtra pas si les roches qui la constituent ont la même résistivité que le terrain encaissant. La résistivité apparente découle d'un potentiel harmonique vérifiant l'équation de Laplace $\Delta V = 0$ en dehors des corps potentiants, et dont le gradient de celui-ci est du type $1/r^2$ (Blakely, 1995). En première approche, il est supposé qu'au « voisinage » ainsi que dans les sources représentées par les « dérangements » le potentiel scalaire vérifie l'équation $\Delta V = -2 \rho I \delta(r)$ ou $\delta(r)$ est la distribution de Dirac, ρ est la résistivité de la zone anormale et I est le courant injecté par une électrode ponctuelle sur un demi-espace élastique (surface topographique de la zone d'étude) (Telford et al., 1991). La cartographie géoélectrique réalisée par mesures de résistivités apparentes sur une grille régulière est en fait une cartographie de potentiels discrets mesurés en surface. La singularité des fortes



Figure 2. « Dérangement » réel affectant le bassin phosphatier Oulad Abdoun

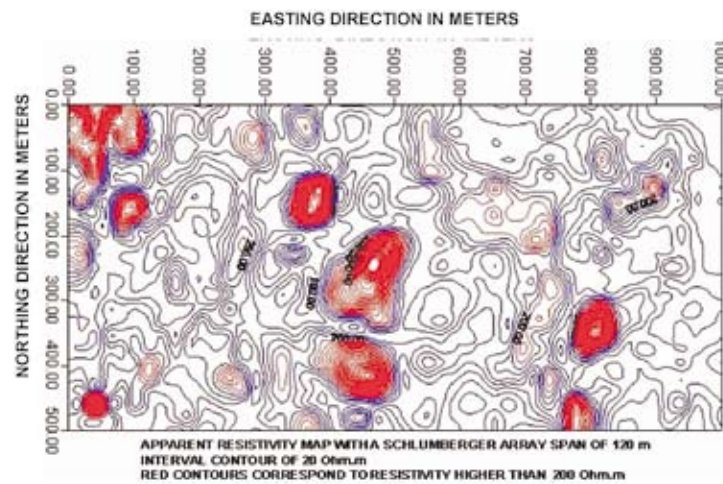


Figure 3. Carte des résistivités apparentes de la zone d'étude

valeurs de résistivités apparentes sur les zones des « dérangements » résulte à juste titre du passage d'une zone saine à une zone « dérangée ». Sous ces hypothèses, la carte de résistivité apparente est en fait par analogie une carte de différences de potentiel scalaires supposés partout harmoniques excepté dans les zones « dérangées ». La carte des résistivités anormales permet une définition physique des sources. La carte de différences de potentiel s'adonne ainsi usuellement au traitement numérique des données dans le domaine spatial et fréquentiel. L'interprétation des anomalies de résistivité correspond au processus de l'extraction de l'information relative à la position et à la composition du corps potential. Dans notre cas les corps « potentiants » correspondent essentiellement aux « dérangements ». L'amplitude de l'anomalie est considérée proportionnelle au volume du « dérangement » ainsi qu'au contraste de résistivité existant entre une zone saine et une zone dite « dérangée ». Ce contraste de résistivité est proportionnel au contraste local de densité existant entre les zones phosphatées saines et les zones « dérangées ». Cette approche quantitative dans l'interprétation des anomalies de résistivité nous permet de considérer que le niveau de « dérangements » des séries phosphatées est proportionnel à l'amplitude des résistivités apparentes mesurées (Bakkali, 2005).

L'approche par « ondelette analysante » s'en trouve ainsi fortement justifiée. Elle permettrait à juste de titre de filtrer la carte des « dérangements » et d'affiner les contours correspondants aux zones anormales.

MÉTHODE DE LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTE

La transformée en ondelette est très indiquée pour l'analyse des bruits résultants de la carte des résistivités apparentes. Cette technique puise son efficacité dans l'analyse temps-fréquence due à sa fenêtre d'analyse de dimensions souple et adaptative. Ce qui lui permet d'avoir une bonne résolution temporelle pour les composantes hautes fréquences et une bonne résolution fréquentielle pour les composantes basses fréquences du signal généré par la résistivité apparente. La transformée en ondelette utilise des fonctions de base qui peuvent être construites par dilatation, contraction et translation d'une fonction unique appelée « ondelette prototype » ou « ondelette mère ». La transformée en ondelette agit comme un « microscope mathématique » avec lequel nous pouvons observer différentes parties du signal

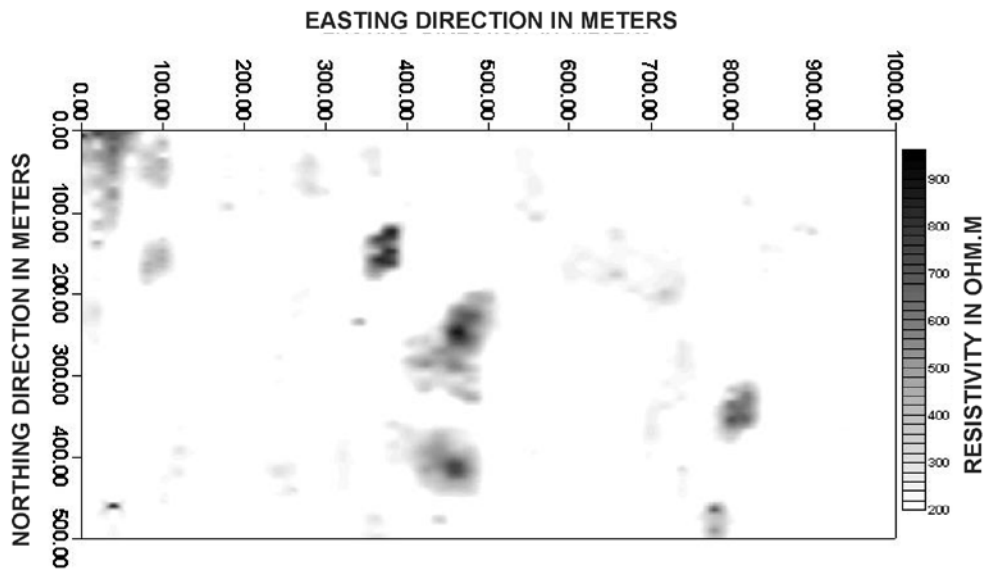


Figure 4. Carte des zones “dérangées” correspondante à la figure 3

géoélectrique correspondant aux zones anormales de « dérangements ». La transformée en ondelette est une technique dans le domaine des distributions temps-fréquence ou plus précisément temps-échelle (Ridsdill-Smith et Dendith, 1999). Pour des signaux physiques présentant des variations très rapides, des sauts, des marches, bref des discontinuités, l'analyse en ondelette est adaptée car l'ondelette va détecter ces singularités et analyser celles-ci. Cette particularité rend l'analyse en ondelette complémentaire à l'analyse de Fourier.

La version discrète de la transformée en ondelette (TOD) dans l'analyse des signaux est surtout utilisée en tant qu'élément de filtrage permettant une séparation des différentes composantes constituant les bruits géoélectriques, et par conséquent d'optimisation des zones « dérangées » des phosphates. Cette méthode comble la limite de l'analyse de Fourier standard. En effet, la transformée de Fourier permet une analyse de l'ensemble des fréquences d'un signal. Mais, elle n'est pas localisée en temps. Ainsi, elle est très adaptée pour des signaux stationnaires, étant donné leur décomposition en combinaison linéaire

d'ondes. Cependant, dès que l'on veut aller un peu plus loin, comme l'étude de signaux transitoires ou d'événements imprévisibles comme l'occurrence des ces artéfacts géologiques que sont les « dérangements », nous entrons dans les limites de cette analyse. En effet, avec cette dernière, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables, car les coefficients des fréquences correspondantes sont étalés dans toute la transformée. On peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque en peu de coefficients.

Les ondelettes sont une famille de fonctions déduites d'une fonction (ondelette-mère) par opérations de translations, dilatations et de rotations en dimension supérieure à un. Son immense champ d'application en a fait son succès actuel. On retrouve l'utilisation d'ondelettes dans des domaines de divers horizons comme les mathématiques (analyse, probabilité, fractals), le traitement du signal géophysique, la physique (mécanique quantique, turbulence), dû à sa bonne localisation à la fois en temps et en fréquence.

La méthode de la transformée en ondelette permet l'accès à des informations à haute résolution comparativement aux méthodes classiques de filtrage des données. C'est un outil particulièrement approprié et puissant de « débruitage » des données géophysiques ; notamment le filtrage et l'analyse des données issues des singularités d'un potentiel (Cella *et al.*, 2004). D'ailleurs cette dernière propriété est cruciale pour exécuter un « débruitage » linéaire efficace par ondelette analysante d'une carte d'anomalie de résistivités correspondantes à la carte des « dérangements ».

La transformée en ondelette d'un signal $f(x, y)$, ou x et y représentent respectivement les directions est et nord, et f la résistivité apparente ρ , est définie par:

$$\omega(X, Y, a, b) = \iint \frac{1}{\sqrt{|XY|}} f(x, y) \psi\left(\frac{x-a}{X}, \frac{y-b}{Y}\right) dx dy \quad (1)$$

ou $\frac{1}{\sqrt{|XY|}} \psi\left(\frac{x-a}{X}, \frac{y-b}{Y}\right)$ est le coefficient associé de l'ondelette correspondant aux échelles X and Y au point de coordonnées a and b (Sanz *et al.*, 1999). Les limites de l'intégrale double sont $-\infty$ and $+\infty$ pour les 2 variables. ψ est l'« ondelette mère » fonction qui satisfait et vérifie les conditions suivantes:

$$\iint dx dy \psi(x, y) = 0 \quad \text{et} \quad \iint dx dy [\psi(x, y)]^2 = 0$$

La condition qui permet de reconstruire la fonction f correspond à la définition et à l'existence de l'intégrale suivante:

$$C_\psi = (2\pi)^2 \iint dk_1 dk_2 \frac{|\hat{\psi}(k_1, k_2)|^2}{|k_1 k_2|} \quad (2)$$

ou $\hat{\psi}(k_1, k_2)$ représente la transformée de Fourier 2D de ψ et normalise le module du complexe C_ψ . La reconstruction originale du signal géophysique correspondent aux données de résistivité apparente peut être obtenue par l'expression suivante:

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\psi} \iint \frac{dXdY}{|XY|^2} da db \omega(X, Y, a, b) \frac{1}{\sqrt{|XY|}} \psi\left(\frac{x-a}{X}, \frac{y-b}{Y}\right) \quad (3)$$

Nous avons choisi pour notre étude l'« ondelette mère » de Morlet (Torrence et Compo, 1998) (figure 5) définie en 1D par l'équation suivante en:

$$\Psi_{Morlet}(x) = \frac{1}{\pi^4} e^{(j\alpha_0 x)} e^{-x^2/2} \quad (4)$$

ou α_0 est un paramètre d'ajustement (nombre d'onde). Le paramètre d'ajustement a été fixé à 6. C'est le plus petit nombre d'onde qui nous permet d'accéder à la reconstruction du signal géoélectrique.

Les mesures de résistivité apparente représentent une base de données de 51 profils de traînés électriques régulièrement espacés de 20 m. Chacun des profils électriques représente 101 stations de mesure équidistantes de 5 m. L'équidistance entre les profils est de 20 m. L'ensemble de cette étude représente ainsi plus de 5151 mesures de résistivité apparente. Nous avons calculé les modules des

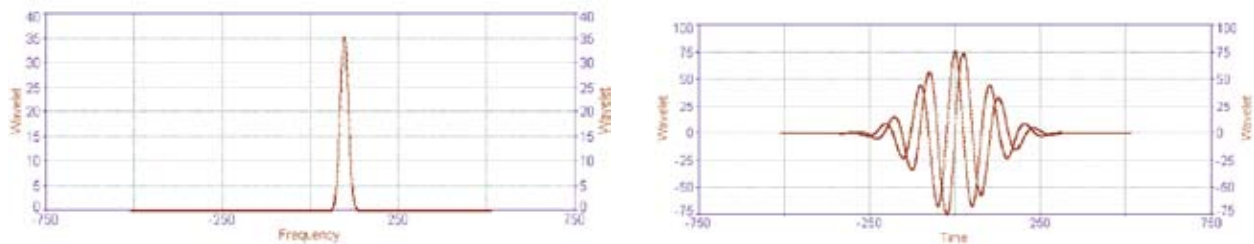


Figure 5. Réponses en temps et en fréquence de l'« ondelette mère » Morlet



coefficients associés à la transformée en ondelette en utilisant le logiciel AutoSignal (Systat, 2002) pour chacun des 51 profils de traînés électriques (figure 6).

Nous avons reporté et compilé tous les résultats pour bâtir un spectre d'ondelette 2D qui représente en fait la carte de filtrage et de « débruitage » de la carte des « dérangements » correspondants aux zones anormales des séries phosphatées de Sidi Chennane.

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

La figure 7 représente un indicateur du niveau de la variation du contraste de la densité entre les zones « dérangées » et les zones saines. La modélisation de la distribution des surfaces des zones « dérangées » correspondantes aux anomalies de résistivité apparente est obtenue par AutoSignal. L'analyse par transformée en ondelette de la distribution des « dérangements » obtenue par ce procédé a fourni un outil direct et efficace d'interprétation de la campagne de prospection géoélectrique. Cette méthode nous a permis d'identifier les zones anormales fortement corrélées avec « dérangements ».

Cette figure représente un indicateur efficace du tau de « dérangement » des zones anormales. Comparativement aux approches classiques utilisées dans le filtrage et le filtrant et « débruitage » des données géophysiques, la transformée en ondelette 2D ne présente pas de distorsion significative de la forme du signal original de la résistivité apparente.

La méthode de filtrage et de « débruitage » proposée par utilisation de la transformée en ondelette analysante 2D permet d'établir une vraie estimation du degré de « dérangement » des zones avec une suppression très significative du bruit relatif aux données de résistivité apparente.

Nous avons décrit une procédure analytique d'analyse et d'interprétation des anomalies géoélectriques dans l'industrie minière. Les résultats sont probants. Le traitement des données par transformée en ondelette analysante appliqué aux données de résistivité apparente est d'une utilité très satisfaisante. Il permet aux géologues miniers d'optimiser les calculs des réserves des phosphates sains et économiquement rentables.

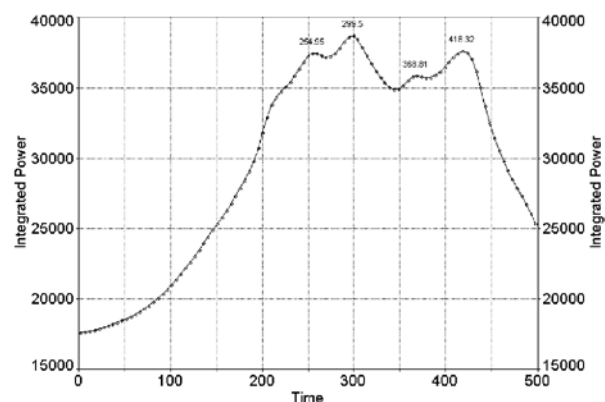
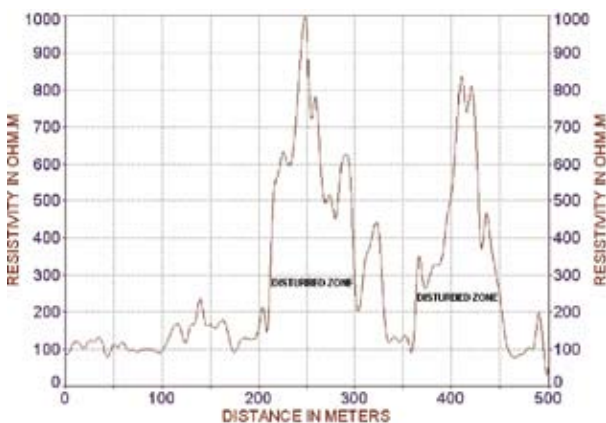


Figure 6. Exemple d'un profil de traîné électrique et sa réponse par transformée en ondelette analysante de type Morlet

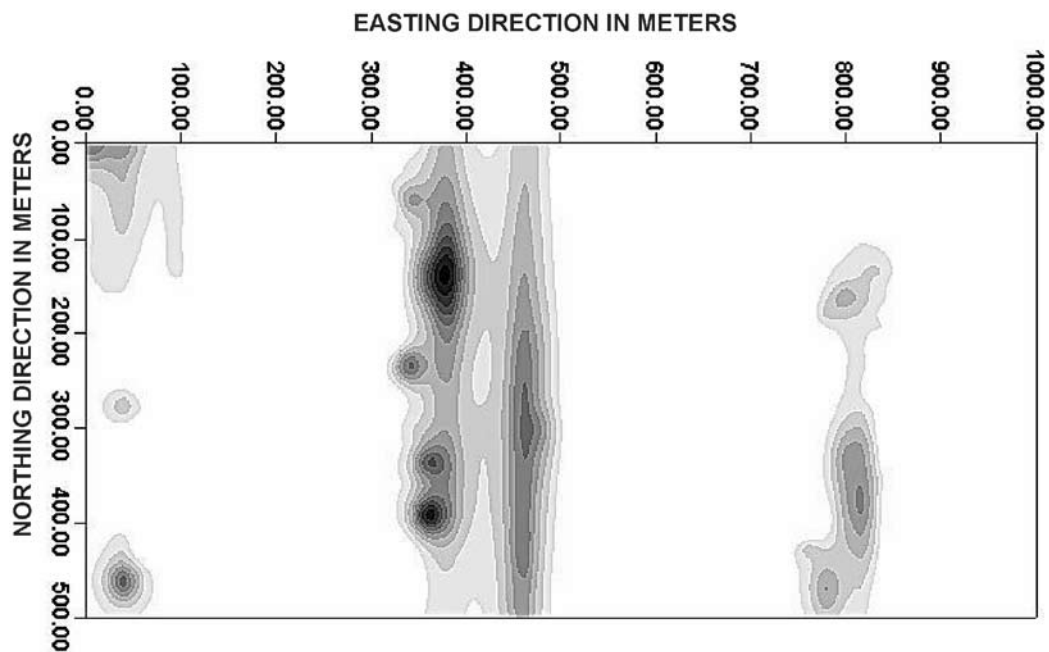


Figure 7. Réponse par transformée en ondelette analysante de la carte des "dérangements" de la figure 4

BIBLIOGRAPHIE

- Bakkali, S. (2005). Analysis of phosphate deposit "disturbances" using the horizontal-gradient responses of resistivity data (Oulad Abdoun, Morocco), *Earth Sci. Res. J.* Vol. 9, N°2, p. 123-131.
- Bakkali, S. (2006). Application du filtrage spatial à l'analyse des contours des zones anomales de « dérangements » des séries phosphatées de Sidi Chennane (Maroc), *Revue Afrique Science*, Vol. 2, N°1.
- Bakkali, S. (2006). A resistivity survey of phosphate deposits containing hardpan pockets in Oulad Abdoun, Morocco, *Geofísica Internacional*, 45 (1): 73-82.
- Bakkali, S. (2006). Optimización de anomalías en un depósito de fosfatos de Marruecos mediante el método del sombreado" *Stud.Geol.Salmant.*, 42, p. 21-32.
- Bakkali, S. et L. Bahi (2006). Cartographie des « dérangements » de séries phosphatées par mesures de résistivités électriques, *Journal des Sciences pour l'Ingénieur, J.S.P.I.*, 6, p. 1-10.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press, p. 441.
- Cella, F.; Fedi, M.; Quarta, T. and Villani, A. V. (2004). 2D continuous wavelet transform to analyze gravity data, *Geophysical Research Abstract*, Vol. 6, 07709.
- Kchikach, A.; Jaffal, M.; Aifa, T. et Bahi, L. (2002). Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc). *Comptes Rendus. Geosciences*, 334, 379-386.
- Kchikach, A.; Andrieux, P.; Jaffal, M.; Amrhar, M.; Mchichi, M.; Baadi, B.; Amaghaz, M. et Veyrieras, T. (2006). Les sondages électromagnétiques temporels comme outil de reconnaissance du gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc): apport à la résolution d'un problème d'exploitation. *Comptes Rendus. Geosciences*, 338, 289-296.
- Ridsdill-Smith, T. A. and Dendith, M. C. (1999). The wavelet transform in aeromagnetic processing, *Geophysics*, Vol. 64, 4, p.1003-1013.
- Sanz, J. L.; Barreiro, R. B., Cayon, L.; Martinez-Gonzalez, E.; Ruiz, G. A.; Diaz, F. J.; Argüeso, F.; Silk, J. and Tofolatti, L. (1999). Analysis of CMB maps with 2D wavelets, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 140, 99-105.
- Systat (2002). About AutoSignal V1.6 software, Copyright 2002 AISN Software Inc.



Telford, W. M.; Geldart L.P. and Sheriff, R. E. (1991). Applied geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

Torrence, Ch. and Compo G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis, Bull. Am. Meteorol. Soc., 79, 61-78.

Tsivouraki-Papafotiou, B.; Tsokas, G. N. and Tsurlos, P. (2005). Wavelet denoising of magnetic prospecting data, Journal. Balkan Geophysical Society, Vol. 8, 2, p. 28-36.

