



**UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI
FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES
TANGER**

**CENTRE D'ETUDES DOCTORALES : « SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR »
FORMATION DOCTORALE : « SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR »**

THESE DE DOCTORAT

PRESENTEE

POUR L'OBTENTION DU

DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

Par :

SAAD BAKKALI

DISCIPLINE : GEOSCIENCES

SPECIALITE : GEOPHYSIQUE

**L'IMPORTANCE DU FILTRAGE NUMERIQUE ET SPATIAL DES DONNEES GEOPHYSIQUES
APPLICATION AUX « DERANGEMENTS » DES SERIES PHOSPHATEES MAROCAINES :
CAS DE SIDI CHENANE**

Soutenue le 17 Février 2016 devant le Jury :

Pr. Mohammed ADDOU, Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques - Tanger :

Président

Pr. Lahcen BAH, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs - Rabat :

Examinateur

Pr. Ahmed AKHSSAS, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs - Rabat :

Rapporteur

Pr. Said BENAOUICHA, Faculté des Sciences et Techniques -Tanger:

Rapporteur

Pr. Karim EL ARRIM, Faculté des Sciences et Techniques -Tanger :

Rapporteur

Pr. Abdes-Samed BERNOUSSI, Faculté des Sciences et Techniques -Tanger :

Examinateur

Pr. Mina AMHARREF, Faculté des Sciences et Techniques - Tanger :

Directeur de thèse



**MEMOIRE DE THESE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN SCIENCES & TECHNIQUES DE L'INGENIEUR**

**L'IMPORTANCE DU FILTRAGE NUMERIQUE ET SPATIAL DES DONNEES GEOPHYSIQUES
APPLICATION AUX « DERANGEMENTS » DES SERIES PHOSPHATEES MAROCAINES :
CAS DE SIDI CHENANE**

SAAD BAKKALI

INGENIEUR GEOPHYSICIEN (EOPG-STRASBOURG) / PROFESSEUR HABILITE (FST-TANGER)

DECRET N°2.15.159 DU 09/07/2015

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	0
QUELQUES MOTS PARTICULIERS & DE REMERCIEMENTS	1
AVANT PROPOS	2
RESUME	3
INTRODUCTION GENERALE	4
LISTE DES PUBLICATIONS CHOISIES RELATIVES A LA THEMATIQUE	6
PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE D'ANALYSE ET D'INTERPRETATION NUMERIQUE DU FILTRAGE NUMERIQUE ET SPATIAL DES DONNEES GEOPHYSIQUES	
I. RAPPELS SUR LA PROSPECTION ELECTRIQUE	8
I.I. LA NOTION DE RESISTIVITE APPARENTE	9
I.II. LA RESISTIVITE APPARENTE DES SONDAGES ET DES TRAINES ELECTRIQUES	10
I.III. LES DONNEES GEOPHYSIQUES & PROCEDE DE TRAITEMENT	12
I.IV. LA PROBLEMATIQUE : CAS DES SERIES PHOSPHATEES DE SIDI CHENNANE	15
I.V. METHODOLOGIE D'ANALYSE, D'INTERPRETATION ET DE MODELISATION DES DONNEES GEOELECTRIQUES	20
A-THE SUNSHADING METHOD APPROACH	20
B-THE INVERSE DISTANCE	21
C-THE KRIGING METHOD	21
D-THE MINIMUM CURVATURE METHOD	21
E-THE SHEPARD'S METHOD	22
F-THE RADIAL BASIS FUNCTION INTERPOLATION METHOD	22
G-TRIANGULATION WITH LINEAR INTERPOLATION METHOD	22
H-THE WAVELET ANALYSIS METHOD / LA METHODE DE LA TRANSFORMEE EN ONDELETTE	22
SECONDE PARTIE : ETUDE DES DONNEES GEOELECTRIQUES DES SERIES PHOSPHATEES MAROCAINES SIDI CHENNANE	25
« <i>ENHANCEMENT OF EDGES OF SIDI CHENNANE PHOSPHATE « DISTURBANCES" USING SUNSHADING RESPONSES OF RESISTIVITY DATA</i> » , S.BAKKALI , RUSSIAN GEOLOGY & GEOPHYSICS, RGG, 48, SEPTEMBER 2007, 775-781, ISSN: 1068-7971, ELSEVIER JOURNAL	26
« <i>ABOUT THE USE OF SPATIAL INTERPOLATION METHODS TO DENOISING MOROCCAN RESISTIVITY DATA PHOSPHATE "DISTURBANCES" MAP</i> » , S.BAKKALI & M.AMRANI, ACTA MONTANISTICA SLOVACA, VOL.13, N°2, 216-222, 2008, ISSN: 1335-1788	27
« <i>DEBRUITAGE D'UNE CARTE DE RESISTIVITE DES "DERANGEMENTS" DES PHOSPHATES MAROCAINS PAR ONDELETTE ANALYSANTE</i> » , S.BAKKALI & M.AMRANI, REVISTA INGENIERIA, EIA, VOL.7, 41-49, JUNE 2007, MEDELLIN (COLOMBIA), ISSN: 1794 – 1237	28
« <i>DENOISING RESISTIVITY PHOSPHATE "DISTURBANCES" USING HAAR MOTHER WAVELET TRANSFORM (SIDI CHENNANE, MOROCCO)</i> » , S.BAKKALI & M.AMRANI, EARTH SCIENCES RESEARCH JOURNAL, ESRJ, VOL.12, N°1, 62-71, 2008, ISSN: 1794-6190	28
TROISIEME PARTIE : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	29
A-INTRODUCTION	29
B-CONCLUSIONS	29
C-PERSPECTIVES	30
REFERENCES	32
RECUEIL DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS	35

QUELQUES MOTS PARTICULIERS & DE REMERCIEMENTS

La présentation d'un mémoire de thèse, sous forme d'un recueil des travaux, et ce en vue de candidater à l'obtention du Doctorat en Sciences & Techniques de l'Ingénieur, pourrait sembler apparaître telle une tâche quelque peu fort singulière. Néanmoins, considérant le classique exercice inhérent à la définition même du « doctorat », il est d'usage que dans les sciences, et à fortiori en sciences et techniques, le mémoire comporte une partie bibliographique accompagnée d'une revue de littérature, d'une réflexion théorique et de la réalisation d'une problématique.

Ce cheminement singulier, abstraction faite du traditionnel triptyque « thèse, antithèse, synthèse », a été observé à travers les différents travaux exposés dans ce manuscrit, qui n'en demeure pas moins une thèse au sens stricto sensu, et ce en dépit d'un style académique peu usuel.

A travers ce présent mémoire il est tenté, modestement et humblement, de légitimer les aptitudes scientifiques à concevoir, de coordonner et de réaliser des activités de recherche, par le biais de la présentation de nos travaux post-habilitation universitaire, et ce en vue de l'obtention du Doctorat au droit du décret ministériel rectificatif N°2.15.159 du 09/07/2015 spécialement dédié aux Professeurs-Habilités.

Je remercie Monsieur le Doyen de la FST-Tanger, Monsieur le Professeur M.Addou, de m'avoir honoré en présidant ce jury, et ce après m'avoir exprimé ces encouragements et ses conseils à la réalisation de cette thèse un tant soit « peu-beaucoup » singulière.

Mes remerciements mélangés, je dirais même malaxés à des sentiments de profonde et sincère amitié vont tout naturellement au Professeur L.Bahi, à propos duquel tous mes qualificatifs les plus élogieux ne pourraient suffire à le décrire. Il est Monsieur Bahi. Il est Monsieur le Professeur Bahi !...Pour l'immense majorité que nous sommes et dont particulièrement je suis,....un très grand merci pour tout ce parcours !

J'exprime toute ma reconnaissance la plus cordiale au Professeur A.Akhssas d'avoir accepté d'assumer la délicate tâche de rapporteur externe. Ma gratitude et mes vifs remerciements vont également aux Professeurs S.Benaouicha, K.El Arrim et A.Bernoussi d'avoir accepté volontiers d'endosser respectivement et à juste titre, les rôles et les qualités de rapporteur interne et d'examineur.

Ces mots particuliers et de remerciements ainsi énoncés, il va sans dire que ma très sincère reconnaissance assortie de mes remerciements particuliers s'adressent au Professeur Mina Amharref, Chef du Département des Sciences de la Terre de la FST-Tanger, d'avoir de bon gré immédiatement accepté de revêtir les qualités et responsabilités de superviseur et d'encadrant-directeur de cette thèse, et ce dans un souci de respect du Cahier des Normes Pédagogiques Nationales Relatif au Cycle Doctoral. Ses encouragements constants et ses conseils éclairés ont été d'un grand recours.

Mes remerciements vont également, et en l'occurrence, à toutes et à tous, celles et ceux, qui par leurs gestes, leurs encouragements, ont permis de franchir ce présent cap.

Merci à tous.

AVANT PROPOS

Ce mémoire constitué d'une partie de l'ensemble des publications et communications réalisées après l'obtention de l'Habilitation Universitaire, pourrait à certains égards ne pas prétendre représenter une « thèse » au sens étymologique du terme. Les travaux s'y référant forment la « pierre » angulaire des conditions de l'article 8 modifié du décret 2.15.159 (*BO. N°6385 du 10/08/2015*) permettant aux Professeurs-Habilités de présenter leurs travaux de recherche, et à titre dérogatoire, en vue de l'obtention du diplôme du Doctorat conformément au Cahier des Normes Pédagogiques Nationales.

Ce Doctorat, ainsi défini, au-delà de sa représentation un tant soit peu symbolique leur permet ainsi, à l'instar de leurs autres collègues, de candidater administrativement au reversement dans le cadre des Professeurs de l'Enseignement Supérieur au droit de l'arrêté ministériel N°2645.15 du 16/07/2015 (*BO. N°6393 du 07/09/2015*).

Il en découle, implicitement au vu de ces considérations, que ce présent manuscrit intègre un cheminement singulier, à travers les différents travaux qui y sont présentés, reflétant ainsi l'approche d'une thèse au sens stricto sensu, et ce en dépit d'un style académique peu usuel.

Cette exigence administrative, indéniablement pesante, nous a volontairement contraint à opter plutôt pour la présentation, certes succincte mais néanmoins circonscrite, d'une problématique étudiée aux réponses variées, avec l'introduction de l'état des lieux de nos actuels travaux. Nous avons décidé de faire un exposé des différentes méthodologies développées dans l'analyse et l'interprétation de la problématique du filtrage numérique et spatial aux fins du « débruitage » des données géophysiques par le biais de nos publications et communications immédiatement réalisées après notre Habilitation Universitaire. Malgré le fait d'avoir traité sous la même optique, et à maintes reprises sous forme de publications les données gravimétriques du Maroc, nous avons décidé de nous consacrer aux données géoélectriques des séries phosphatées marocaines de Sidi Chennane. Il n'en demeure pas moins que l'une et l'autre des bases des données, répond à juste titre aux mêmes outils numériques développés dans ce recueil.

La jointure de l'ensemble sera donc constituée de trois parties articulées autour de publications choisies à titre d'exemple. Une conclusion technique de synthèse et quelques réflexions des perspectives clôtureront le manuscrit auquel est joint l'ensemble de nos contributions.

RESUME

Le présent manuscrit constitue le mémoire de thèse de doctorat synthétisant nos travaux de recherche appliquée développée ces dernières années au sein de la Faculté des Sciences & Techniques. Ces travaux s'intègrent dans la continuité de nos thématiques développées auparavant dans le cadre de nos travaux préparatoires de l'Habilitation Universitaire. Jugée dotée d'une actualité qui ne se départit pas des résultats singuliers auxquels elle a donné naissance, la thématique développée dans le mémoire traite de l'importance du filtrage numérique dans l'analyse, l'interprétation et la modélisation des données géophysiques.

Cette analyse contributive développée dans nos diverses publications dédiées aux séries phosphatées de Sidi Chennane, participe du souci de donner aux intervenants dans le process cinématique d'exploitation de ces phosphates des outils pertinents et efficaces à même de circonscrire les estimations des réserves des séries phosphatées dites « saines » ou non « dérangées ». Au droit de ce contexte, la méthode de prospection géophysique dite méthode des résistivités électriques, également simplement prospection électrique par courant continu, a été réalisée sur une surface de 50 Ha constituant le site directeur d'un avant-projet pilote. Les acquisitions des résistivités électriques d'une aussi forte densité, plus de 15000 données, présentent ainsi un risque potentiellement accru de fortes variations du rapport signal/bruit.

Comme toute campagne de prospection géophysique à grand rendement d'acquisition comme l'est celle-ci relative à l'étude des séries phosphatées de Sidi Chennane, le filtrage numérique s'en trouve fortement légitimé et par conséquent s'impose de fait, et ce par le souci d'optimiser l'estimation des réserves « saines », pour les exploitants phosphatiers. Ainsi 3 cartes de résistivités électriques ont été réalisées avec des longueurs de ligne de courant respectives de 40, 80 et 120m. Sur celle de longueur de ligne de 120m, ont été opérés et analysés les différents outils de « débruitage » et de filtrage numérique allant de l'interpolation à la modélisation par ondellette analysante. Les résultats singuliers attendus représentent une compilation comparative de quatre publications scientifiques faisant l'objet principal de la 2nde partie de ce manuscrit.

Les diverses conclusions participent toutes du même constat, à savoir la mise en exergue de l'importance cruciale du filtrage numérique dans l'interprétation et la modélisation des données géophysiques comme le sont celles de résistivité électrique de ces séries phosphatées. L'estimation des réserves « saines » apparaît fortement tributaire de la méthodologie choisie.

INTRODUCTION GENERALE

La géophysique appliquée est la partie de la géophysique dont nous attendons des informations pour les activités humaines dans différents domaines. La géophysique appliquée est basée sur la mesure et l'analyse de paramètres physiques du sol à l'aide d'outils spécifiques. La distribution spatiale du paramètre mesuré donne une indication sur la nature et la géométrie du milieu investigué. Les méthodes géophysiques sont appelées actives ou passives selon que la propriété physique mesurée est induite par une source contrôlée ou non. Ainsi donc, dans le sens originel du mot, la géophysique appliquée correspond à la prospection géophysique, telle la recherche de substances utiles dans le sous-sol ou d'objets enfouis, ou plus généralement d'entités souvent appelés corps potentiants.

De nombreuses méthodes dénommées à juste titre méthodes indirectes permettent d'accéder à des paramètres de profondeur à partir d'une acquisition de surface. La gravimétrie, la scintillométrie, les méthodes sismiques, les méthodes électromagnétiques et, plus particulièrement, la méthode électrique en sont quelques outils-exemples usuellement rencontrés dans des domaines aussi divers que le génie civil, l'archéologie, l'hydrogéologie, la prospection pétrolière, la géothermie,..., ou la prospection minière. Du point de vue industriel, la prospection géophysique concerne presque exclusivement la recherche d'hydrocarbures, grâce à laquelle elle doit son développement technique sans cesse croissant. Dans d'autres domaines dits mineurs comme le minier, souvent de façon originale, elle permet d'étudier et de préciser l'extension d'un gisement déjà connu, mettant en relief l'utilité de son emploi de part sa facilité d'usage à l'égard des études de grandes surfaces à distance.

Dans ce contexte précis, la méthode des résistivités électriques dite tout simplement méthode de prospection électrique, qui par définition est une méthode active, est à la base des études dédiées aux séries phosphatées marocaines de Sidi Chennane dans ce présent manuscrit.

Relativement peu utilisée pour des prospections profondes, la prospection électrique, très utile en prospection minière et en génie civil, est une technique d'exploration géophysique basée sur les variations de résistivité du sous-sol, utilisant la loi d'Ohm et permettant ainsi de déterminer la répartition des matériaux dans le sol par l'intermédiaire de celles-ci. Qu'elles qu'en soient les variantes, les méthodes de prospection électrique sont toutes sans exception soumises à des contraintes d'ordre physique, matériel ou financier. Bien qu'elle soit un des maillons essentiels dans l'acquisition de connaissances du potentiel phosphatier du bassin de Sidi Chennane, les mesures de résistivité électrique acquises pour cerner au mieux sa connaissance sont, comme toute campagne de mesures géophysiques à grand rendement, « bruitées » et devraient donc nécessairement subir un « débruitage » ou « filtrage » afin d'optimiser

l'évaluation des réserves des phosphates dites « saines » au droit de celles qualifiées de « dérangées » ou « perturbées » comme il sera décrit ultérieurement dans ce mémoire, lequel se décline en 3 parties.

La 1^{ère} partie est consacrée à la présentation, et de la problématique des « dérangements » de la série phosphatée de Sidi Chennane, qui au demeurant représente un des handicaps majeurs de la chaîne cinématique d'exploitation, et de la méthode de prospection géophysique, de type méthode électrique, adoptée pour la mise en évidence de ceux-ci. La problématique du « filtrage » des données géophysiques, en l'occurrence celles de résistivité électrique, est également exposée de façon détaillée à laquelle est adjointe la méthodologie d'analyse, d'interprétation et de modélisation des données géoélectriques que sont les résistivités électriques. Les outils numériques utilisés dans le traitement et l'analyse des zones anormales des « dérangements » de ces séries phosphatées y sont présentés. La 2^{nde} partie est dédiée à l'étude des données géoélectriques des séries phosphatées marocaines de Sidi Chennane par la présentation des résultats à travers différentes publications réalisées dans cette thématique. La dernière partie de ce mémoire renferme une conclusion assortie des perspectives de développement envisagées dans le cadre de nos travaux.

**L'IMPORTANCE DU FILTRAGE NUMERIQUE DES DONNEES GEOPHYSIQUES
APPLICATION AUX « DERANGEMENTS » DES SERIES PHOSPHATEES MAROCAINES :
CAS DE SIDI CHENNANE**

LISTE DES PUBLICATIONS CHOISIES RELATIVES A LA THEMATIQUE

« Enhancement of edges of Sidi Chennane phosphate « disturbances” using sunshading responses of resistivity data” », **S.Bakkali**, **Russian Geology & Geophysics**, RGG, 48, September 2007, 775-781, **ISSN: 1068-7971**, Elsevier Journal

« About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate “disturbances” map », **S.Bakkali** & M.Amrani, Acta Montanistica Slovaca, Vol.13, N°2, 216-222, 2008, **ISSN: 1335-1788**

« Débruitage d’une carte de résistivité des “derangements” des phosphates marocains par ondelette analysante », **S.Bakkali** & M.Amrani, Revista Ingenieria, EIA, Vol.7, 41-49, June 2007, Escuela de Ingenieria de Antioquia, Medellin (Colombia), **ISSN: 1794 - 1237**

« Denoising resistivity phosphate “disturbances” using Haar mother wavelet transform (Sidi Chennane, Morocco) », **S.Bakkali** & M.Amrani, Earth Sciences Research Journal, ESRJ, Formerly GEOFISICA COLOMBIANA, Vol.12, N°1, 62-71, 2008, **ISSN: 1794-6190**

LISTE DES COMMUNICATIONS CHOISIES

« Denoising resistivity phosphate “disturbances” using Haar mother wavelet transform (Sidi Chennane, Morocco) », **S.Bakkali** & M.Amrani, 22nd Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009 (**SAGEEP PROCEEDINGS 2009**), Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS), 29 March - 2 April 2009, Fort Worth, Texas, USA.

«Modelling phosphates “disturbances” depth using analytical responses of geoelectrical resistivity data (Sidi Chennane, Morocco) », **S.Bakkali**, 24th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2011 (**SAGEEP PROCEEDINGS 2011**), Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS), April 10-14, 2011, Charleston, South Carolina, USA.

PREMIERE PARTIE : METHODOLOGIE D'ANALYSE ET D'INTERPRETATION NUMERIQUE DU FILTRAGE NUMERIQUE ET SPATIAL DES DONNEES GEOPHYSIQUES

I. RAPPELS SUR LA PROSPECTION ELECTRIQUE

Le proche sous-sol est un milieu physique dont les structures et les propriétés sont une des cibles privilégiées des méthodes géophysiques, notamment les méthodes électriques qui ont pour but la détermination de la résistivité électrique ρ (en $\Omega.m$) des structures étudiées. La résistivité est donc la capacité d'un milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. Cette résistivité dépend de différents facteurs tels que la salinité du fluide, la saturation, la porosité ou encore la température du milieu étudié.

La prospection électrique, qui est l'une des techniques d'acquisition de la résistivité électrique, est usuellement utilisée en géophysique dans le but de caractériser des fractures détecter des cavités ou des corps gelés, imager des intrusions ou des migrations d'eau salée dans le sol, détecter la présence de vestiges archéologiques, étudier la structure des sols et de la proche surface, ou encore délimiter des décharges et déceler des migrations de polluants dans le sol .

Dans le cas de la prospection électrique en courant continu, le courant électrique est principalement transporté par les ions (conduction électrolytique dans les fluides) ou plus rarement par les électrons (conduction électronique dans les métaux). La résistivité des différents matériaux, inertes ou vivants, est donc une propriété physique variant dans de grandes proportions, ce qui constitue un atout majeur des méthodes électriques. Ces dernières ont pour objet, et pour ainsi dire, de décrire structurellement ce milieu de la façon la plus complète autant se faire, soit en 2D ou 3D, et ce à partir de l'étude des variations d'une de ses propriétés physiques qu'est la résistivité électrique. Dans la nature, la gamme des résistivités est très étendue, variant de moins de 1 $\Omega.m$ à plusieurs milliers d' $\Omega.m$ (Figure.1). Cette grande variabilité peut s'étendre de l'eau de mer (0.25 $\Omega.m$) aux sols gelés (10000 $\Omega.m$). La granulométrie et l'humidité influent sur le milieu. Elle se prête facilement à des mesures répétitives à grand rendement. Les méthodes qui permettent ainsi de quantifier la résistivité électrique sont diversement classées entre les méthodes électriques et électrostatiques où l'effet des variations temporelles est légitimement négligé. La cartographie des variations de la résistivité électrique nécessite souvent la fixation d'un pas d'échantillonnage bidirectionnel adéquat sur de grandes surfaces, comme il est sujet lors de cette étude des « dérangements » des séries phosphatées de Oulad Abdoun.

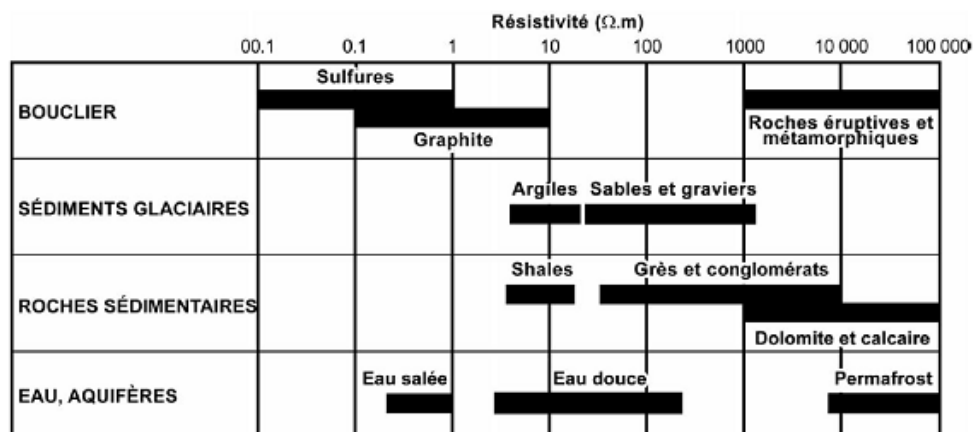


Figure.1 : gamme des résistivités électriques pour différents matériaux géologiques.

La réalisation d'une prospection géophysique est intrinsèquement de facto soumise ainsi aux contraintes propres à la méthode elle-même, à celles propres à l'appareil d'acquisition et ainsi qu' au protocole donné des mesures. Ainsi la plupart des données géophysiques contiennent les contributions de différents phénomènes, chacun ayant une échelle de longueur caractéristique. La difficulté majeure intervient lorsque l'on désire étudier un phénomène bien particulier, et donc isoler sa composante propre dans les signaux observés. Un filtrage est alors nécessaire, mais isoler les diverses composantes demeure une étape délicate, car c'est toute l'interprétation géophysique qui en découle qui peut être affectée par une mauvaise séparation des signaux. L'importance de l'analyse du filtrage des données, à fortiori celles de résistivités électriques, participe donc de la prise en compte de tous ces aléas.

La présentation de la présente étude est une contribution sur l'importance du filtrage des données géophysiques dans l'interprétation et l'évaluation d'un « phénomène » singulier que sont les « dérangements » ou « perturbations » au droit des connaissances géologiques des séries phosphatées de Oulad Abdoun.

I.1. LA NOTION DE RESISTIVITE APPARENTE

La mesure de la résistivité d'une structure s'effectue en injectant un courant électrique dans celle-ci au moyen d'électrodes d'injection (souvent nommées *A* et *B*) et en mesurant la différence de potentiel créée par le passage du courant au moyen d'électrodes de mesure du potentiel (souvent nommées *M* et *N*), (Figure.2). Le nombre d'électrodes, ainsi que leur agencement définit le dispositif électrique utilisé. La configuration du dispositif est choisie selon la problématique de l'étude. Les électrodes peuvent être sur ou sous la surface du sol. En acquisition 2D (deux dimensions) de surface, les principaux dispositifs communément utilisés sont le Wenner, le Wenner-Schlumberger, le dipôle-dipôle, le pôle-dipôle et le pôle-pôle (Figure.3). Le dispositif pôle-pôle est un peu particulier puisque les secondes électrodes de courant et de potentiel

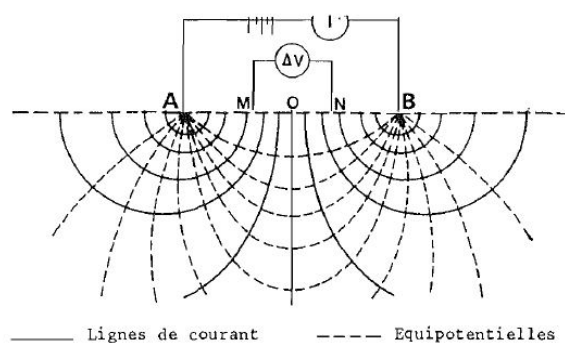


Figure.2 : principe de la mesure des résistivités électriques.

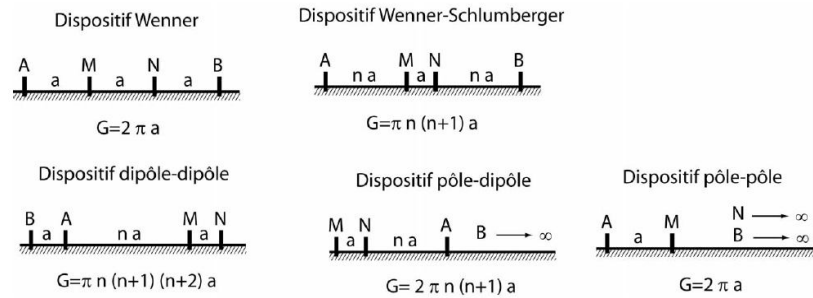


Figure.3 : les différents dispositifs utilisés prospection électrique A et B sont des électrodes d'injection de courant et M et N des électrodes de mesure du potentiel.

Le dispositif pôle-pôle est un peu particulier puisque les secondes électrodes de courant et de potentiel doivent être placées théoriquement «à l'infini». Si les distances des dispositifs utilisées sont grandes, le respect de cette contrainte théorique peut rapidement devenir un problème. Le dispositif pôle-dipôle souffre du même inconvénient mais dans des proportions moindres puisque seule une électrode de courant est «à l'infini». La différence de potentiel dépend de l'intensité du courant injecté, de la disposition des électrodes et de la résistivité électrique du matériau constituant l'objet étudié. Il est alors possible de déduire une répartition de la résistivité dans la structure en se basant sur la forme du champ de potentiel. Dans le cas d'un milieu théoriquement homogène et isotrope, la résistivité mesurée correspond à la résistivité vraie du matériau, ce qui n'est pas le cas pour des milieux hétérogènes. Comme la plupart des terrains étudiés ne représentent évidemment pas des sols homogènes, il est fait alors appel dans le cas d'un milieu hétérogène, au concept de résistivité apparente dont la définition est la suivante:

$\rho_{apparent} = G \frac{\Delta V}{I}$ avec ΔV la différence de potentiel mesurée (mV) et I le courant injecté (mA).

Cette mesure est attribuée au centre du dispositif bien qu'elle concerne un volume de sol tributaire de la distance entre les électrodes et leur schéma d'implantation. Le paramètre G est appelé le facteur géométrique (en mètres); il permet l'expression de la résistivité apparente dans un espace de géométrie simple. Il est défini pour un quadripôle dont les électrodes sont sur ou sous la surface et pour un demi-espace homogène avec une limite plane par:

$$G = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} \right)^{-1}$$

I.II. LA RESISTIVITE APPARENTE DES SONDAGES ET DES TRAINES ELECTRIQUES

Néanmoins, dans la plupart des cas, le sous-sol peut être représenté par un empilement de couches de matériaux différents et dont les limites intra-couches seraient plus ou moins différenciées. Sur ces sous-sols hétérogènes, une variation des caractéristiques du dispositif utilisé pour la mesure (en d'autres termes la variation du facteur géométrique K) induit indéniablement une variation dans la mesure de la résistivité électrique. Ces variations reflètent les changements de faciès au sein même du sous-sol étudié. Deux classes d'observables sont ainsi réalisées. La variation de la résistivité électrique en fonction de la profondeur correspond à un sondage électrique vertical (Figure.4). Lors de l'exécution d'un sondage électrique il est recherché comment varie, en un point donné de la surface, la résistivité du sous-sol à la verticale. Pour cela est pratiquée en un même

endroit une succession de mesures, en augmentant chaque fois toutes les dimensions du dispositif. Il est mis ainsi en évidence les changements de constitution géologique suivant la verticale. Les mesures peuvent être réalisées avec les dispositifs classiques comme Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, etc...

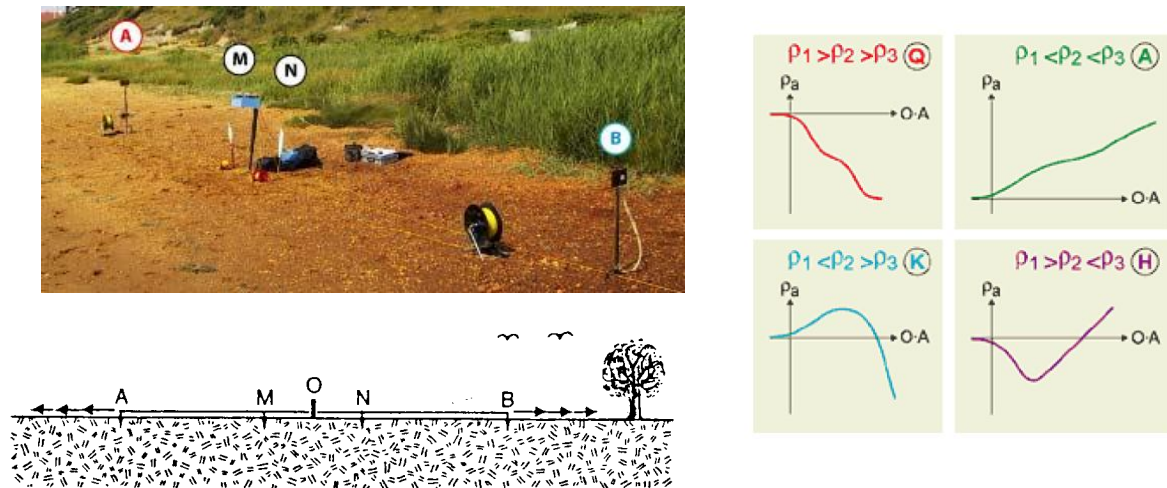


Figure.4 : réponses et principe du sondage électrique vertical.

Pour le traîné électrique (Figure.5), il s'agit simplement de déplacer un quadripôle $AMNB$ de dimension fixe sur le site à explorer (tous les dispositifs décrits précédemment sont utilisables avec différentes variantes). A chaque station, la mesure de I et de ΔV permet de calculer $\rho_{apparent}$ affectée au centre du dispositif. Ce dispositif permet d'étudier les variations latérales de résistivité dans une épaisseur donnée ou profondeur constante de façon à couvrir au mieux la zone ciblée par le biais d'un maillage adéquat correspondant en fait à un échantillonnage. Cet échantillonnage spatial est fixé selon en fonction de la profondeur des structures à étudier et des objectifs recherchés. C'est le cas de cette étude qui a été réalisée sur une surface de 50 Ha avec un maillage 5x20 m et 3 traînés électriques simple de type Schlumberger symétrique

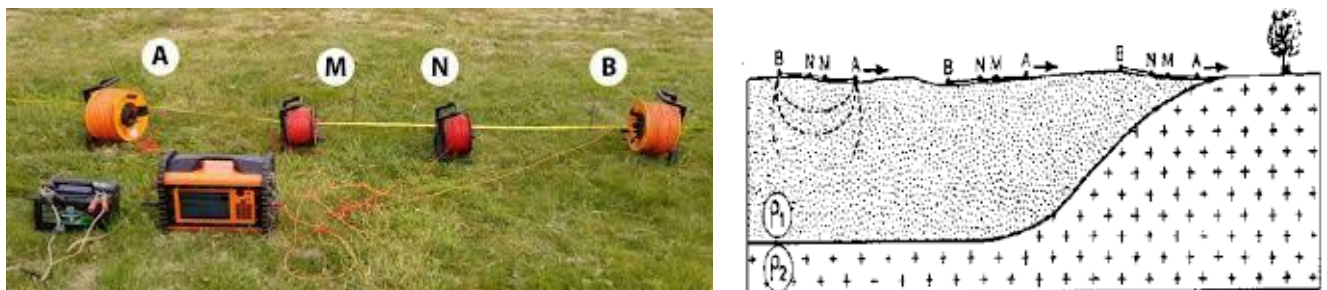


Figure.5 : principe du traîné électrique.

I.III. LES DONNEES GEOPHYSIQUES & PROCEDE DE TRAITEMENT

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 V vérifiant l'équation de Laplace $\Delta V=0$ en dehors des corps potentiants, et dont le gradient de celui-ci est du type $1/r^2$. 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). 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 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. Nous avons fait subir à la carte des zones anormales de "dérangements" correspondante à la carte des résistivités anormales, qui est une image numérique (Figure.6), plusieurs filtrages dans le domaine spatial. Ces signatures spatiales, qui ne sont autres que des filtrages numériques, permettent de circonscrire géométriquement les surfaces anormales correspondant fortement aux « dérangements ».

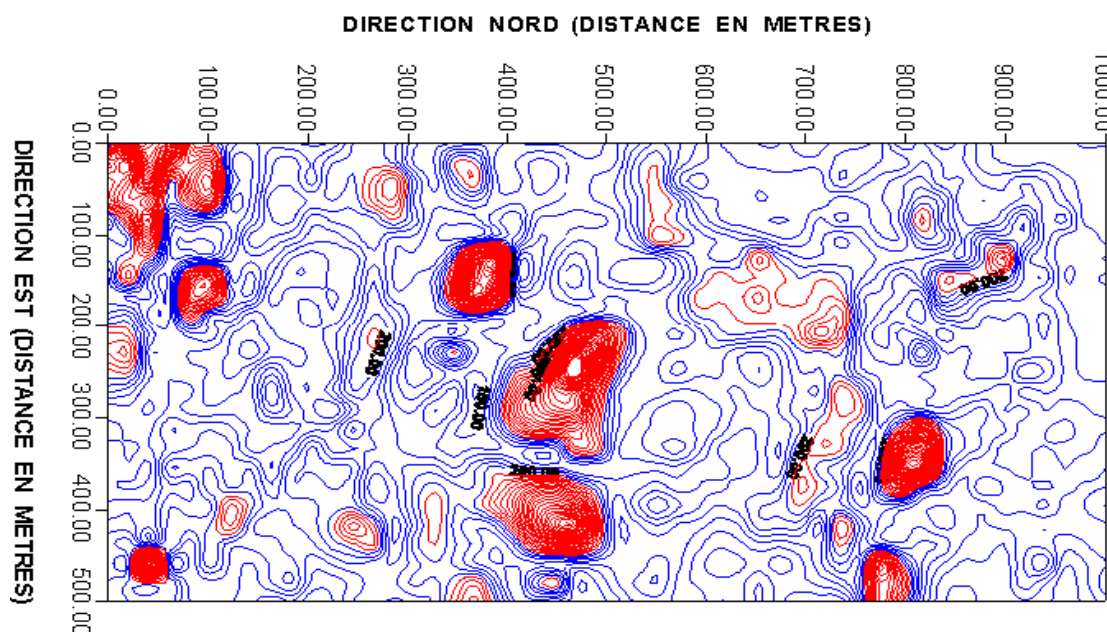


Figure.6 : carte des zones anormales correspondantes aux « dérangements » ((S.Bakkali, in 'Application du filtrage spatial à l'analyse des contours des zones anormales de « dérangements » des séries phosphatées de Sidi Chennane, Maroc', Afrique SCIENCE, 02(1), 2006).

L'étude d'un signal 1D ou 2D nécessite de supprimer au maximum le bruit parasite dû aux conditions d'acquisition. **L'un des buts du « débruitage », assimilé de visu au filtrage numérique et spatial**, est de nettoyer le signal en éliminant au mieux le « bruit » tout en préservant le maximum d'informations. En outre, l'information contenue dans un signal n'est pas forcément entièrement appropriée : il faut « trier » l'information utile suivant l'usage que l'on veut en faire. Une autre particularité du « débruitage » est donc de choisir et de renforcer certaines bandes de fréquences porteuses de l'information intéressante. Le filtrage des cartes de données a la même finalité que celui des signaux 1D. Il s'agit essentiellement de supprimer le « bruit » (parasite) ou de sélectionner certaines fréquences. Si la notion de haute fréquence ou basse fréquence est naturelle en signal 1D (son aigu ou grave) (dans notre cas correspondant à un profil de traîné de résistivité électrique), la fréquence spatiale est un concept plus délicat qui découle du fait que les cartes 2D appartiennent au domaine spatial. Dans une carte de données 2D représentée par une image, les détails se répètent fréquemment sur un petit nombre de pixels, il est dit qu'ils ont une fréquence élevée : c'est le cas pour les signatures géo-électriques et certains contours de la carte 2D des zones anormales des « dérangements » y résultant. Au contraire, les fréquences basses correspondent à de faibles variations de ces signatures géo-électriques diluées sur de grandes parties de la carte des zones anormales des « dérangements » des séries phosphatées.

Ainsi, la carte des zones de « dérangements » est représentée par une image numérique $I(x, y): R \times R \rightarrow R$ considérée comme une matrice de points appelés pixels repérés par leurs coordonnées (x, y) . A chacun d'entre eux est associé une valeur correspondant à la mesure d'un phénomène en ce lieu, qui en l'occurrence, est représenté par la résistivité apparente. Le filtrage spatial consiste ainsi donc à mélanger localement les informations mesurées (la valeur résultante d'un pixel est une fonction de tout le voisinage de ce pixel). Les filtres spatiaux représentent une méthode de traitement numérique utilisée pour le rehaussement d'une image. Ces filtres sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence spatiale. La fréquence spatiale est liée au concept de texture. Elle fait référence à la fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image, lesquels sont intimement liés aux données mesurées. Le filtrage spatial numérique consiste à appliquer une transformation (appelée filtre) à tout ou partie d'une image numérique en appliquant un opérateur. L'ensemble du « débruitage » participe, ainsi et fondamentalement, de l'analyse efficiente **d'un opérateur** donné appliqué à la carte des résistivités anormales qui permet une définition physique des sources. Dans cette optique nous nous permettons de rappeler dans le tableau synthétique suivant les expressions des opérateurs de transformées de cartes dans le domaine fréquentiel usuellement utilisés et présentés dans le tableau ci-dessous.

Nature de l'Opérateur	Expression Analytique	Expression Discrète
prolongement vers le bas et prolongement vers le haut	$e^{2\pi z}$ prolongement vers le bas si $z \geq 0$ (filtre passe-haut) et prolongement vers le haut si $z \leq 0$ (filtre passe-bas)	$b_{p,q}(z) = b_{p,q}(0) \exp(2\pi i \sqrt{\frac{p^2}{A^2} + \frac{q^2}{B^2}} z)$
dérivée seconde verticale	$4\pi^2 z^2$	$\frac{\partial^2}{\partial z^2} b_{p,q}(z) = b_{p,q}(z) 4\pi^2 \left(\frac{p^2}{A^2} + \frac{q^2}{B^2} \right)$
gradient vertical	$2\pi i z$	$\frac{\partial}{\partial z} b_{p,q}(z) = b_{p,q}(z) 2\pi i \sqrt{\frac{p^2}{A^2} + \frac{q^2}{B^2}}$
dérivations horizontales	$2\pi i x$ dans la direction Ox $2\pi i y$ dans la direction Oy	$\frac{\partial}{\partial x} b_{p,q}(z) = 2\pi i \left(\frac{p}{A} \right) b_{p,q}(z)$ $\frac{\partial}{\partial y} b_{p,q}(z) = 2\pi i \left(\frac{q}{B} \right) b_{p,q}(z)$

Les anomalies de résistivité apparente correspondant par analogie à des anomalies de potentiel, peuvent être représentées par des fonctions $f(x,y,z)$ vérifiant l'équation de Laplace à l'extérieur des sources : $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)f(x,y,z)=0$, u et v sont les fréquences respectivement dans les directions Ox et Oy . Au regard de ces différentes hypothèses, et tenant en considération la distribution certes aléatoire de ces « dérangements » sur la panneau de l'étude pilote, les questions suivantes légitimement interpellent :

- ✓ existe-t-il un niveau de « dérangement » des séries phosphatées à telle profondeur correspondant à tel environnement structural ?
- ✓ existe-t-il une zone-limite de « dérangement » entre telle et telle profondeur ?
- ✓ qu'en est-il du degré de « dérangement » de ces zones anomaes ?
- ✓ peut-on délimiter clairement les contours de ces zones de « dérangement »

Pour tenter d'apporter des réponses à ces questions, il a été décidé de faire subir à la carte des zones anomaes de « dérangements » correspondante à la carte des résistivités anomaes, qui est une image numérique , plusieurs « débruitages » dans le domaine spatial et fréquentiel. Entre autres, les opérateurs de « débruitage » ont été utilisés afin de circonscrire résolument et efficacement l'approche de modélisation de ces « dérangements ». Ces signatures spatiales, qui ne sont autres que des « débruitages » numériques, permettent de circonscrire géométriquement les surfaces anomaes correspondant fortement aux « dérangements ». La carte des résistivités étant et représentant une définition physique des sources ou « dérangements », il s'agit principalement de connecter les résistivités anomaes détectées en surface à leurs sources en profondeur.

I.IV. LA PROBLEMATIQUE : CAS DES SERIES PHOSPHATEES DE SIDI CHENNANE

En guise de développement d'une de nos thématiques de recherche, nous avons dans le cadre d'un projet de partenariat Entreprise/Université, mis en exergue l'apport d'une telle méthode dans le contexte particulier de la valorisation des ressources minières.

Avec une capacité de production de 19 millions de tonnes par an, et plus de 35 milliards de m³ de réserves, le Maroc détient actuellement plus de 75% des réserves mondiales des phosphates. Dans ce contexte spécifiquement industriel, la prospection géophysique par la méthode des résistivités électriques a été appliquée dans le bassin phosphatier Oulad Abdoun dans la province de Khouribga (Figure.7) située à près de 120 km au sud est de la capitale économique Casablanca.

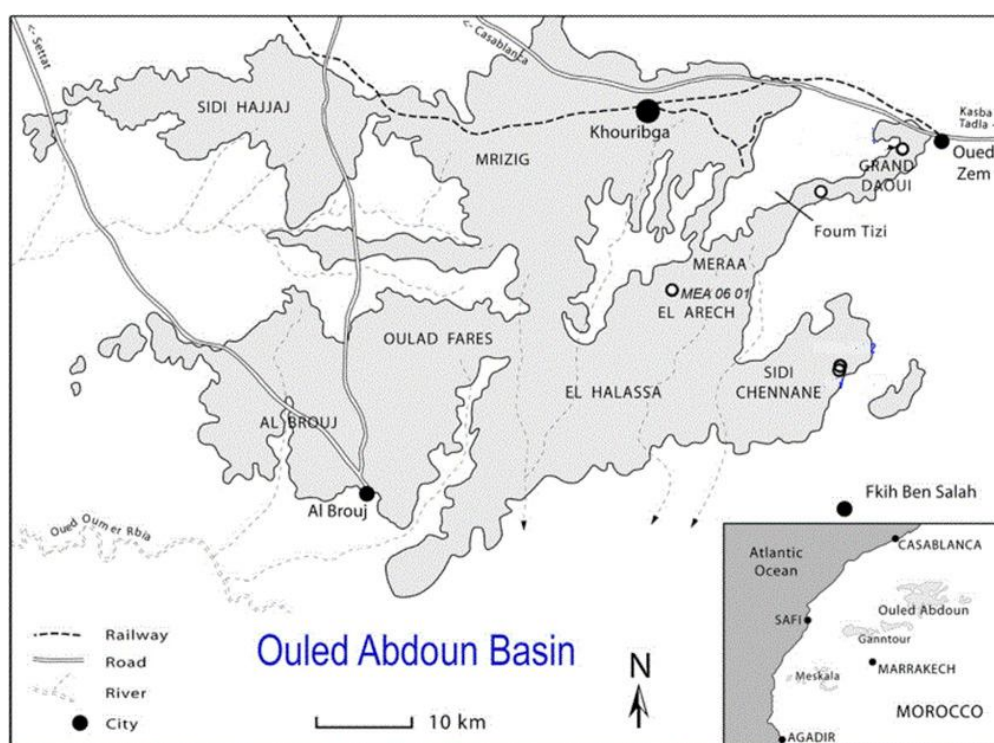


Figure.7 : localisation du site [Baba & al., in 'Geostatistical Analysis for delineating sterile inclusions in Sidi Chennane' phosphatic series, Morocco, Earth Sci. Res. J. Vol. 18, No. 2, 2014).

Le centre minier demeure la principale source de minerai de phosphate destiné à l'exportation et fournit les besoins du nouvel ensemble chimique de Jorf Lasfar. L'ensemble de la production de Khouribga provient de deux mines à ciel ouvert : Sidi Daoui avec un potentiel de 10 Mt/an et Mera El Arech avec un potentiel de 6 Mt/an. Le reste, soit 2 Mt/an environ est produit par la nouvelle mine de Sidi Chennane ouverte en 1994. Ces exploitations à ciel ouvert fournissent en général un minerai de qualité haute teneur (BPL > 70%) et un minerai basse teneur (BPL voisin de 65%). Le BPL est l'unité de teneur en P utilisée par les industriels des engrais. (BPL pour Bone Phosphate of Lime). La première qualité de minerai fournit un produit marchand par simple criblage et séchage. L'obtention des teneurs marchandes à partir de la qualité basse teneur nécessite un traitement par lavage, enrichissement à sec ou calcination. Dans le bassin sédimentaire des Oulad 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 communément appelés « dérangements ». Ces derniers sont à l'origine de deux inconvénients majeurs. Leurs dureté et

compacité perturbent très fortement les travaux d'exploitation dans certains chantiers. Stériles et toujours masqués par une couverture quaternaire, ils ne permettent pas de réaliser un calcul précis des réserves. La reconnaissance directe de ces corps stériles par puits et sondages mécaniques n'avait pas permis de les délimiter spatialement. Par conséquent, le recours à une méthode de prospection indirecte s'avérait nécessaire.

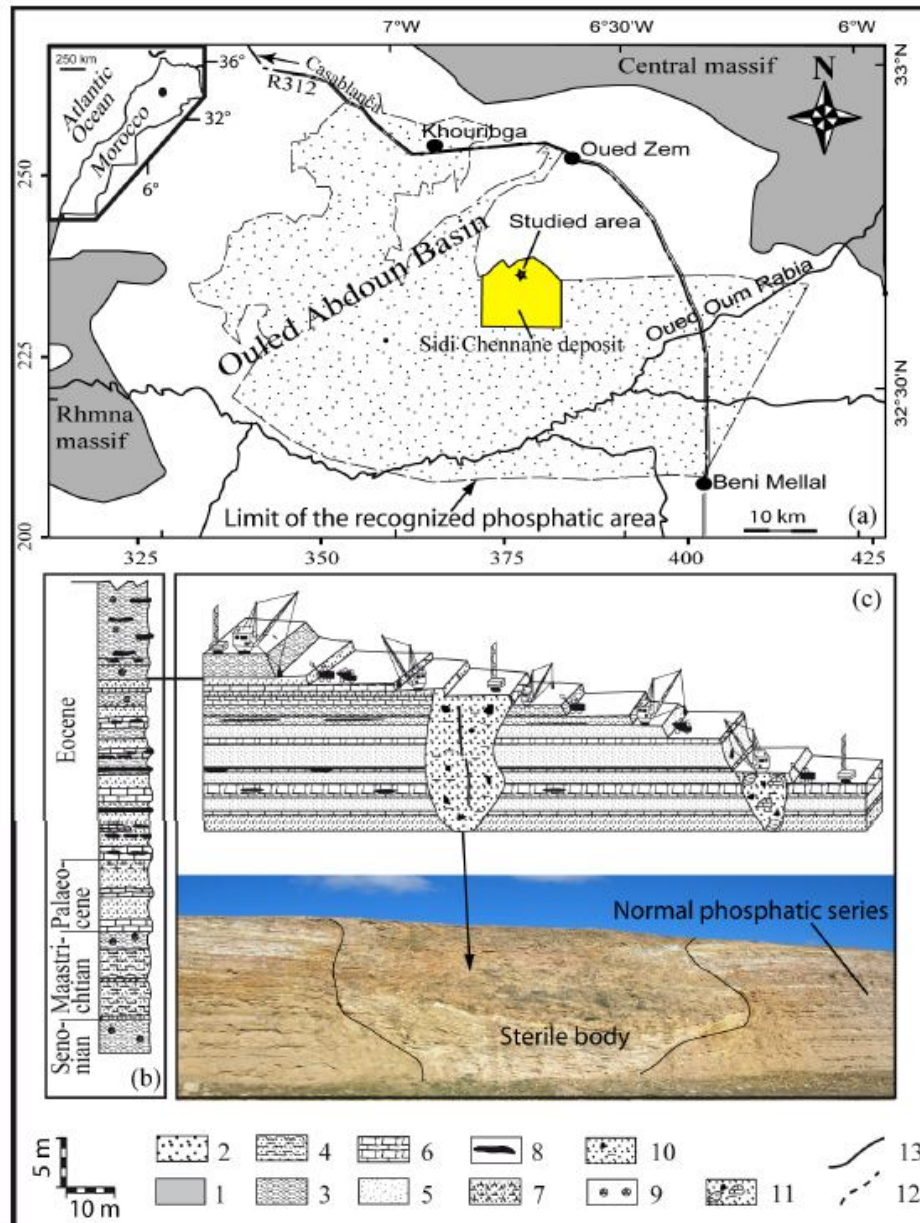


Figure.8 : (a) location of the studied area in the sedimentary basin of Ouled Abdoun. (b) Stratigraphical log of the phosphatic series. (c) Section and photography showing Sterile bodies which disturb the extraction of phosphate. 1, hercynian massif; 2, Phosphatic areas; 3, marls; 4, phosphatic marls; 5, phosphatic layer; 6, limestones; 7, phosphatic limestone; 8, discontinuous silex bed; 9, silex nodule; 10, sterile body formed exclusively of silicified limestone; 11, sterile body constituted of a blend of limestone blocks, marls and clays; 12, limit of the sterile body; 13, road. (Nora El Assel & al., in A Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography Prospection for Detecting Sterile Bodies in the Phosphatic Bearing of Sidi Chennane (Morocco), International Journal of Geosciences, 2, 2011).

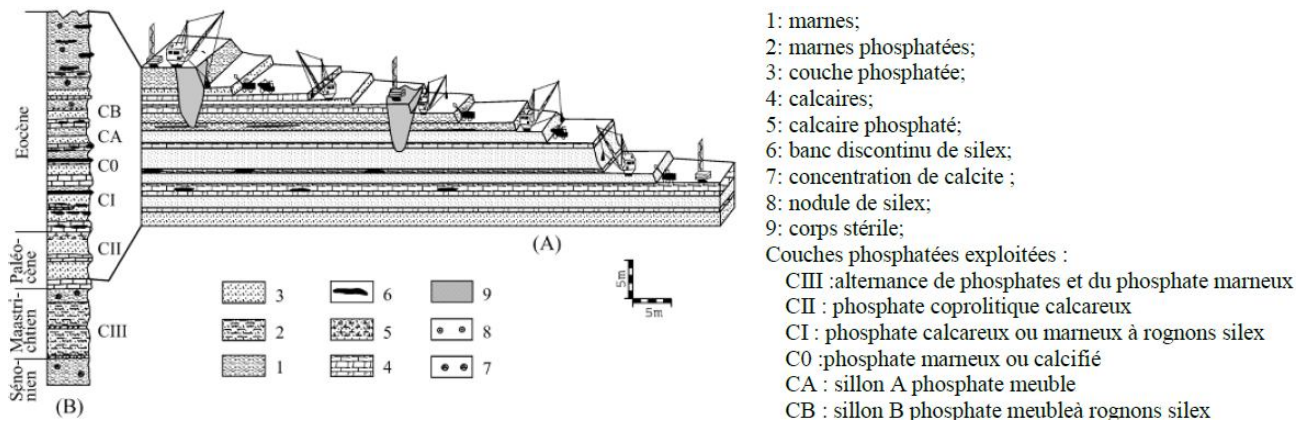


Figure.9 : coupe et log stratigraphiques de la série phosphatée de Sidi Chennane. (Kchikach & al., in 'Cartographie de corps stériles sous couverture quaternaire par méthode de résistivités électriques dans le gisement phosphaté de Sidi Chennane (Maroc)', C. R. Geoscience 338 (2006)).

Les objectifs de la géophysique appliquée par la méthode des résistivités électriques consistent, si besoin est, à confirmer et préciser les interprétations et les informations fournies par le signal géophysique représenté par les données de résistivité apparente. Ce signal géophysique ainsi défini avait été considéré comme le paramètre physique distinctif à même de caractériser la structure des terrains concernés et à la définition des zones de « dérangements ». La résistivité de la série phosphatée normale est comprise entre 80 et 150 $\Omega.m$; celle des « dérangements » est comprise entre 200 et plus de 1000 $\Omega.m$. Une cartographie électrique en est ainsi issue. Dans ce contexte particulier une étude géophysique pilote de prospection électrique en courant continu avait été réalisée. Couvrant un panneau de 50 hectares, cette étude pilote avait pour objectif de cartographier et de délimiter en surface les zones anormales correspondant aux « dérangements ». La carte de résistivité fournit une interprétation directe et imagée des séries de profils de traînées électriques dont elle découle. Trois cartes de résistivité ont ainsi été réalisées avec un dispositif Schlumberger afin de circonscrire les zones anormales.

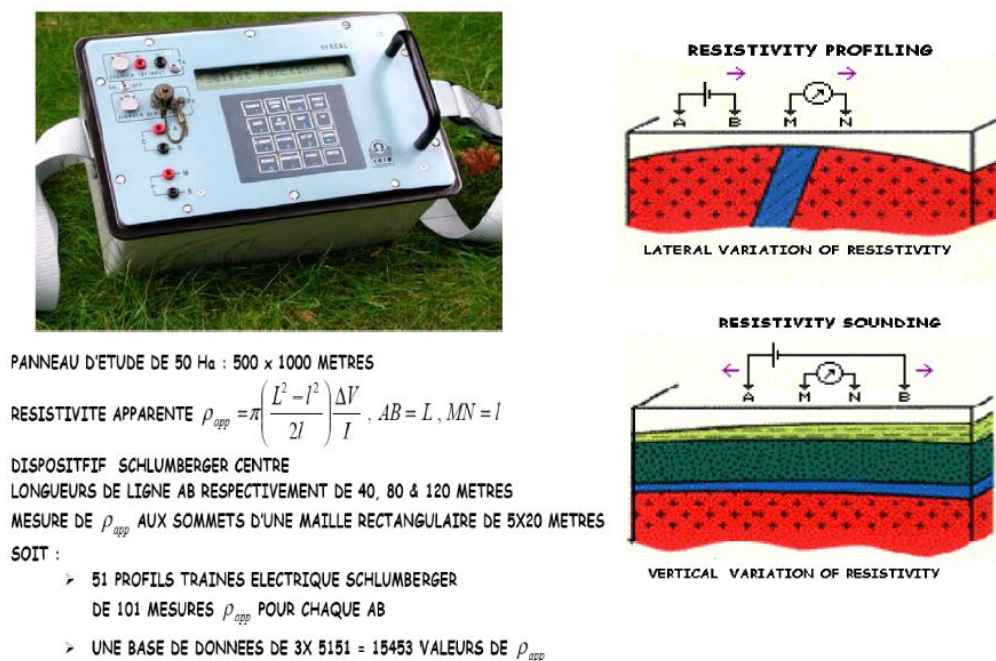


Figure.10 : station d'acquisition Syscal et dispositif Schlumberger.

Les longueurs de ligne AB=40m, AB=80m et AB=120m ont été utilisées pour cibler des « dérangements » situés sur des profondeurs moyennes comprises entre 15 et 40 m. Les mesures de résistivité avaient été réalisées avec un résistivimètre SYSCAL2 DE Brgm-Instruments aux noeuds d'une maille de dimensions 20x5 m. Dans notre cas une carte de résistivité apparente fut réalisée. Le dispositif utilisé fut un dispositif Schlumberger centré de longueur de ligne AB=120 m. Ce procédé avait permis d'identifier les zones anormales coïncidant avec les « dérangements » pour des profondeurs moyennes inférieures à 40 m.

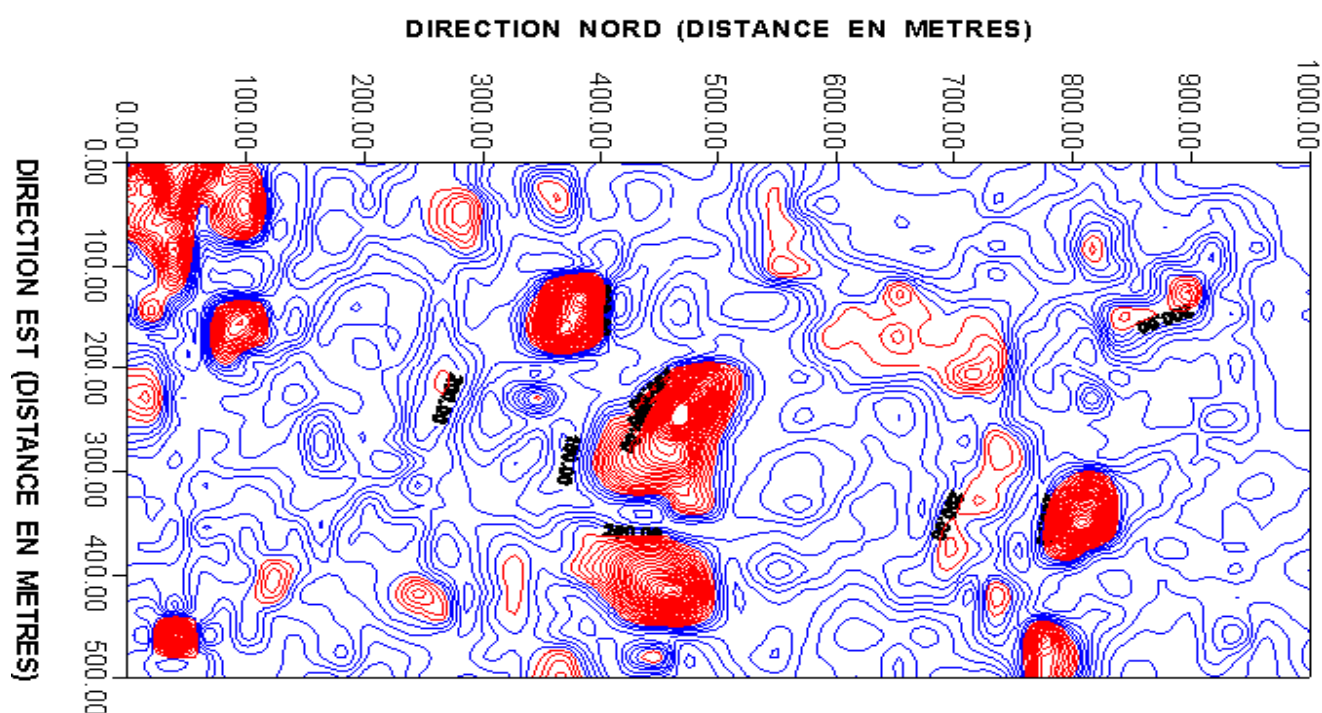
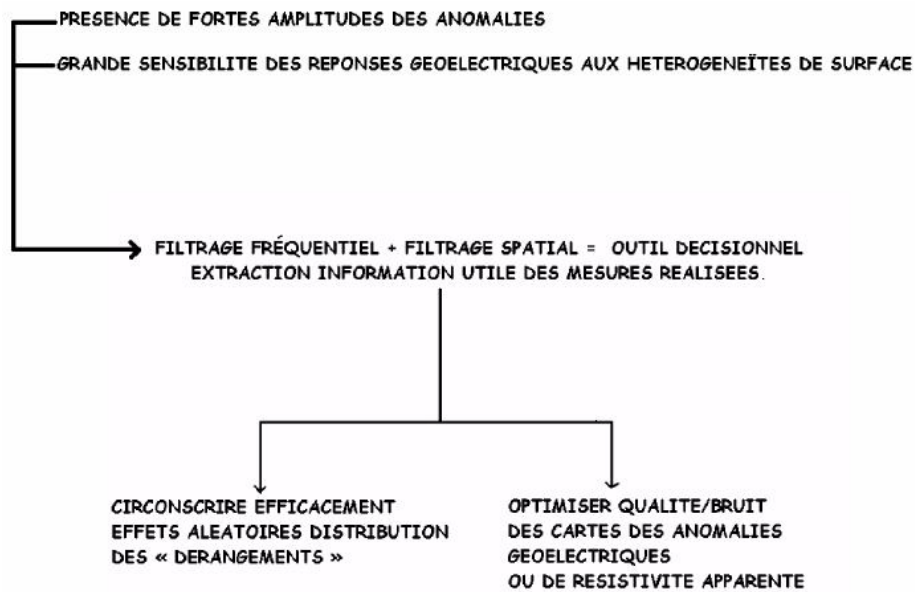


Figure.11 : carte des résistivités apparentes de la zone d'étude (intervalle contour : 20 Ω .m)
Les zones de "dérangements" correspondent aux résistivités anormales.

Les « dérangements » se présentent de façon aléatoire. **La carte joue le rôle fondamental de « radar » pour les conducteurs de travaux**, et ce afin de ne pas briser la chaîne cinématique d'exploitation. Les techniques classiques du filtrage spatial servent alors à circonscrire efficacement les effets aléatoires de la distribution des « dérangements » correspondant aux anomalies géoélectriques ou anomalies de résistivité apparente. Une étude comparative des différentes réponses du filtrage spatial appliqué à la carte des « dérangements » permet aux conducteurs de travaux d'exploiter adéquatement les séries phosphatées saines et non « dérangées ». Les méthodes géophysiques étant des méthodes d'approches indirectes, elles concernent le traitement d'un signal particulier pour répondre à des questions précises telles la localisation, l'ampleur, l'extension, la profondeur,...., de ces discontinuités que sont ces « dérangements ». La réponse à de telles interrogations nécessite l'utilisation et la pratique de quelques opérateurs différentiels analytiques appliqués au traitement de cartes de données géophysiques. L'ensemble de cette thématique réside particulièrement dans le « débruitage »

(traitement, l'analyse et l'interprétation) de la cartographie électrique 2D des «dérangements» par utilisation des opérateurs analytiques du filtrage spatial et fréquentiel selon le schéma suivant :



Plusieurs réponses ont été apportées pour l'optimisation des signatures géo-électriques de ces « dérangements » par utilisation de divers outils de « *débruitage* » plus communément désignés sous l'appellation adéquate et cohérente de « filtrage numérique » ou « denoising » comme l'illustre l'exemple ci-dessous.

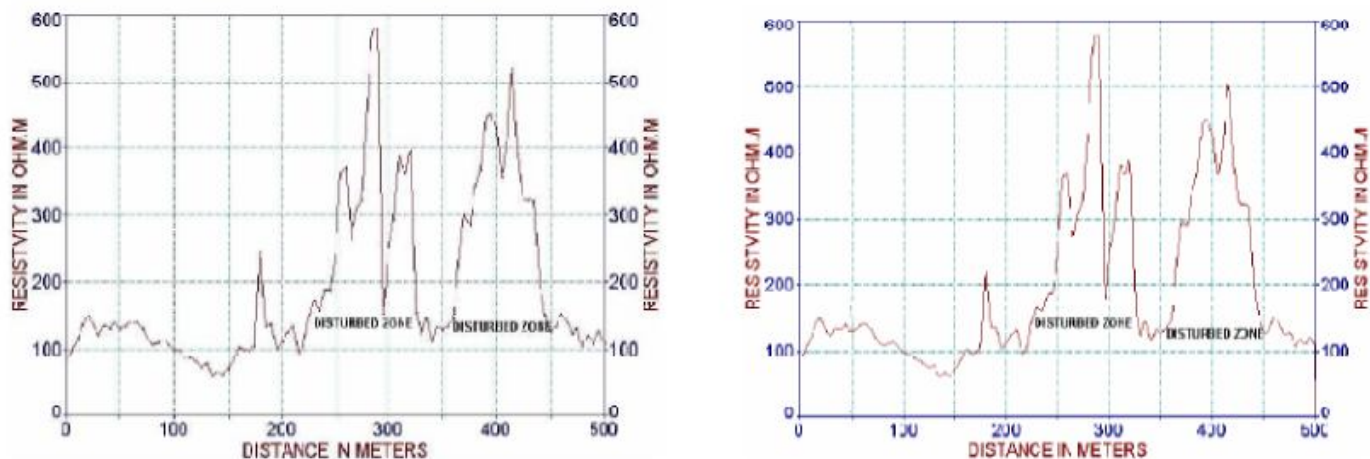


Figure.12 : real resistivity data traverse of the survey and the corresponding output analytical filtered signal. (S.Bakkali in 'Using Savitzky-Golay filtering method to optimize surface phosphate deposit "disturbances"', Ingenierías, Abril-Junio 2007, Vol. X, No. 35).

Selon des postulats pertinents relatifs le signal géophysique enregistré peut être décrit comme suit :

- le signal est une mesure à composante scalaire et/ou vectorielle
- le signal est « bruité » par des contributions autres que celles que l'on veut étudier.
- le signal mesuré doit permettre d'estimer une grandeur physique et son erreur
- l'analyse spectrale est une étape décisive dans l'interprétation du signal et des observables

A titre de résultats issus de nos différents travaux menés jusqu'à lors, nous exposons quelques exemples du « débruitage » des données brutes des résistivités électriques de la carte des « dérangements » initiale acquise lors de la prospection de terrain, illustrant ainsi son importance dans l'interprétation géologique en termes d'optimisation des calculs des réserves de ce gisement, et ce en ayant fait l'objet de nos publications (S.Bakkali, 2007, 2008, 2009, 2010, 2015). Nous avons délibérément omis de présenter le formalisme mathématique et numérique sur lesquels se basent ces différentes méthodes, lequel est développé dans le corps des publications concernées assorti des références bibliographiques inhérentes à celui-ci. La présentation des principaux résultats a en revanche été privilégiée dans cette approche. Il est à souligner également qu'ont été mis à contribution dans l'analyse, le traitement et le développement de ces outils, les logiciels AutoSignal, Systat de SigmaPlot ainsi que Surfer.

I.V. METHODOLOGIE D'ANALYSE ET D'INTERPRETATION ET DE MODELISATION DES DONNEES GEOELECTRIQUES

Nous exposons et rappelons ci-après une synthèse des différentes méthodes d'analyse, d'interprétation et de modélisation des données géoélectriques ayant été l'objet de nos différentes études. Une présentation succinctement choisie tirée des divers travaux y est exposée en langue originale.

A-The sunshading method approach

The enhancement of edges in geophysical potential data is useful as it allows lineaments to be made more apparent, thus helping the geological interpretation process. One method which is in current usage is termed sunshading. Sunshading considers the data as if it were a topographic surface and illuminates it with light from a source at infinity which is specified by its azimuth and elevation. Different reflectance models are available for different types of surface. It is common to assume that the surface is ideal: it reflects all light incident upon it and reflects light equally in all directions. This is termed a Lambertian reflector and its normalized reflectance (Pelton, 1987) map is given by the following expression:

$$R = \frac{I + p_0 p + q_0 q}{\sqrt{I^2 + p^2 + q^2} + \sqrt{I^2 + p_0^2 + q_0^2}}$$

where I is the original image representing the experimental data, $p_0 = \cos \varphi \tan \theta$ and $q_0 = \sin \varphi \tan \theta$, θ is the sun elevation measured from the vertical and φ is the azimuth measured from anticlockwise from the east, p and q are the gradients of the data in the east and north directions, respectively, and may be calculated in the space domain from the following expressions:

$$p = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial x} = \frac{\rho_{i+1, j} - \rho_{i-1, j}}{2\delta x} \text{ and } q = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial y} = \frac{\rho_{i, j+1} - \rho_{i, j-1}}{2\delta y}$$

where x is the eastern coordinate and y is the northern coordinate. $\rho_{i, j}$ is the pseudo-apparent resistivity defined at grid point (i, j) . Grid intervals in the x -direction and y -direction are δ_x and

δ_y respectively. The elevation and azimuth are chosen by the interpreter. Since the same order of derivative is used for both horizontal gradients, the orientation of the surface normal which controls the reflectance does not change. Features that lie at 90° to the sun azimuth are enhanced, while those which lie parallel to it are reduced in amplitude. To enhance the mapped edges that lie at any orientation, the azimuth should be set to 180° from the direction of steepest slope at each point on the surface (Cooper, 2003).

B-The Inverse distance

Inverse distance is a weighted average interpolator, which can be either exact or smoothing (Watson et al., 1985). With inverse distance, data are weighted during interpolation, so that the influence of one point, relative to another, declines with distance from the grid node. Weighting is assigned to data through the use of a weighting power, which controls how the weighting factors drop off as distance from the grid node increases. The greater the weighting power, the less effect the points, far removed from the grid node, have during interpolation. As the power increases, the grid node value approaches the value of the nearest point. For a smaller power, the weights are more evenly distributed among the neighboring data points (El Abbas et al., 1990). Normally, inverse distance behaves as an exact interpolator. When calculating a grid node, the weights assigned to the data points are fractions, the sum of all the weights being equal to 1.0. The smoothing parameter is a mechanism for buffering this behavior. One of the characteristics of inverse distance is the generation of "bull's-eyes" surrounding the observation position within the grid area. A smoothing parameter can be assigned during inverse distance to reduce the "bull's-eye" effect by smoothing the interpolated grid (Smith et al., 1990).

C-The Kriging method

Kriging is a geostatistical gridding method that has proven useful and popular in many fields. This method produces visually appealing maps from irregularly spaced data (Cressie, 1991) (Swan et al., 1995). Kriging attempts to express trends suggested in your data, so that, for example, high points might be connected along a ridge rather than isolated by bull's-eye type contours. Kriging is a very flexible gridding method. The Kriging defaults can be accepted to produce an accurate grid of your data (Davis, 1986). Kriging uses a weighting, which assigns more influence to the nearest data points in the interpolation of values for unknown locations. Kriging, however, is not deterministic but extends the proximity weighting approach of inverse distance to include random components where exact point location is not known by the function. Kriging depends on spatial and statistical relationships to calculate the surface (Davis et al., 1975).

D-The Minimum curvature method

This method applies a two-dimensional cubic spline function to fit a smooth surface to the set of input elevation values (Briggs, 1974). The computation requires a number of iterations to adjust the surface so that the final result has a minimum amount of curvature. Minimum Curvature is widely used in the earth sciences. The interpolated surface generated by Minimum Curvature is analogous to a thin, linearly elastic plate passing through each of the data values, with a minimum amount of bending (Lam, 1983). Minimum Curvature generates the smoothest possible surface while attempting to honor your data as closely as possible. Minimum Curvature is not an exact interpolator, however.

E-The Shepard's method

Shepard's method is a well established method for interpolating scattered data (Shepard, 1968). It is also known as the moving average method. The method is based on forming convex combinations of the scattered data values and does not require the solution of any large linear systems (Gordon, 1978). The Shepard's Method uses an inverse distance weighted least squares method. As such, Shepard's Method is similar to the inverse distance interpolator, but the use of local least squares eliminates or reduces the "bull's-eye" appearance of the generated contours. Shepard's Method can be either an exact or a smoothing interpolator (Lancaster et al., 1990).

F-The Radial basis function interpolation method

Radial basis function method is a well established method for interpolating scattered data (Franck et al., 1980). It is based on forming linear combinations of radial functions centred at each of the data sites (Franck, 1982). Radial Basis Function interpolation is a diverse group of data interpolation methods (Fasshauer et al., 1998). In terms of the ability to fit your data and produce a smooth surface, the Multiquadric method is considered by many to be the best (Chen et al., 1996) (Hardy, 1971). All of the Radial Basis Function methods are exact interpolators, so they attempt to honour the data (Goldberg et al., 1996) (Powell, 1992).

G-Triangulation with linear interpolation method

Triangulation method uses Renka's algorithm (Renka, 1984) to carry out a Delaunay triangulation (Okabe et al., 1992) of the observation points. The purpose is to identify a neighborhood of nearby observation points to be used in the interpolation. This algorithm creates triangles by drawing lines between data points. The original points are connected in such a way that no triangle edges are intersected by other triangles (Brown, 1994). The result is a patchwork of triangular faces over the extent of the grid. This method is an exact interpolator (Watson, 1992). Each triangle defines a plane over the grid nodes lying within the triangle, with the tilt and elevation of the triangle determined by the three original data points defining the triangle. All grid nodes within a given triangle are defined by the triangular surface. Because the original data are used to define the triangles, the data are honored very closely. Triangulation with Linear Interpolation works best when the resistivity data are evenly distributed over the grid area. Data sets containing sparse areas result in distinct triangular facets on the map (Lawson, 1972).

H-The wavelet analysis method / La 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 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 al., 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 résistivité correspondantes à la carte des « dérangements ». La transformée en ondelette d'un signal $f(x, y)$, où x et y représentent respectivement les directions Est et Nord, et f la résistivité apparente

$$\rho, \text{ est définie par : } \omega(X, Y, a, b) = \int \int \frac{1}{\sqrt{|XY|}} f(x, y) \psi\left(\frac{x-a}{X}, \frac{y-b}{Y}\right) dx dy \text{ ou } \frac{1}{\sqrt{|XY|}} \psi\left(\frac{x-a}{X}, \frac{y-b}{Y}\right) \text{ est}$$

le coefficient associé de l'ondelette correspondant aux échelles X et 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 :

$$\int \int dx dy \psi(x, y) = 0 \text{ et } \int \int dx dy [\psi(x, y)]^2 = 0. \text{ La condition qui permet de reconstruire la fonction}$$

$$f \text{ correspond à la définition et à l'existence de l'intégrale suivante : } C_\psi = (2\pi)^2 \int \int dk_1 dk_2 \frac{\left| \hat{\psi}(k_1, k_2) \right|^2}{|k_1 k_2|}$$

où $\hat{\psi}(k_1, k_2)$ 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:

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

Les mesures de résistivité apparente représentent une base de données de 51 profils de traînés électriques régulièrement espacés de 20m. Chacun des profils électriques représente 101 stations de mesure équidistantes de 5m. L'équidistance entre les profils est de 20m. L'ensemble de cette étude représente ainsi plus de 5151 mesures de résistivité apparente. Nous avons calculé les modules des coefficients associés à la transformée en ondelette en utilisant le logiciel AutoSignal pour chacun des 51 profils de traînés électriques. 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 anomaes des séries phosphatées de Sidi Chennane. Nous avlons choisi pour ces études les « ondelettes mère » de Haar et de Morlet (Bakkali et al., 2007, 2008) dont les sorties filtrées sont présentées dans les figures ci-après.

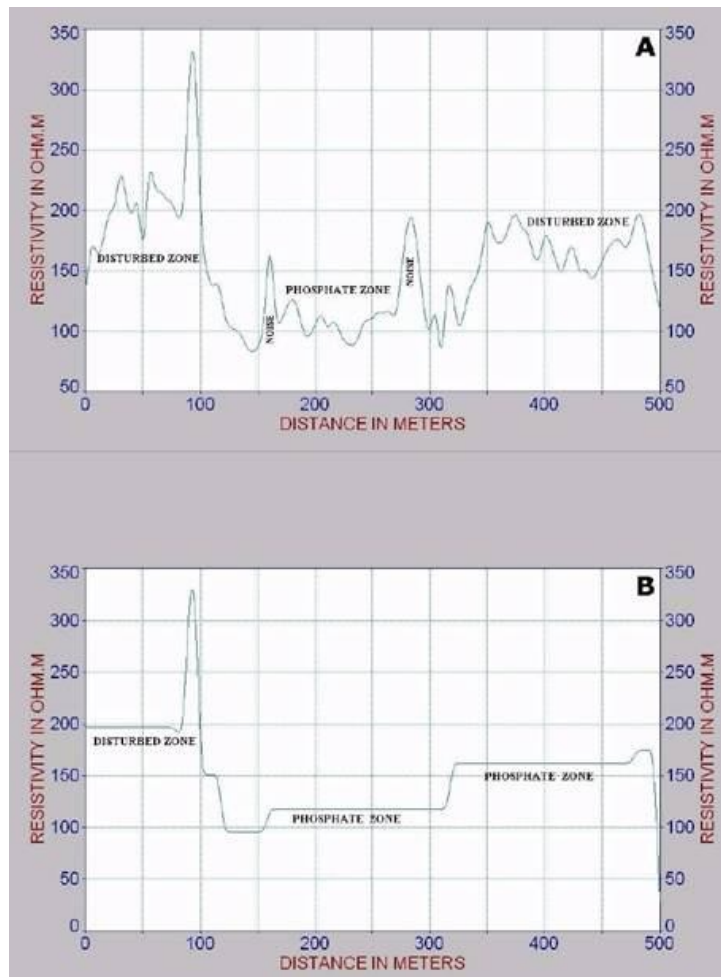


Figure.13 : example of real resistivity traverse data of the survey (A) and the corresponding Haar wavelet transform denoised output (B) (Bakkali & al., in 'Denoising resistivity phosphate "disturbances" using Haar mother wavelet transform (Sidi Chennane, Morocco)', Earth Sciences Research Journal, ESRJ, Formerly GEOFISICA COLOMBIANA, Vol.12, N°1, 62-71, **2008**, ISSN: 1794-6190

SECONDE PARTIE : ETUDE DES DONNEES GEOELECTRIQUES DES SERIES PHOSPHATEES MAROCAINES DE SIDI CHENNANE

Cette deuxième partie constitue une synthèse récapitulative des résultats les plus pertinents publiés dans quatre articles (**S.Bakkali, 2007 Russian Geology & Geophysics**, RGG, 48, pp, 775-781, **Elsevier Journal**) ; (**S.Bakkali & al, 2008 Acta Montanistica Slovaca**, Vol.13, N°2, 216-222) ; (**S.Bakkali & al, 2008 Earth Sciences Research Journal**, ESRJ, Vol.12, N°1, 62-71) et (**S.Bakkali & al, 2007 Revista Ingenieria**, El A, Vol.7, pp 41-49).

Ces résultats constituent une application de la méthodologie développée dans la première partie aux données géophysiques de résistivité électrique des séries phosphatées de Sidi Chennane (Maroc).

L'intégralité de ces articles est jointe à la fin de ce document de thèse.

« Enhancement of edges of Sidi Chennane phosphate « disturbances” using sunshading responses of resistivity data” », **S.Bakkali**, *Russian Geology & Geophysics*, RGG, 48, **September 2007**, 775-781, **ISSN: 1068-7971**, Elsevier Journal

Sunshading is a powerful tool for the enhancement of edges in images. Given the azimuth and elevation of a source illumination, it calculates the reflectance from a surface which is composed of the data to be interpreted. It is a standard tool used in the interpretation of geophysical potential field data. In the great Oulad Abdoun phosphate basin, inclusions of sterile hardpan — so-called “disturbances” — are hard to detect as they interfere with phosphates. Their resistivity is above 200 $\Omega\cdot m$ against 80 to 150 $\Omega\cdot m$ for a phosphate-rich mineral. A Schlumberger resistivity survey over an area of 50 hectares was carried out. The geologic setting was successfully modeled on the basis of sunshaded maps of disturbances. A new field procedure was tested to deal with the extended edges of anomalous zones of phosphate deposit disturbances. Phosphate reserves were estimated more reliably.

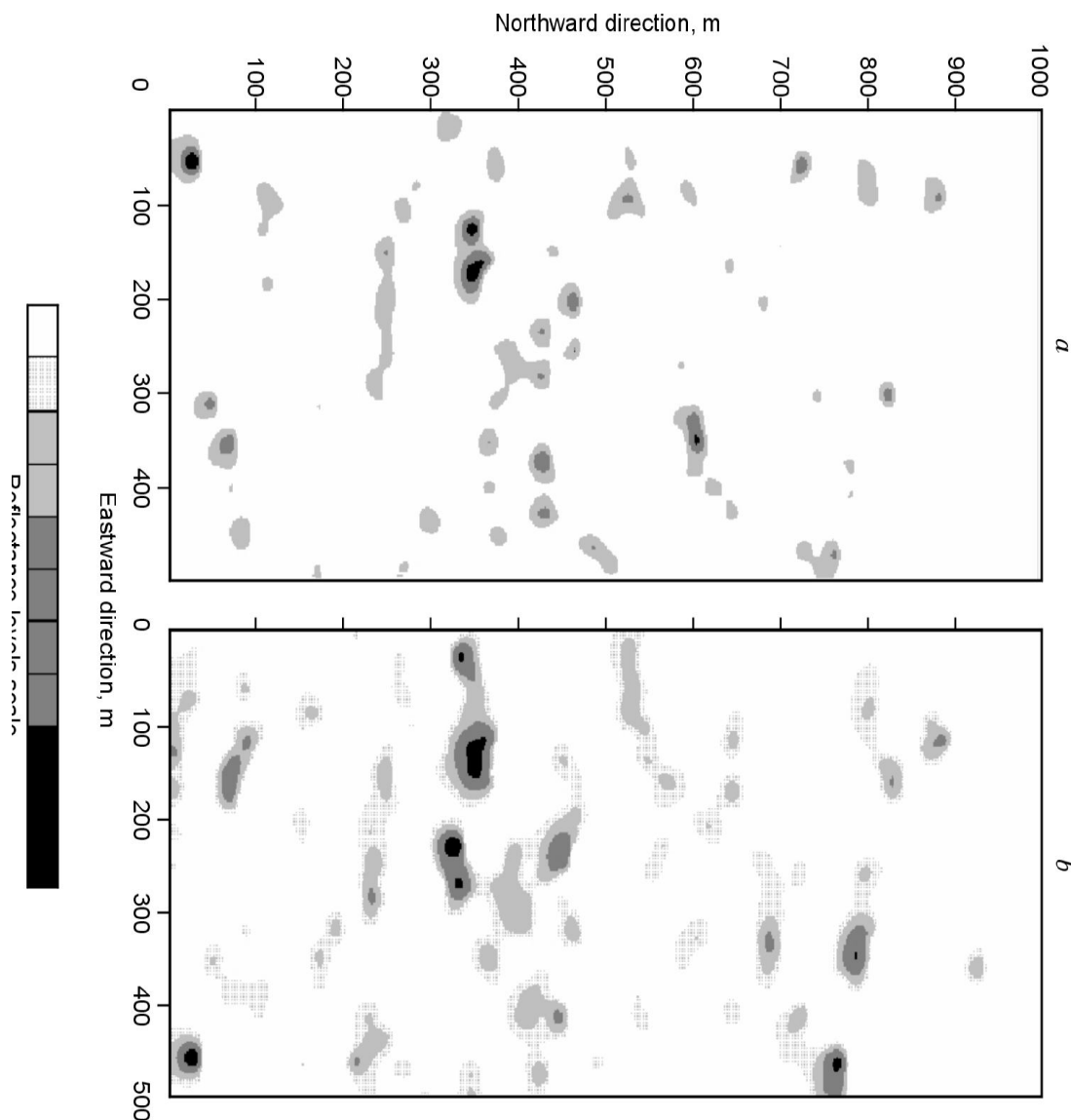


Figure.14 : sunshaded maps Oulad Abdoun phosphate disturbances with 180°
[Shlumberger array span (a)=80m (b)=120m]

« About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate "disturbances" map », **S.Bakkali & M.Amrani**, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol.13, N°2, 216-222, **2008**, ISSN: 1335-1788

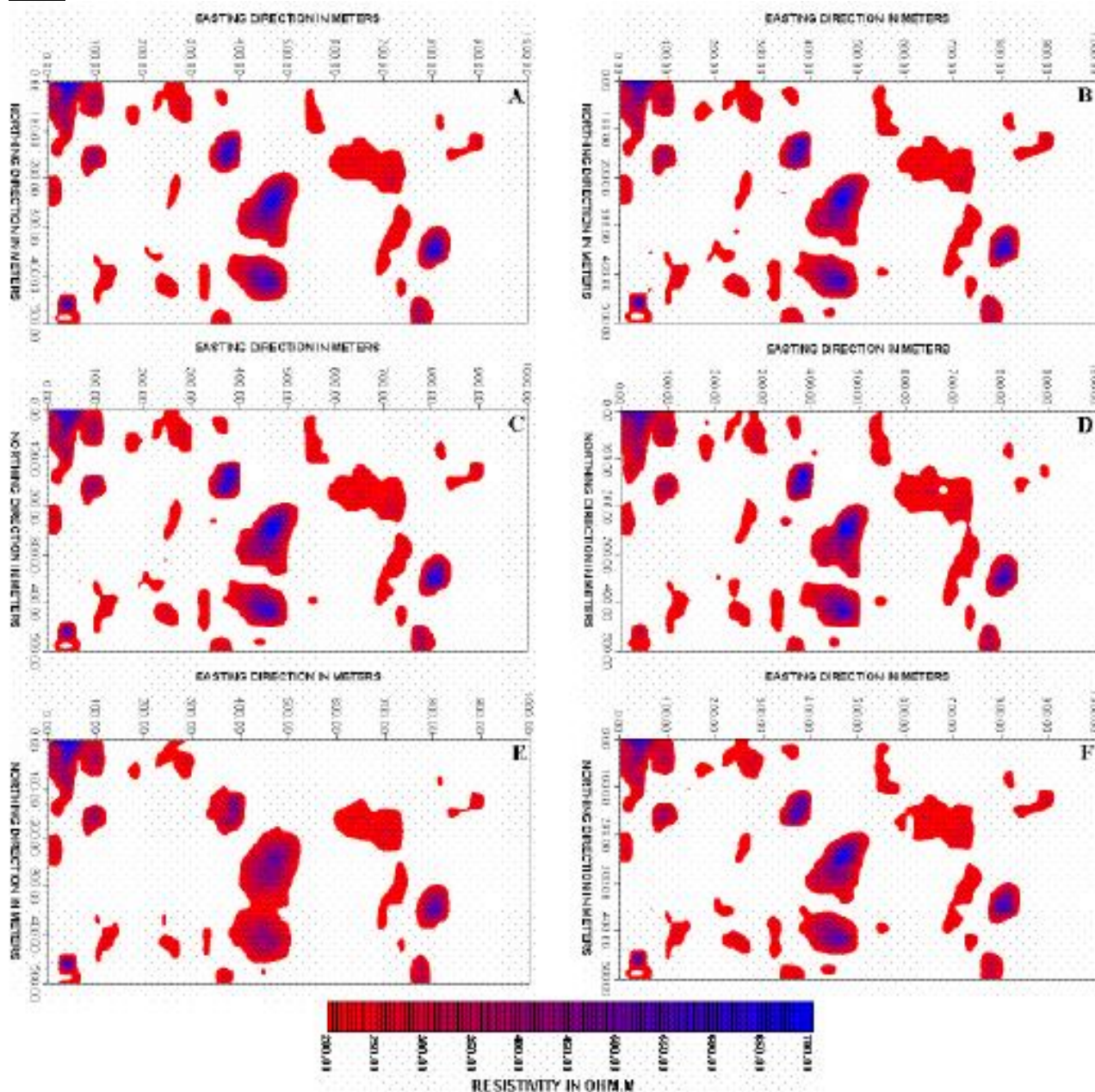


Figure.15 : the output map of the disturbed phosphate zones using different interpolation methods.(A: inverse, B: Triangulation, C:Kriging, D:Minimum Curvature, E:Shepard, F: Radial Basis Functions).

In this paper we compare six different interpolation methods. The six difference interpolation methods consistently identified Radial basis function interpolation method as the best method for interpolating Moroccan phosphate deposit "disturbances" surface. This study has shown that Radial basis function interpolation method is most likely to produce the best estimation of a continuous surface of Moroccan phosphate deposit "disturbances". Nevertheless, the research presented here illustrates that regardless of the approach taken these interpolation methods adequately address the real distribution of the phosphate anomalous zones. The results show a significant suppression of the noise and a very good smoothing and recovery of the resistivity anomalies signal. We have described an analytical procedure to analyze Moroccan phosphate deposit "disturbances" anomalies.

« Denoising resistivity phosphate “disturbances” using Haar mother wavelet transform (Sidi Chennane, Morocco) », **S.Bakkali & M.Amrani**, Earth Sciences Research Journal, ESRJ, Formerly GEOFISICA COLOMBIANA, Vol.12, N°1, 62-71, **2008**, ISSN: 1794-6190

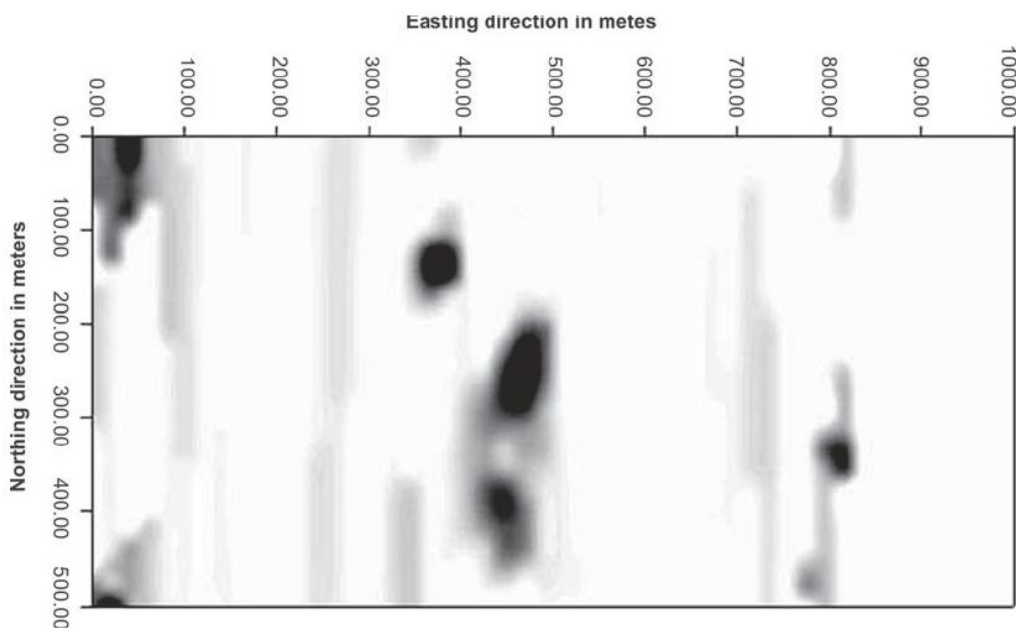


Figure.16 : the output map of the disturbed phosphate zones using Haar wavelet transform

« Débruitage d’une carte de résistivité des “derangements” des phosphates marocains par ondelette analysante », **S.Bakkali & M.Amrani**, Revista Ingenieria, EIA, Vol.7, 41-49, **June 2007**, Escuela de Ingenieria de Antioquia, Medellin (Colombia), ISSN: 1794 - 1237.

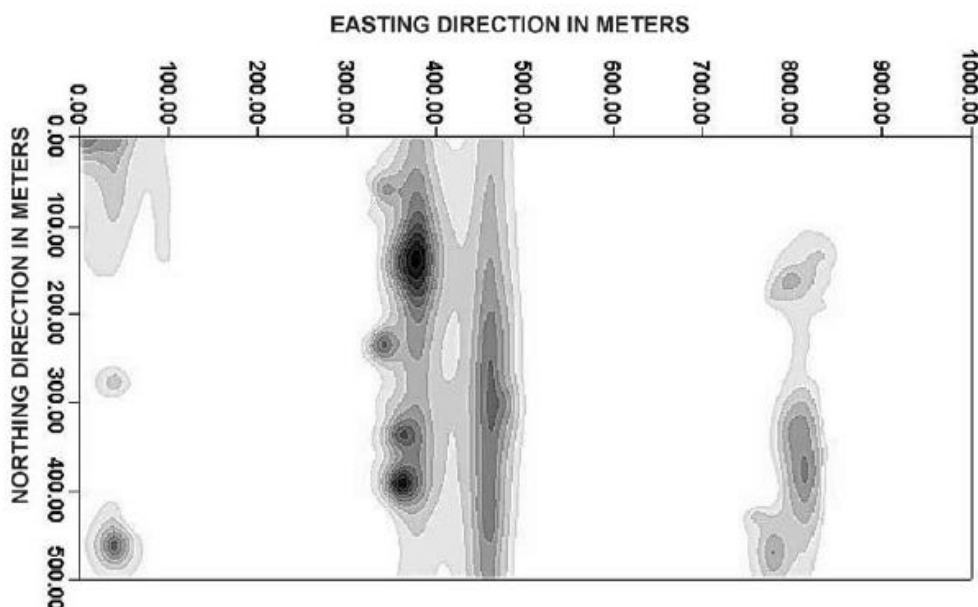


Figure.17 : the output map of the disturbed phosphate zones using Morlet wavelet transform

The surface modeling of resistivity anomalies is obtained by AutoSignal routine from our apparent resistivity survey transformed data obtained using the Morlet wavelet mother response. The Morlet wavelet analysis surface enable us to identify the anomalies area which turned out to be

strongly correlated with the disturbances. It seems that the use of the Haar mother wavelet transform represent an effective filtering method which makes it possible to attenuate considerably the noise represented by the minor dispersed and random disturbances better than the use of the Haar mother.

TROISIEME PARTIE : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A-INTRODUCTION

De prime abord, suite aux différents éléments d'analyse et d'interprétation issus du filtrage des données géophysiques exposés dans ce présent mémoire, il apparaît de visu qu'un ensemble de conclusions et perspectives non exhaustives mais toutefois pertinentes s'imposent au droit de ces résultats. La compilation des conséquences, des attendus et des perspectives proposée dans ces deux paragraphes ci-dessous participe de notre souci de valoriser, à juste titre, l'importance des outils fonctionnels de la pratique du traitement en termes de filtrage et de «débruitage» des données géophysiques.

B-CONCLUSIONS

La carte des résistivités anormales donne pour la zone d'étude les valeurs de la résistivité apparente obtenues pour le dispositif Schlumberger centré. La carte des résistivités fournit une interprétation directe et imagée des séries de profils de résistivités dont elle découle. La carte de résistivité apparente permet d'identifier les zones anormales coïncidant fortement avec les « dérangements ».

Les zones anormales de « dérangements » détectées en surface présentent une distribution aléatoire . Les zones anormales des « dérangements » ont été nettement circonscrites par les différents outils de « débruitage » se reflétant par des contours très nets. Une bonne corrélation se manifeste par rapport à la distribution des zones de « dérangements » mises en évidence par la cartographie géo-électrique . Cette singularité se traduit par une variation croissante de la résistivité électrique au sein même de la zone de « dérangements ». Cette caractéristique pourrait servir efficacement d'indicateur du niveau de « dérangement » au sein même des séries phosphatées dites « dérangées ».

Les différentes réponses, tirées des publications et exposées ci-dessus, témoignent de l'importance du « débruitage », qui en toute état de cause est par définition un filtrage au sens mathématique, des données géophysiques. Les différentes conclusions sous-jacentes à l'application de ces outils de « débruitage » à la carte des « dérangements » des séries phosphatées de Sidi Chennane, convergent toutes et soulignent l'importance primordiale de la prise en compte de ce « filtrage » dans l'estimation des réserves des phosphates dits « sains » par rapport à ceux de la série phosphatée « dérangée ». Néanmoins, la transformée en ondelettes, permet d'obtenir une représentation locale de l'information contenue dans les signatures géo-électriques des « dérangements » des séries phosphatées de Sidi Chennane. En effet, à partir de l'ondelette-mère du signal géo-électrique, ici assimilé au profil de traîné de résistivité électrique, encore appelée ondelette analysante, une base de fonctions élémentaires par des opérations de dilatation ou de compression puis de translation est définie. Cette transformée en ondelettes ainsi obtenue est définie par des coefficients d'ondelettes de la fonction. Le signal est construit à partir de ces coefficients. Cette décomposition correspond à l'analyse du signal en termes de filtrage et de

« débruitage », qui nous apparaît de surcroît le plus à même de répondre au mieux à cette problématique. Cette étude pilote singulière a permis de donner une réponse analytique à l'analyse d'une carte de données géophysiques dans le domaine minier. La méthode géo-électrique utilisée dans cette approche originale a fourni des résultats satisfaisants tout en confirmant l'adaptation de la méthode des résistivités. Les zones anormales correspondant aux "dérangements" sont assimilées aux distributions anormales de densité. Les utilitaires classiques de traitement de cartes dans le domaine spatial se sont avérés efficaces sous les hypothèses énoncées. L'analyse spatiale a permis de traiter les anomalies de la résistivité comme des discontinuités. Elle a d'ailleurs permis de confirmer la distribution aléatoire des "dérangements" sur la zone d'étude. Les cartes transformées permettent également aux géomètres-topographes de circonscrire efficacement les surfaces anormales des réserves des phosphates.

C- PERSPECTIVES

Au demeurant, en continuité avec la thématique ci-dessous exposée, il a été proposé un sujet de thèse (*Analyse numérique comparative des signatures géo-électriques des « perturbations » des séries phosphatées de Sidi Chennane*) afin de cerner et de circonscrire davantage les effets du « débruitage » sur une carte 2D d'une aussi grande densité. Plus particulièrement, une partie de ce travail de thèse, porterait essentiellement sur l'approche multifractale appliquée à l'analyse des signatures géo-électriques et à l'identification des échos parasites ou « perturbations » au sens du signal géo-électrique (zones « dérangées »). Ces signatures géo-électriques provenant d'une surface test dite de référence surplombant un environnement de séries phosphatées appartenant au gisement Sidi Chennane, la fractalité des différentes cartes des zones de « dérangements » serait ramenée à la quantification du degré de « perturbation » de ces zones selon l'apport des techniques d'interpolation et de « débruitage » multifractal. Cette fractalité ainsi obtenue et analysée serait corrélée à un indicateur des réserves des séries phosphatées dites « saines » ou non « dérangées ».

Le proche sous-sol est d'une importance capitale et déterminante dans la vie et l'activité des sociétés humaines. Le sol sert de support à l'ensemble de la production agricole. Tous les ouvrages de génie civil prennent appui sur le sous-sol tout en utilisant des matériaux qui en sont extraits. L'eau et la chaleur s'y stockent. Les matières énergétiques et minérales en proviennent. Le sol recèle enfin la majeure partie des vestiges matériels de l'activité passée des hommes. Le proche sous-sol est par conséquent un objet d'étude et un carrefour de convergence pour des disciplines scientifiques diverses. La géophysique appliquée, et plus particulièrement celle dite de subsurface, en est une. La tranche de profondeur prise en considération va de la surface jusqu'à une centaine de mètres, occasionnellement jusqu'aux niveaux les plus profonds accessibles par forage. Dans les cas d'existence de lois de similitude, les résultats obtenus sont applicables à des profondeurs dépassant la limite des forages : les méthodes électriques en sont un exemple probant. La mesure de la résistivité électrique, issue de ces dernières, présente ainsi plusieurs atouts : une très grande variabilité [eau de mer : $0.25 \Omega.m$, sols gelés : $10000 \Omega.m$, sensibilité à la granularité et à l'humidité du milieu, convivialité et opérabilité dans l'acquisition des mesures avec un matériel peu onéreux.

Dans ce contexte spécifique, nous nous proposons d'exposer les attendus des prochaines phases envisagées pour le développement de notre thématique. Il est projeté la réalisation d'études géophysiques orientées sur les sites archéologiques où la prospection électrique recherche

directement des structures anthropiques, afin d'explorer et de valoriser le patrimoine culturel de la région. Cette perspective est envisagée dans la phase d'opérer une ré-interprétation des cartes de données électriques et magnétiques réalisées en 1976 sur le site médiéval d'Ain Kerouach, de part son importance, par l'analyse de leurs signatures analytiques et spectrales.

Les cartographies en géophysique nécessitent l'accès à des bases de données de paramètres géophysiques mesurables. A partir des informations recueillies sur l'ensemble des données géophysiques analysables, et dans le but d'avoir une représentation spatialisée des phénomènes, l'analyse de la cartographie géophysique permettrait d'affiner les relations entre types de sol et données géophysiques. Les domaines d'application s'étalent de l'aménagement du territoire à l'analyse des risques géophysiques tels les séismes et les glissements de terrain. Dans ce contexte, l'exploitation de la banque de données gravimétriques, couvrant la territorialité du Maroc serait d'un apport certain. Les attendus de cette perspective sont divers et singulièrement originaux via l'approche par ondelettes analysantes : la géométrie des contacts traduit l'histoire tectonique d'une région. Les signatures analytiques des contacts sur le champ de potentiel gravimétrique peuvent constituer un moyen de recherche peu onéreux, efficace et rapide grâce à une interprétation dans le domaine des ondelettes. L'analyse en ondelette continue des champs de potentiel est une méthode unifiant différents outils classiques d'interprétation et comprenant un « débruitage » par prolongement vers le haut : les gradients ou signaux analytiques seraient ainsi remplacés par leurs valeurs à plusieurs altitudes ; le spectre de Fourier en nombre d'onde serait remplacé par les coefficients d'ondelette en position-altitude dans des cônes d'influence de chaque source (le paramètre de translation étant la position, celui de dilatation l'altitude). Cette approche par analyse multi-échelle par ondelette analysante est en effet un outil simple et efficace pour l'étude des contacts ou des failles à partir des cartes d'anomalies gravimétriques. Ces structures géologiques présentent souvent un grand intérêt dans la prospection hydrogéologique ou minière, et qui n'en demeure pas moins une des perspectives.

Les rappels théoriques ont été inspirés des notes de Monsieur Alain Tabbagh « Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement » in « Física de la Tierra, n°7, 161-192, Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense, 1995 », ainsi que celles de Monsieur Laurent Marescot « An introduction to electrical imaging. » in « Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 90.1: 23-40, 2006 ».

REFERENCES

LISTE DE QUELQUES REFERENCES CHOISIES ISSUES DES BIBLIOGRAPHIES DES TRAVAUX REALISES

ARDESTANI , E. V., MOTAVALLI ANBARAN, H. Constraints of analytic signal to determine the depth of gravity anomalies. *Journal of the Earth & Space Physics*, 33 (2), 2007, P. 135.

BAKKALI , S., AMRANI , M. About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate "Disturbances" map. *Acta Montanistica Slovaca*, 2008, 13 (2), 216-222.

BAKKALI , S., 2006. Application du filtrage spatial à l'analyse des contours des zones anormales de « dérangements » des séries phosphatées de Sidi Chennane (Maroc), *Revue Afrique Science, Revue Internationale des Sciences et Technologie*, Vol.2, (1), 116-130.

BAKKALI , S., 2006. A resistivity survey of phosphate deposits containing hardpan pockets in Oulad Abdoun, Morocco, *Geofisica Internacional*, **45** (1), p73-82.

BAKKALI , S. AND J. BOUYALAOUI ., 2005. Essai d'optimisation de la capacité de retenue d'eau d'un lac par caractérisation géophysique du recouvrement argileux, *African Journal of Science & Technology*, AJST, 6 (2).

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, p123-131.

BAKKALI , S. Analysis of phosphate deposit "disturbances" using the horizontal-gradient responses of resistivity data (Oulad Abdoun, Morocco). *Earth. Sci. Res. J.* , 2005, 9 (2), 123-131.

BAKKALI , S., BAHI , L. Enhancement edges of Sidi Chennane phosphate deposit "disturbances" using non-parametric regression analysis of resistivity data., *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, Tome IV, Fascicule 3, 2006, pp.135- 140.

BILOTI , R., SANTOS, L. T., MARTIN, T., Automatic smoothing by optimal splines, *Rev. Bras. Geof.*, Vol.21 (2), 2003, pp. 173-177.

BLAKELY , R.J., 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, pp441

BILLINGS, S.D; BEATSON, R.K. & NEWMAN G.N., 2002 a. Smooth fitting of geophysical data using continuous global surfaces. *Geophysics*, 67 :1823-1834. 2002 b. Interpolation of geophysical data by continuous global surfaces. *Geophysics*, 67 :1810-1822.

BOWMAN, A.W. & AZZALINI , A. 1997. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*. Oxford Statistical Science Series, 18. Clarendon Press, Oxford, UK.

CONGALTON, R.G., 1988. Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (5) :587-592.

COOPER, G., COWAN, D. The application of fractional calculus to potential field data *Exploration Geophysics*, 34, 2003, 51-56.

COOPER, G.R.J., 2003. Feature detection using sunshading. *Computer & Geosciences* 29,941-948.

COOPER, G. AND COWAN, D., 2003. The application of fractional calculus to potential field data. *Explor. Geophys.* 34, 51-56.

DI ERCKX, P, Curve and Surface Fitting with Splines, New York, NY: Oxford Science Publications, 1993, pp.285.

HORN, B.K.P., 1982. Hill shading and the reflectance map. *Geoprocessing* 2, 65-146.

KANASEWICH, E.R., 1981. Time sequence analysis in Geophysics, The University of Alberta Press, 480 p.

KCHIKACH, A., JAFFAL, M., AIFA, T., BAHIL, 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., BOYA, B., AMAGHZAZ, M., VEYRIERAS, T., IQIZOU, K. 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*, 2006, 338, 289-296.

KOO, J.-Y., Spline estimation of discontinuous regression functions, *J. Comp. Graph. Statist.* 6, 1996, pp.266-284.

LEE, T. C. M., Robust fitting of discontinuous regression functions., *Proceedings of the Interface*, 31, 1999, pp.476-481

LEE, T. C. M., Automatic smoothing for discontinuous regression functions., *Statistica Sinica*, 12, pp.823-842.

NGO, L., WAND, M., Smoothing with Mixed Model Software, *Journal of Statistical Software*, Vol. 9, 2004, pp.1-54.

TABBAGH A., 1995. Méthodes électriques et électromagnétiques appliquées à l'archéologie et à l'étude de l'environnement, *Revista Fisica de la Tierra*, Vol.7, 161-192.

MOLANO, C.E, SALAMANCA, M., VAN OVERMEEREN, R.A., 1990. Numerical modelling of standard and continuous vertical electrical soundings, *Geophysical Prospecting* 38 (7), 705-718.

NABIGHIAN, M.N., 1972. The analytic signal of two dimensional bodies with polygonal cross section : its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37, 507.

PAWLOWSKI, R.S. Preferential continuation for potential-field anomaly enhancement. *Geophysics*, 60 (2), 1995, 390-398.

PHILLIPS, J.D. Potential-field continuation: past practice vs. modern methods. 66th Meeting, SEG, 1996, Denver, Expanded Abstracts, 1411-1414.

SAVITZKY, A. AND M.J.E. GOLAY, 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.

SALEM, A., RAVAT, DHANANJAY., GAMEY, T.J., USHIJIMA, K. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49, 231-244.

SYBERG, F.R.J. A Fourier method for the regional-residual problem of potential fields. *Geophysical Prospecting*, 20, 1972, 47-75.

RIDSDILL-SMITH, T.A., 1998. Separation filtering of aeromagnetic data using filter-banks, *Expl. Geophys.*, 29 , 3-4, 577-583.

WAND, M., Smoothing and mixed models., *Computational Statistics*, 18, 2003, pp.223-250.

TELFORD, W. M. AND R.E SHERIFF, 1991. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, pp790.

TROMPAT, H., BOSCHETTI, F., HORNBY, P. Improved downward continuation of potential field data. *Exploration Geophysics*, 2003, 34(4), 249 -256.

XI ONG, L. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71 (2), 2006, P. L13-L16.

ZAUDERER, E. *Partial Differential Equations of Applied Mathematics*, 3rd Ed, Wiley-Interscience, New Jersey, 2006, 930 p.

RECUEIL DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS

[Purchase](#)[Export](#)[Advanced search](#)

Russian Geology and Geophysics

Volume 48, Issue 9, September 2007, Pages 775–781

Enhancement of edges of Sidi Chennane phosphate
"disturbances" using sunshading responses of resistivity data

Saad Bakkali

Earth Sciences Department, Faculty of Sciences and Techniques, Tangier, Morocco

Received 20 September 2005, Accepted 16 December 2006, Available online 29 September 2007

[Show less](#)

Choose an option to locate/access this article:

Check if you have access
through your login credentials
or your institution[Check access](#)[Purchase \\$31.50](#)[Get Full Text Elsewhere](#)

doi:10.1016/j.rgg.2006.12.012

[Get rights and content](#)

Abstract

Sunshading is a powerful tool for the enhancement of edges in images. Given the azimuth and elevation of a source illumination, it calculates the reflectance from a surface which is composed of the data to be interpreted. It is a standard tool used in the interpretation of geophysical potential field data. In the great Oulad Abdoun phosphate basin, inclusions of sterile hardpan—so-called "disturbances"—are hard to detect as they interfere with phosphates. Their resistivity is above 200 Ohm·m against 80 to 150 Ohm·m for a phosphate-rich mineral. A Schlumberger resistivity survey over an area of 50 hectares was carried out. The geologic setting was successfully modeled on the basis of sunshaded maps of disturbances. A new field procedure was tested to deal with the extended edges of anomalous zones of phosphate deposit disturbances. Phosphate reserves were estimated more reliably.

Keywords

Geophysical surveys; resistivity; phosphate; feature; sunshading; Morocco

Corresponding author.

Copyright © 2007 Published by Elsevier B.V.

[About ScienceDirect](#)
[Terms and conditions](#)
[Contact and support](#)
[Privacy policy](#)

Copyright © 2015 Elsevier B.V. or its licensors or contributors. ScienceDirect® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Cookies are used by this site. To decline or learn more, visit our [Cookies](#) page.[Switch to Mobile Site](#)

Recommended articles

[Les sondages électromagnétiques te...](#)2006, Comptes Rendus Geoscience [more](#)[The Surface Geophysical Methods: ...](#)2012, Procedia Engineering [more](#)[Alkaline gabbroids of the Chirii outcr...](#)2007, Russian Geology and Geophysics [more](#)[View more articles »](#)

Citing articles (1)

Related book content

Enhancement of edges of Sidi Chennane phosphate “disturbances” using sunshading responses of resistivity data

Saad Bakkali *

Earth Sciences Department Faculty of Sciences and Techniques, Tangier, Morocco

Received 20 September 2005; accepted 16 December 2006

Available online xx August 2007

Abstract

Sunshading is a powerful tool for the enhancement of edges in images. Given the azimuth and elevation of a source illumination it calculates the reflectance from a surface which is composed of the data to be interpreted. It is a standard tool used in the interpretation of geophysical potential field data. In the great Oulad Abdoun phosphate basin, inclusions of sterile hardpan — so-called “disturbances” — are hard to detect as they interfere with phosphates. Their resistivity is above 200 Ohm-m against 80 to 150 Ohm-m for a phosphate-rich mineral. A Schlumberger resistivity survey over an area of 50 hectares was carried out. The geologic setting was successfully modeled on the basis of sunshaded maps of disturbances. A new field procedure was tested to deal with the extended edges of anomalous zones of phosphate deposit disturbances. Phosphate reserves were estimated more reliably.

© 2007 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

Keywords: Geophysical surveys; resistivity; phosphate; feature; sunshading; Morocco

Introduction

Morocco is a major producer of phosphate, with an annual output of 19 million tons and reserves in excess of 35 billion cubic meters. This is more than 75% of world reserves. Resistivity surveys have been successfully used in the Oulad Abdoun phosphate basin in the Khouribga Province (Fig. 1), which is about 120 km south of Casablanca. The present survey was carried out in the Sidi Chennane deposit which is part of the Oulad Abdoun basin, extending over 800,000 hectares. The Sidi Chennane deposit is sedimentary and contains several distinct phosphate-bearing layers. These layers are in contact with alternating layers of calcareous and argillaceous hardpan. In this field, extraction was begun after the Grand Daoui deposit had been exhausted. However, the new deposit contains many inclusions or lenses of extremely dense hardpan locally known as “derangements” or disturbances, found throughout the phosphate-bearing sequence. The hardpan pockets are normally detected only by drilling. They interfere with field operations and introduce a severe bias in the estimates of phosphate reserves.

Direct exploration methods such as well logging or surface

geology are not particularly effective. However, the chemical changes which are detectable at the hardpan/phosphate rock interface produce an important resistivity contrast. Other factors such as changes in lithofacies and clay content and consistence appear to account for some additional resistivity difference. It was found that normal phosphate-bearing rock

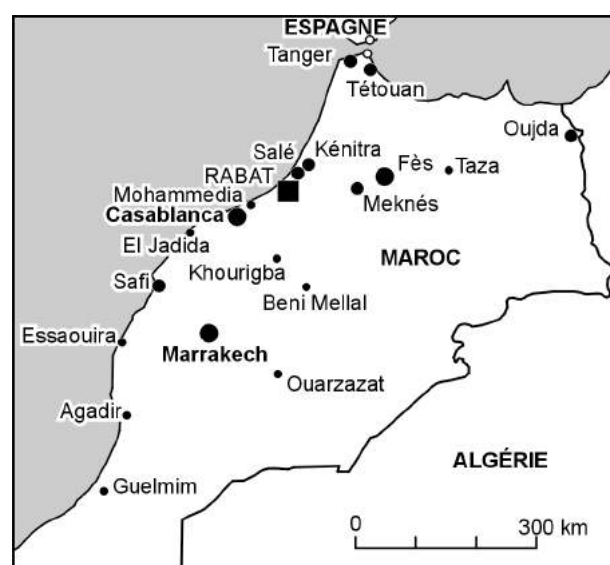


Fig. 1. Location of the study area.

* Corresponding author.

E-mail address: saad.bakkali@menara.ma (Saad Bakkali)

has a resistivity of 80 to 150 Ohm-m while the hardpan resistivity typically varies from 200 to 1000 Ohm-m. A pilot resistivity survey was performed over an area of 50 hectares. The objective of this experiment was to try to map and constrain the anomalous regions corresponding to hardpan. A resistivity map was expected to allow the electrical resistivity signals to be imaged in 3D. We used a Schlumberger array with a span of 80 and 120 m (Bakkali and Bahi, 2005) designed to reach depths of 15 and 40 m, respectively. The so-called disturbances appear at random so that the apparent resistivity maps which are numerical maps (Bakkali and Bahi, 2005) may be used by the operating personnel as a kind of radar to schedule field operations. In this study we use sunshading (Horn, 1982) to enhance edges in images obtained from resistivity data. The resulting reflectance intensity from a surface characterized by the geoelectric data to be interpreted will represent in a first approach the level of disturbance corresponding to anomalous zones (disturbed phosphate zones).

Overview of the area under study

The Sidi Chennane phosphate deposit is within the Oulad Abdoun basin about 33 km southeast of Khouribga (Fig. 2). Its boundaries are: meridian 372500 (Lambert) in the west, meridian 22800 (Lambert) in the south, highway RP22 in the east, and outcrops of the basement of the phosphate-rock sequence, in the north. The climate of the phosphate plateau is essentially arid. Rainfall is from November to May and is usually below 400 mm. Vegetation is represented by sparse dwarf palm trees. Rural population subsists on cattle ranching and seasonal agriculture in small villages, or douars. Ground water is increasingly scarce. Scattered wells depend on an aquifer in the Turonian limestones at depths of 100 m or more, which is sealed by the Senonian marls. This aquifer is also the sole water supply for various mining operations.

Geology

The phosphate mineral was deposited over a long time interval from Maastrichtian (Late Cretaceous, about 80 Ma),

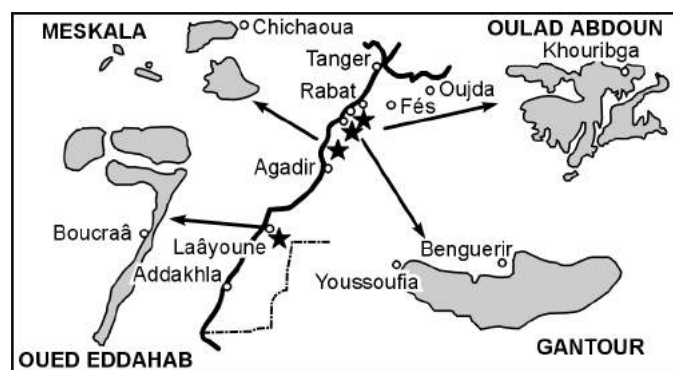


Fig. 2. Main phosphate basins in Morocco.

to Lutetian (Early Eocene, 40 Ma). However, deposition was irregular. Some layers are missing. The Oulad Abdoun Basin occupies most of the phosphate plateau which is bounded in the north by red outcrops of pre-Cenomanian sediments forming an extension of the southern edge of the Central Massif. The western boundary is the Rhamna Range, the Beni Amir plain is the southern boundary and the Upper Atlas of Beni Mellal extends to the east. The geology of the study area is well understood (see Fig. 3 for stratigraphy).

The geologic section rests unconformably on Paleozoic schists and quartzites. The basement is well located and the sedimentary cover is fairly thick. The uppermost formations of the Maastrichtian and Eocene contain phosphate-bearing strata 30 to 50 m thick. The earlier deposits, i.e. the lower 5 to 28 m, are clayey phosphates of Maastrichtian age. The upper 20 to 30 m are less homogeneous. They are layered phosphate marls and sandstones with some limestones of Eocene age.

The phosphate-bearing strata rest on Senonian marls and limestone marls up to 70 m, which overlie 20 to 60 m of Turonian limestones; a Cenomanian formation of alternating gypsum marls and limestone marls occurs below, underlain by 10 to 60 m of red marls and mudstones of pre-Cenomanian age.

The disturbances may be differentiated by size of the pocket or inclusion, type of material, hardness, clay content, or type of contact with the phosphate rock. Two main types of disturbances are established. The first type is found throughout the mineral deposit: it appears to be a random mixture of limestones, marls, clays, cherts and low-grade phosphate with large amounts of cherty limestone. The second type is highly disturbed and lacks any dominant facies (Kchikach and Hiyane, 1991). It appears as an accumulation of low-grade phosphate limestone blocks with large nodules of chert, marl, some fragments of chert and phosphate rock. The latter type forms inclusions of 10 to more than 150 m and is often encountered on mining (Fig. 4).

Geophysical data

These pockets are found both in the underlying formation and in the upper members of the phosphate sequence, and as a result there are strong resistivity contrasts between the disturbances and the normal phosphate-bearing rock (Kchikach et al., 2002). These contrasts were confirmed in the test runs (Fig. 5). Geophysical prospecting could thus be based on prior evidence from field data.

Resistivity is an excellent parameter and marker for distinguishing between different types and degree of alteration of rocks. Resistivity surveys have long been successfully used by geophysicists and engineering geologists and the procedures are well established. Resistivity mapping is widely used. The principal advantages of this method are its quick application and simple qualitative interpretation of the results. The apparent resistivity reflects the corresponding changes in the distribution of true resistivities in a section at a given depth. They return count variation of the resistivity in the horizontal

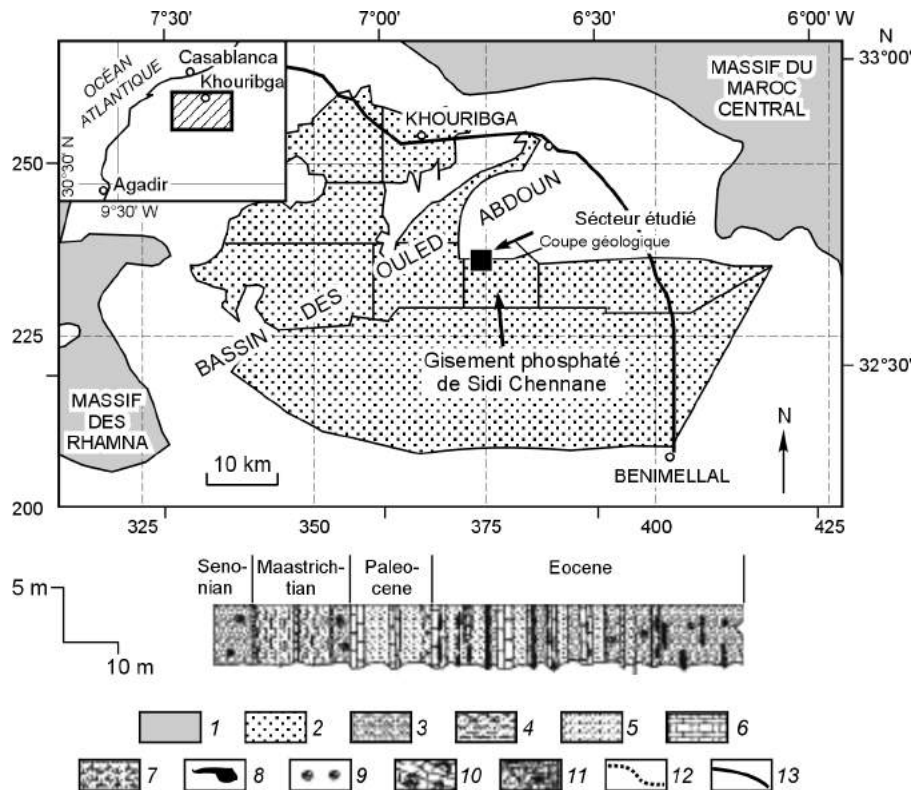


Fig. 3. General outline of the stratigraphical log of the phosphatic series of Sidi Chennane. 1 — Hercynian massif; 2 — area of distribution of phosphate-bearing rocks; 3 — marls; 4 — phosphate marls; 5 — phosphate-bearing horizon; 6 — limestones; 7 — phosphate limestones; 8 — broken siliceous horizon; 9 — siliceous concretions; 10 — disturbances composed of siliceous limestones alone; 11 — disturbances composed of blocks of limestones, marls, and clays; 12 — outline of disturbances; 13 — roads.

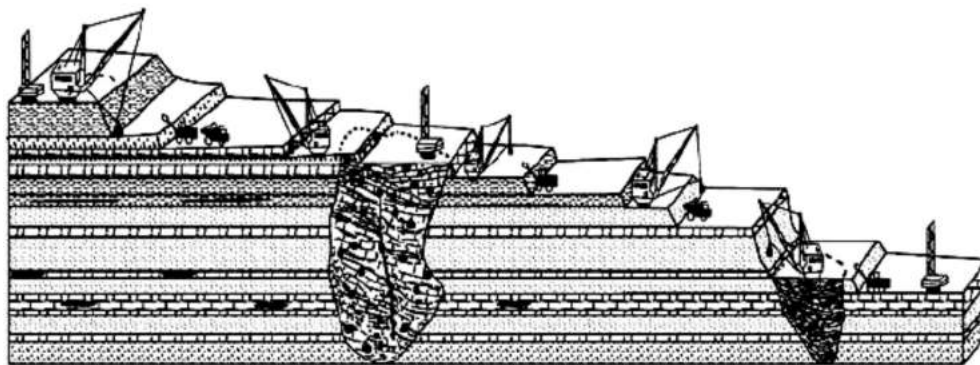


Fig. 4. Adverse effects of "disturbances" on mining operations.

direction. The maps of resistivity are similar to the maps of surface observations used by the geologists except that they are physical measurements of the parameters characterizing the depth section. It is often useful to measure the apparent resistivity on the same profile with several arrays to obtain results on several sections of ground.

The study area was selected for its representativity and the resistivity profiles were designed to contain both disturbed and enriched areas (Bakkali and Bahi, 2005). The sections were also calibrated by using vertical electrical soundings (Bakkali and Bouyalaoui, 2005). The lateral inhomogeneities of the ground can be investigated by means of apparent resistivity. As the surface extension of the layers is displayed we may

infer the presence or absence of any disturbances as well as any facies variations. We used a Schlumberger array with a span of 80 and 120 m designed to reach a depth of 15 and 40 m, respectively. Our resistivity measurements were performed by means of a Syscal2 resistivity meter by BRGM Instruments using a rectangular array of 20×5 m. In order to reach a mean depth of exploration of 15 and 40 m we carried out 51 traverses at a spacing of 20 m for each Schlumberger array span of 80 and 120 m, respectively. There were 101 stations at 5 m distance for every traverse, which makes 5151 stations altogether in the survey for each Schlumberger configuration.

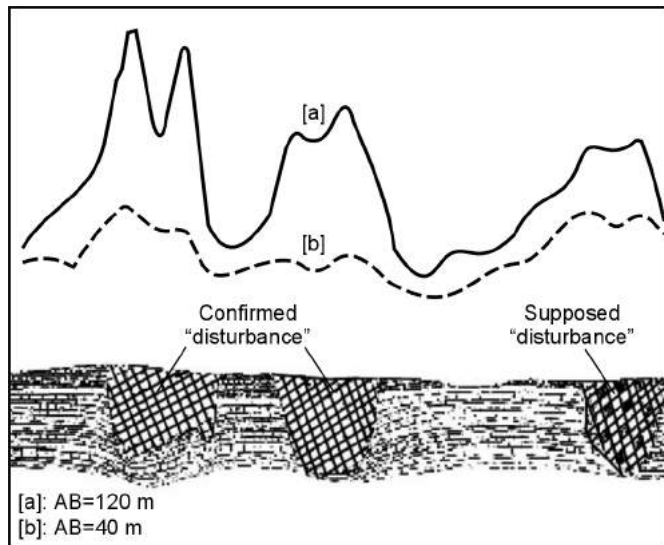


Fig. 5. A resistivity traverse over three "disturbances".

Sunshading approach

The enhancement of edges in geophysical potential data is useful as it allows lineaments to be made more apparent, thus

helping the geological interpretation process. One method which is in current usage is termed sunshading. Sunshading considers the data as if it were a topographic surface and illuminates it with light from a source at infinity which is specified by its azimuth and elevation. Different reflectance models are available for different types of surface. It is common to assume that the surface is ideal: it reflects all light incident upon it and reflects light equally in all directions. This is termed a Lambertian reflector and its normalized reflectance (Pelton, 1987) map is given by the following expression:

$$R = \frac{I + p_0 p + q_0 q}{\sqrt{I + p^2 + q^2} + \sqrt{I + p_0^2 + q_0^2}},$$

where $p_0 = \cos \phi \tan \theta$ and $q_0 = \sin \phi \tan \theta$, θ is the sun elevation measured from the vertical and ϕ is the azimuth measured from anticlockwise from the east, p and q are the gradients of the data in the east and north directions, respectively, and may be calculated in the space domain from the following expressions:

$$p = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial x} = \frac{\rho_{i+1,j} - \rho_{i-1,j}}{2\delta x} \quad \text{and} \quad q = \frac{\partial \rho_{app}(x, y)}{\partial y} = \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j-1}}{2\delta y},$$

where x is the eastern coordinate and y is the northern

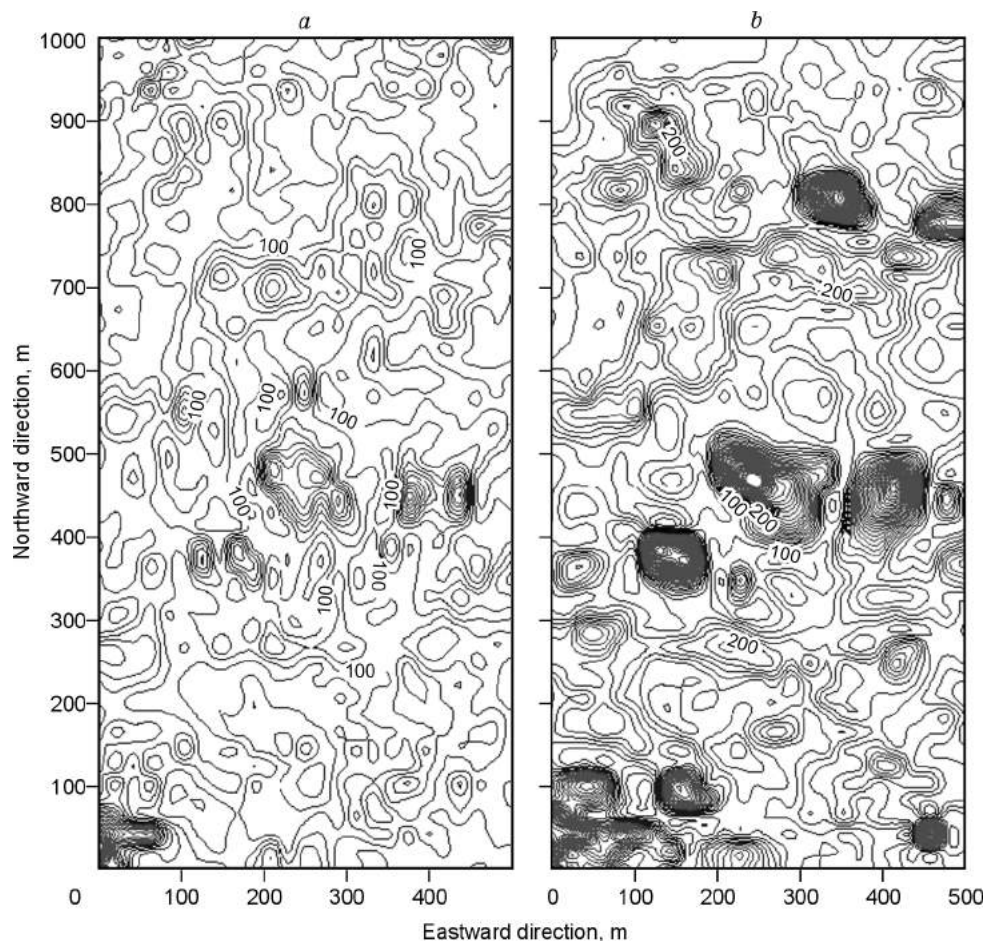


Fig. 6. Resistivity maps of the study area with a Schlumberger array span of 80 (a) and 120 m (b) (interval contour: 20 Ohm-m).

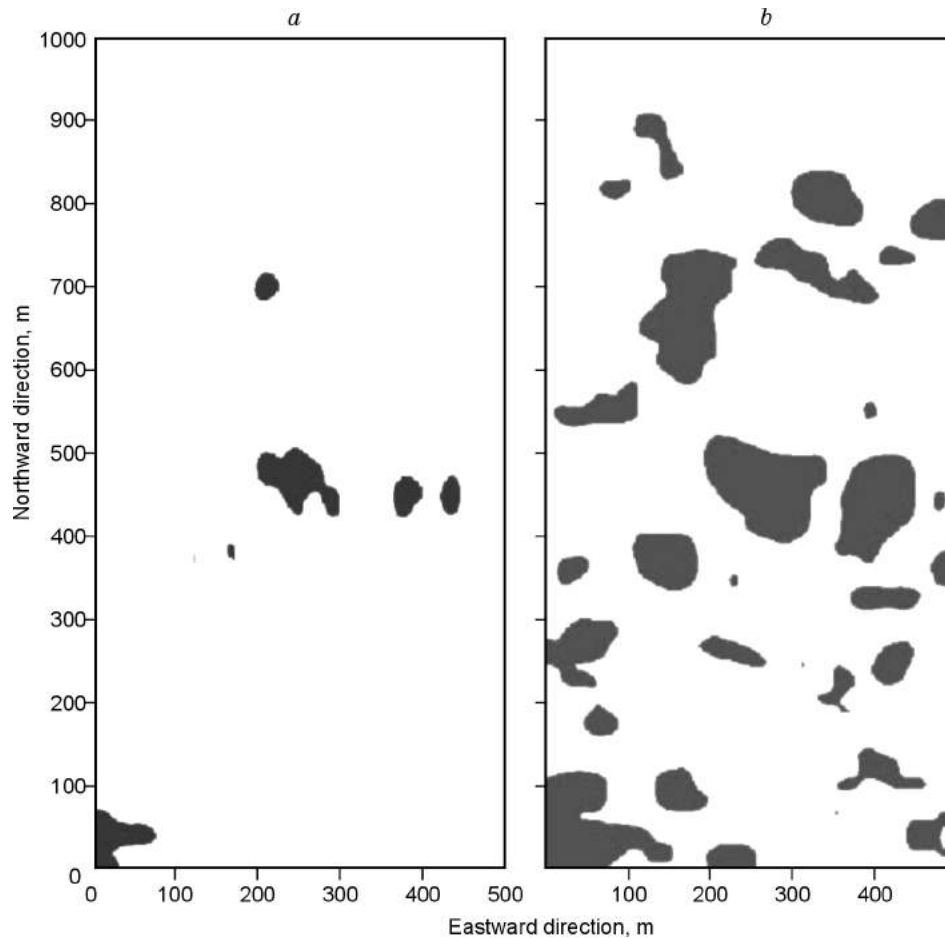


Fig. 7. Maps of resistivity anomalies for Schlumberger array span of 80 and 120 m.

coordinate. $\rho_{i,j}$ is the pseudo-apparent resistivity defined at grid point (i, j) . Grid intervals in the x -direction and y -direction are δx and δy , respectively.

The elevation and azimuth are chosen by the interpreter. Since the same order of derivative is used for both horizontal gradients, the orientation of the surface normal which controls the reflectance does not change.

Features that lie at 90° to the sun azimuth are enhanced, while those which lie parallel to it are reduced in amplitude. To enhance the mapped edges that lie at any orientation, the azimuth should be set to 180° from the direction of steepest slope at each point on the surface (Cooper, 2003).

Results

The apparent resistivity maps (Fig. 6) obtained from a survey had been considered as maps of discrete potentials on the free surface, and any major singularity in the apparent resistivities due to the presence of a perturbation would be due to the crossing from a “normal” into a “perturbed” area and vice versa (Bakkali, 2006). In other words, the apparent resistivity maps had been considered maps of scalar potential differences assumed to be harmonic everywhere except over

the perturbed areas. Thus one assumes that the potential difference data maps may be processed in both space and frequency domains (Cooper and Cowan, 2003). The original resistivity maps obtained in a previous study and based on the above hypotheses had allowed direct images for an interpretation of the resistivity survey. We were able to identify the anomalous zones which turned out to be strongly correlated with the disturbances (Bakkali and Bahi, 2005) (Bakkali, 2006). The result were maps of anomalous areas of Oulad Abdoun phosphate deposit disturbances (Fig. 7).

The data process was executed using the EasyMapping software (Monnereau, 2003). The sunshading tool is basically a spatial filter which enhance edges of anomalous zones. We used the sunshading process using an azimuth sun angle of 180° for enhancing edges in an image that lie at any orientation. The elevation sun was put to zero. Figure 8 shows the sunshaded maps of anomalous zones of Oulad Abdoun phosphate deposit disturbances corresponding to an azimuth sun angle of 180° . With the sunshading approach, we found that the disturbances as detected from surface measurements were distributed apparently at random as confirmed by the various sunshaded maps (Fig. 8).

The disturbances as detected from surface measurements which present depth lower than 15 m (Schlumberger array span

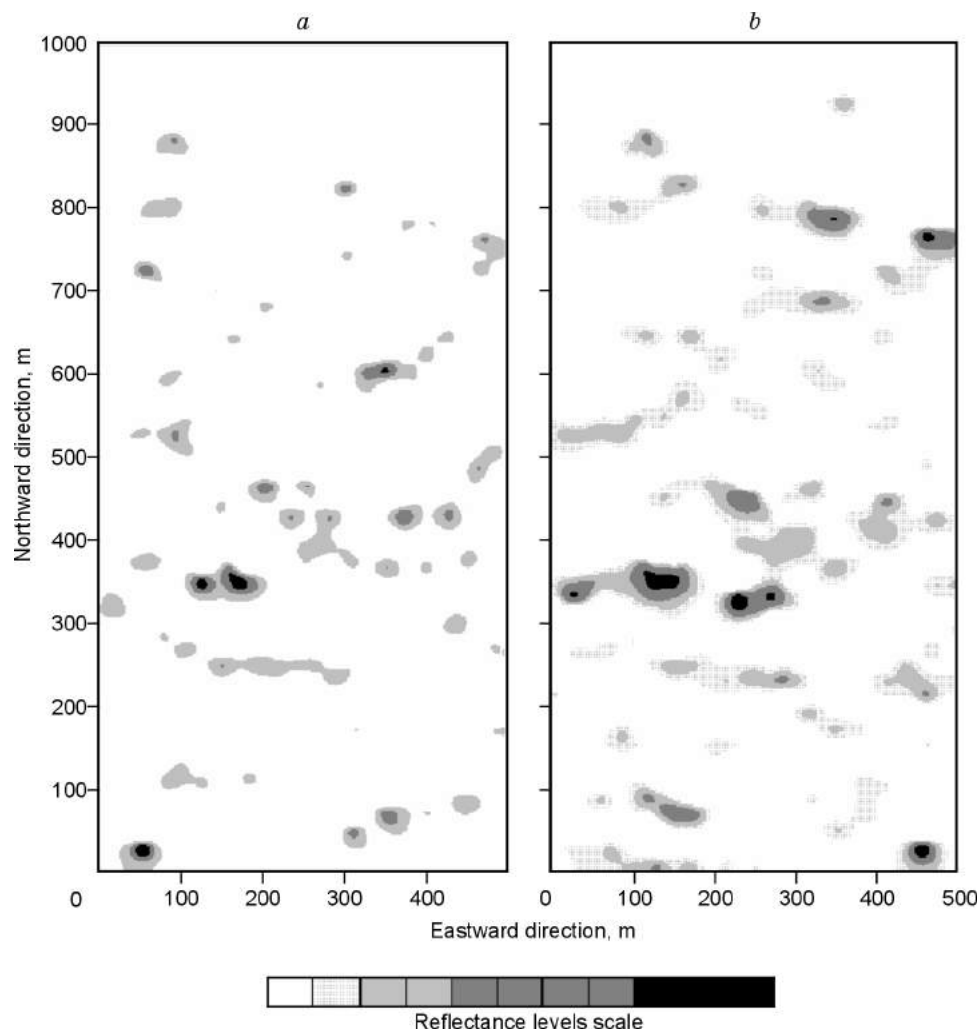


Fig. 8. Sunshaded maps of anomalous zones of Oulad Abdoun phosphate disturbances with 180°.

of 80 m) seem to be not very significant regarding to surface study area. The disturbances as detected from surface measurements and corresponding to the phosphate deposit anomalous zones were dominating in depths ranging from 15 to 40 m. This fundamental result is the direct consequence of the comparison of the maps of the phosphate deposit anomalous zones corresponding to the two Schlumberger devices. In our case the Schlumberger array span is a spatial filter applied to filter anomalous zones of phosphate deposit disturbances. The sunshaded maps (Fig. 8) represent an effective indicator of the level of disturbance measured on the topographic surface corresponding to the study area. The maxima reflectance would be occur immediately over rock masses of contrasting densities. On the sunshaded maps, the reflectance will in this case be an indicator of variation level of contrasting densities between the disturbances and the normal phosphate-bearing rock. A high reflectance ratio will represent a strong level of disturbance. In our case, the anomalous areas edges were better enhanced, and the reflectance level indicates the level of disturbances in the anomalous zones. According to the appreciation of the surveyors anomalous zones will be described as little, slightly, fairly, enough or highly disturbed.

These properties will be correlated to the enhancement edges of the anomalous zones resulting from the sunshading process.

Conclusions

We found that the sunshading approach helps to better constrain the location of anomalous areas on the surface. We have described an analytical procedure, which is a spatial filter, to enhance edges of anomalous zones of a specific problem in the phosphate mining industry. The results proved satisfying. Data processing procedure as sunshading were found to be consistently useful and may be used as an auxiliary tool for decision making under field conditions. It was found that the sunshaded images with 180° of an azimuth sun corresponding to the anomalous zones of Oulad Abdoun phosphate deposit disturbances were particular useful to the surveyors for improving and constraining their estimates of phosphate reserves in the deposit. While assimilating the reflectance level to disturbance level the sunshading tool appears to be an interesting technique of optimization of the reserves in the mining area.

References

- Bakkali, S. and Bahi, L., 2006. Cartographie des “dérangements” de séries phosphatées par mesures de résistivités électriques. *J. Sci. Ing., JSPI* 6, 1–10.
- Bakkali, S. and Bouyalaoui, J., 2005. Essai d’optimisation de la capacité de retenue d’eau d’un lac par caractérisation géophysique du recouvrement argileux. *AJST* 6 (2), 12–22.
- Bakkali, S., 2006. A resistivity survey of phosphate deposits containing hardpan pockets in Oulad Abdoun, Morocco. *Geofisica Intern.* 45 (1), 73–82.
- Cooper, G.R.J., 2003. Feature detection using sunshading. *Computer & Geosciences* 29, 941–948.
- Cooper, G. and Cowan, D., 2003. The application of fractional calculus to potential field data. *Explor. Geophys.* 34, 51–56.
- Horn, B.K.P., 1982. Hill shading and the reflectance map. *Geoprocessing* 2, 65–146.
- Kchikach, A. and Hiyane, M., 1991. Apport de la géophysique à la détermination des dérangements à Sidi Chennane Nord, Publications Ecole Mohammadia d’Ingenieurs, Rabat, Maroc.
- Kchikach, A., Jaffal, M., Aifa, T., 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.
- Pelton, C., 1987. A computer program for hill-shading digital topographic data sets. *Computer & Geosciences* 13 (5), 545–550.
- Monnereau, O., 2003. About EasyMapping software version 3.0, Manuel d’utilisation, Copyright 2001–2003 Olivier Monnereau.

About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate “Disturbances” map

Saad Bakkali¹ and Mahacine Amrani²

O použití priestorových interpolačných metód na poruchovej mape odhlučnenia Marockých fosfátov údajmi merného odporu

Several methods are currently used to optimize edges and contours of geophysical data maps. A resistivity map was expected to allow the electrical resistivity signal to be imaged in 2D in Moroccan resistivity survey in the phosphate mining domain. Anomalous zones of phosphate deposit “disturbances” correspond to resistivity anomalies. The resistivity measurements were taken at 5151 discrete locations. Much of the geophysical spatial analysis requires a continuous data set and this study is designed to create that surface. This paper identifies the best spatial interpolation method to use for the creation of continuous data for Moroccan resistivity data of phosphate “disturbances” zones. The effectiveness of our approach for successfully reducing noise has been used much success in the analysis of stationary geophysical data as resistivity data. The interpolation filtering approach methods applied to modeling surface phosphate “disturbances” was found to be consistently useful.

Key words: resistivity, Schlumberger, phosphate, interpolation, denoising, Morocco.

Introduction

Resistivity data of Moroccan phosphates “disturbances” collected in the survey are contaminated with noise and artifacts coming from various sources. The presence of noise in data resistivity distorts the characteristics of the geophysical signal, resulting in poor quality of any subsequent processing. Consequently, the first step in any processing of such geophysical data is the “cleaning up” of the noise in a way that preserves the signal sharp variations using interpolation methods. Interpolation is a process widely used in earth science. It estimates the value of a parameter at a point from neighbouring. Geophysical data are used routinely in mineral exploration to delineate the geology of an area. Because geophysical attributes are sparsely sampled; interpolation methods are used to grid the individual sets of data. Interpolation is a method or mathematical function that estimates the values at locations where no measured values are available. Interpolation can be as simple as a number line; however, most geographic information science research involves spatial data. Spatial interpolation assumes the attribute data are continuous over space. This allows for the estimation of the attribute at any location within the data boundary. Another assumption is the attribute is spatially dependent, indicating the values closer together are more likely to be similar than the values farther apart. These assumptions allow for the spatial interpolation methods to be formulated. Spatial interpolation is widely used for creating continuous data when data are collected at discrete locations (i.e., at points). The goal of spatial interpolation is to create a surface that is intended to best represent empirical reality thus the method selected must be assessed for accuracy for these larger studies (Montefusco et al., 1989).

It has been shown that there is no single preferred method for data interpolation. Aspects of the algorithm selection criteria need to be based on the actual data, the level of accuracy required, and the time and/or computer resources available. In the absence of criteria for selecting among the available techniques, this paper compares six spatial interpolations - inverse distance weighting, kriging, radial basis functions, minimum curvature, triangulation and Shepard’s method – with the goal of determining which method creates the best representation of reality for measured resistivity data of Moroccan phosphates “disturbances”. The benefits and limitations of these commonly used interpolation methods are discussed in this paper. Selecting an appropriate spatial interpolation method is the key to surface analysis since different methods of interpolation can result in different surfaces and ultimately different results.

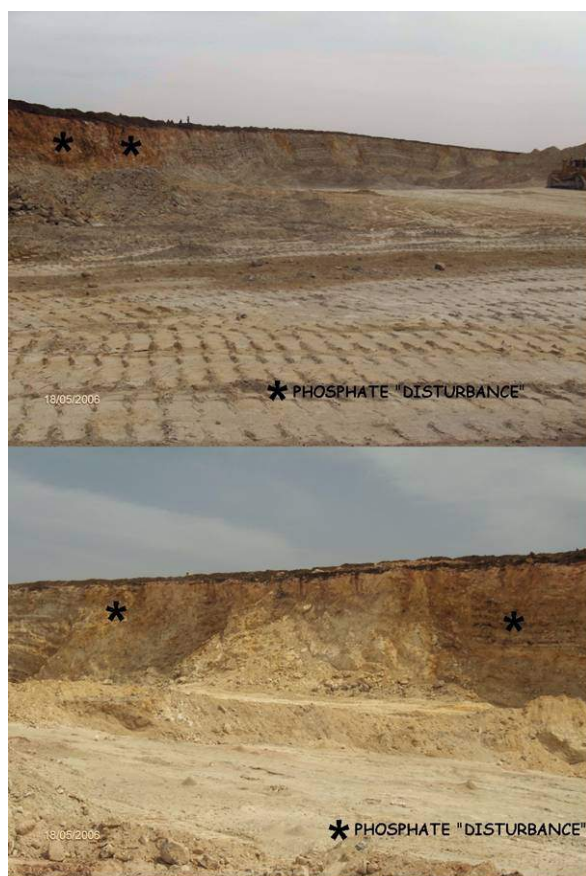
The geophysical context

Resistivity is an excellent parameter and marker for distinguishing between different types and degree of alteration of rocks. Resistivity surveys have long been successfully used by geophysicists and engineering geologists and the procedures are well established. The study area is the Oulad Abdoun phosphate basin which contains the Sidi Chennane deposit. The Sidi Chennane deposit is sedimentary and contains several

¹ Saad Bakkali, Geosciences & Environment Group, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier, Morocco, saad.bakkali@menara.ma

² Mahacine Amrani, Engineering Process Department, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier, Morocco.

(Recenziovaná a revidovaná verzia dodaná 23. 6. 2008)



distinct phosphate-bearing layers. These layers are found in contact with alternating layers of calcareous and argillaceous hardpan. However, a new deposit contains many inclusions or lenses of extremely tough hardpan locally known as “*derangements*” or “*disturbances*” (Fig. 1), found throughout the phosphate-bearing sequence. The hardpan pockets are normally detected only at the time of drilling (Kchikach et al., 2002).

Direct exploration methods such as well logging or surface geology are not particularly effective for estimating phosphate reserves. They interfere with field operations and introduce a severe bias in the estimates of phosphate reserves (Fig. 2).

The study area was selected for its representatives and the apparent resistivity profiles were designed to contain both disturbed and enriched areas (Fig. 3). The sections were also calibrated by using vertical electrical soundings (Fig. 4) (Bakkali et al., 2006a).

Fig. 1. Example of “disturbance” affecting the phosphate stratus.

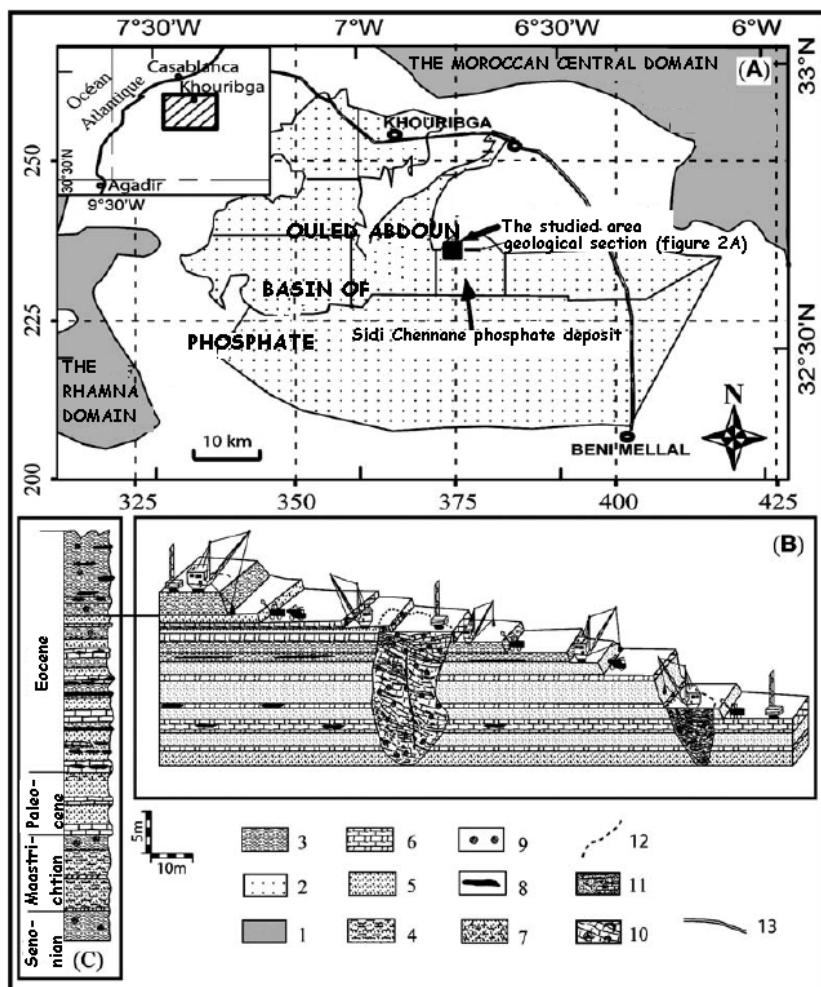


Fig. 2. (A) Location of the studied area in the sedimentary basin of Ouled Abdoun.

(B) Section showing the disruption of the exploitation caused by disturbances.

(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) “disturbance” formed exclusively of silicified limestone; (11) “disturbance” constituted of a blend of limestone blocks, marls and clays; (12) “disturbance” limit; (13) roads.

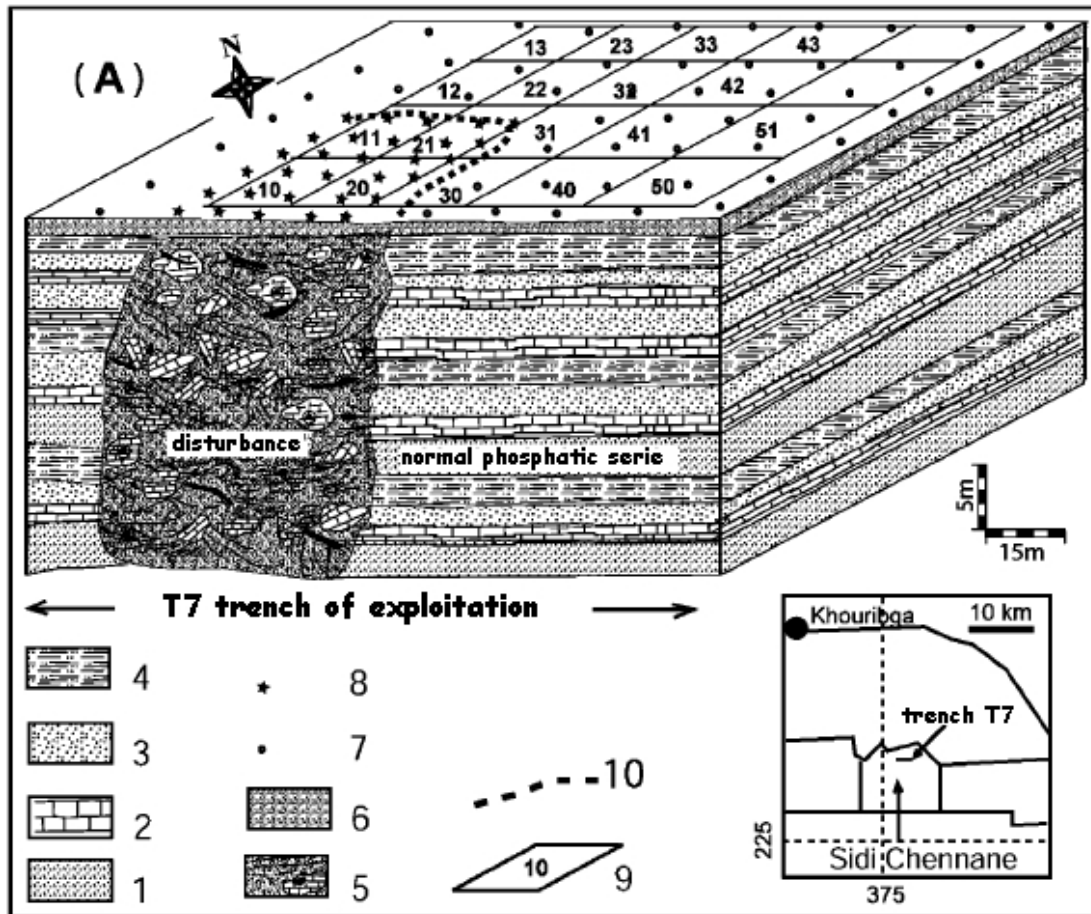


Fig. 3. (A) Geological section of the T7 exploitation trench showing a "disturbance" and position plan of the soundings tests. Apparent resistivity profiles positions while passing from the deranged zone to a normal phosphatic series : (1) phosphatic marls; (2) limestones; (3) phosphatic layer; (4) marls; (5) "disturbance" ; (6) Quaternary cover; (7) borehole crossing a normal phosphatic series; (8) borehole crossing a "disturbance"; (9) measures loop number 10 ; (10) "disturbance" limit.

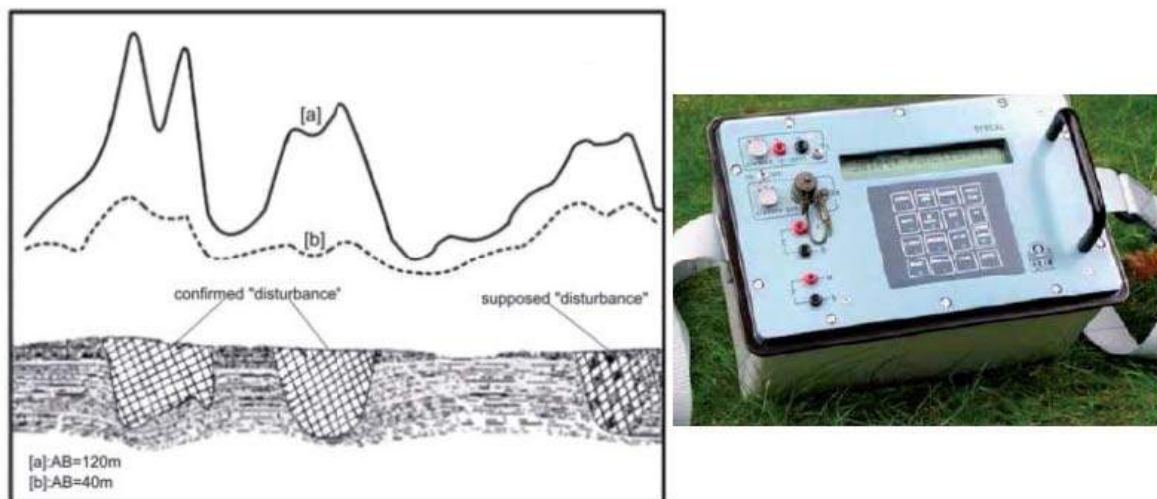


Fig. 4. A synthetic apparent resistivity traverse over three « disturbances » (left side) and the Syscal resistivity meter used in the study (right side).

High values rank of apparent resistivity were encountered due to the presence of near-vertical faulting between areas of contrasting resistivity, and fault zones which may contain more or less highly conducting fault gouge. The gouge may contain gravel pockets or alluvial material in a clay matrix. Such anomalous sections are also classified as *disturbances*. Apparent resistivity values in these profiles locally exceeded $200 \Omega \cdot m$. The apparent resistivity map (Fig. 5) which one obtains from the survey is actually a map of discrete potentials on the free surface, and any major singularity in the apparent resistivities due

to the presence of a perturbation will be due to the crossing from a “normal” into a “perturbed” area or vice versa. In other words, the apparent resistivity map may be considered a map of scalar potential differences assumed to be harmonic everywhere except over the perturbed areas. Interpretation of resistivity anomalies is the process of extracting information on the position and composition of a target mineral body in the ground (Bakkali, 2006). In the present case the targets were essentially the inclusions called *perturbations*. The amplitude of an anomaly may be assumed to be proportional to the volume of a target body and to the resistivity contrast with the mother lode. If the body has the same resistivity as the mother lode no anomaly will be detected. Thus assumed in fact and in first approach that the resistivity anomalies would be representative of the local density contrast between the disturbances and the mother lode. Level disturbance of the anomalous zones is proportionnal to resistivity intensity (Fig. 6).

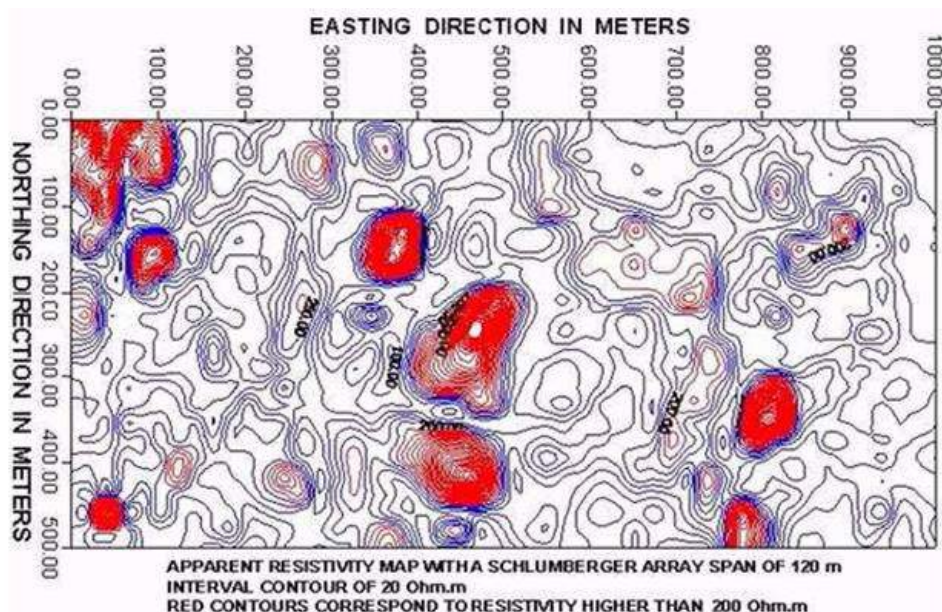


Fig. 5. A map of resistivity anomalies for AB=120 m.

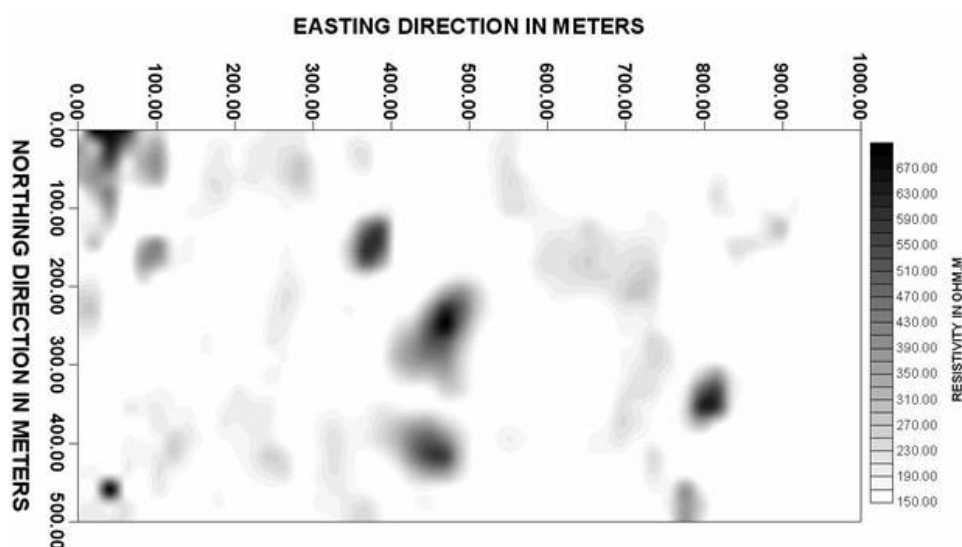


Fig. 6. A map of the disturbed noisy phosphate zones corresponding to Figure 5.

The spatial interpolation methods

Inverse distance

Inverse distance is a weighted average interpolator, which can be either exact or smoothing (Watson et al., 1985). With inverse distance, data are weighted during interpolation, so that the influence of one point, relative to another, declines with distance from the grid node. Weighting is assigned to data through the use of a weighting power, which controls how the weighting factors drop off as distance from the grid node

increases. The greater the weighting power, the less effect the points, far removed from the grid node, have during interpolation. As the power increases, the grid node value approaches the value of the nearest point. For a smaller power, the weights are more evenly distributed among the neighboring data points (El Abbas et al., 1990). Normally, inverse distance behaves as an exact interpolator. When calculating a grid node, the weights assigned to the data points are fractions, the sum of all the weights being equal to 1.0. The smoothing parameter is a mechanism for buffering this behavior. One of the characteristics of inverse distance is the generation of "bull's-eyes" surrounding the observation position within the grid area. A smoothing parameter can be assigned during inverse distance to reduce the "bull's-eye" effect by smoothing the interpolated grid (Smith et al., 1990).

Kriging method

Kriging is a geostatistical gridding method that has proven useful and popular in many fields. This method produces visually appealing maps from irregularly spaced data (Cressie, 1991) (Swan et al., 1995). Kriging attempts to express trends suggested in your data, so that, for example, high points might be connected along a ridge rather than isolated by bull's-eye type contours. Kriging is a very flexible gridding method. The Kriging defaults can be accepted to produce an accurate grid of your data (Davis, 1986). Kriging uses a weighting, which assigns more influence to the nearest data points in the interpolation of values for unknown locations. Kriging, however, is not deterministic but extends the proximity weighting approach of inverse distance to include random components where exact point location is not known by the function. Kriging depends on spatial and statistical relationships to calculate the surface (Davis et al., 1975).

Minimum curvature method

This method applies a two-dimensional cubic spline function to fit a smooth surface to the set of input elevation values (Briggs, 1974). The computation requires a number of iterations to adjust the surface so that the final result has a minimum amount of curvature. Minimum Curvature is widely used in the earth sciences. The interpolated surface generated by Minimum Curvature is analogous to a thin, linearly elastic plate passing through each of the data values, with a minimum amount of bending (Lam, 1983). Minimum Curvature generates the smoothest possible surface while attempting to honor your data as closely as possible. Minimum Curvature is not an exact interpolator, however.

Shepard's method

Shepard's method is a well established method for interpolating scattered data (Shepard, 1968). It is also known as the moving average method. The method is based on forming convex combinations of the scattered data values and does not require the solution of any large linear systems (Gordon, 1978). The Shepard's Method uses an inverse distance weighted least squares method. As such, Shepard's Method is similar to the inverse distance interpolator, but the use of local least squares eliminates or reduces the "bull's-eye" appearance of the generated contours. Shepard's Method can be either an exact or a smoothing interpolator (Lancaster et al., 1990).

Radial basis function interpolation method

Radial basis function method is a well established method for interpolating scattered data (Franck et al., 1980). It is based on forming linear combinations of radial functions centred at each of the data sites (Franck, 1982). Radial Basis Function interpolation is a diverse group of data interpolation methods (Fasshauer et al., 1998). In terms of the ability to fit your data and produce a smooth surface, the Multiquadric method is considered by many to be the best (Chen et al., 1996) (Hardy, 1971). All of the Radial Basis Function methods are exact interpolators, so they attempt to honour the data (Goldberg et al., 1996) (Powell, 1992).

Triangulation with linear interpolation method

Triangulation method uses Renka's algorithm (Renka, 1984) to carry out a Delaunay triangulation (Okabe et al., 1992) of the observation points. The purpose is to identify a neighborhood of nearby observation points to be used in the interpolation. This algorithm creates triangles by drawing lines between data points. The original points are connected in such a way that no triangle edges are intersected by other triangles (Brown, 1994). The result is a patchwork of triangular faces over the extent of the grid. This method is an exact interpolator (Watson, 1992). Each triangle defines a plane over the grid nodes lying within the triangle, with the tilt and elevation of the triangle determined by the three original data points defining the triangle. All grid nodes within a given triangle are defined by the triangular surface. Because the original data are used to define the triangles, the data are honored very closely. Triangulation with Linear Interpolation works best when the resistivity data are evenly distributed over the grid area. Data sets containing sparse areas result in distinct triangular facets on the map (Lawson, 1972).

Conclusion

In this paper we compare six different interpolation methods (Fig. 7). The six different interpolation methods consistently identified *Radial basis function interpolation method* as the best method for interpolating Moroccan phosphate deposit “disturbances” surface. This study has shown that *Radial basis function interpolation method* is most likely to produce the best estimation of a continuous surface of Moroccan phosphate deposit “disturbances”. Nevertheless, the research presented here illustrates that regardless of the approach taken these interpolation methods adequately address the real distribution of the phosphate anomalous zones.

The results show a significant suppression of the noise and a very good smoothing and recovery of the resistivity anomalies signal. We have described an analytical procedure to analyze Moroccan phosphate deposit “disturbances” anomalies. The results proved satisfying. Data processing procedure as *Radial basis function interpolation method* response of Moroccan phosphate deposit “disturbances” resistivity data map was found to be consistently useful and the corresponding output map may be used as auxiliary tools for decision making under field conditions.

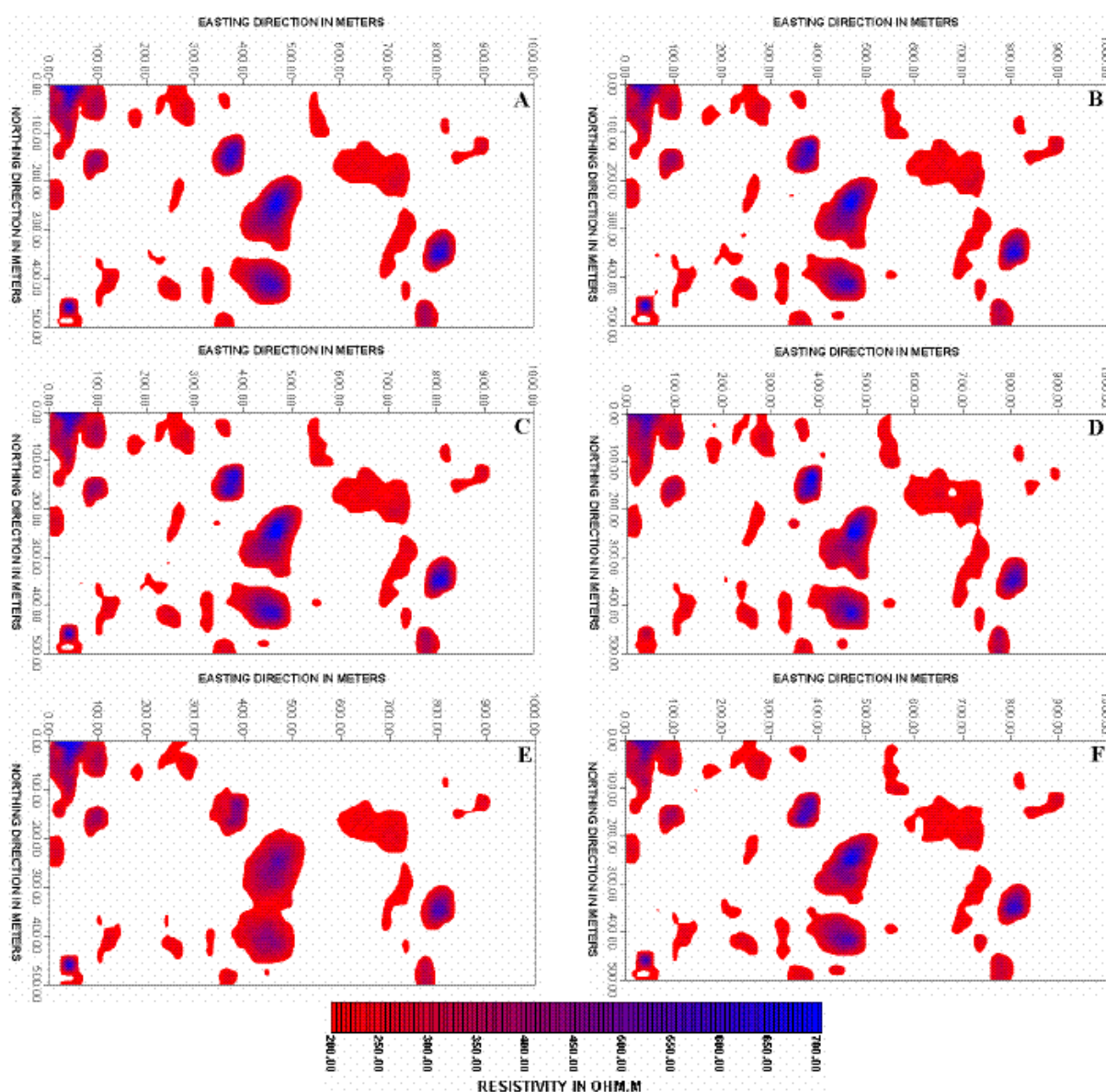


Fig. 7. The output map of the disturbed phosphate zones using different interpolation methods. (A: inverse, B: Triangulation, C: Kriging, D: Minimum Curvature, E: Shepard, F: Radial Basis Functions).

References

- Franke, R.: Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods, *Mathematics of Computations*, 1982, 33(157):181.
- Franke, R, Nielson, G.: Smooth Interpolation of Large Sets of Scattered Data, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1980,15(2):1691.
- Cressie, Noel A. C.: Statistics for Spatial Data, *New York: John Wiley & Sons*. 900 pp. 1991.
- Swan, A.R.H., Sandilands, M.: Introduction to Geological Data Analysis, *Oxford: Blackwell Science, Ltd.*, 446 pp., 1995.
- Davis, J. C.: Statistics and Data Analysis in Geology, *John Wiley and Sons*, pp. 383-403, 1986.
- Davis, J. C., McCullagh, M. J.: Display and Analysis of Spatial Data. *Bristol, Great Britain: J. W. Arrowsmith Ltd.*, pp. 96-114, 1975.
- Chen, W., Wang, X., Zhong, T.: The structure of weighting coefficient matrices of harmonic differential quadrature and its applications, *Commun. Numer. Methods Engng.*, 12(1996), 455-460.
- Fasshauer, G., Schumaker, L.: Scattered Data Fitting on the Sphere. In *Mathematical Methods for Curves and Surfaces II*, (M.Daehlen, T. Lyche, and L. L. Schumaker) eds. *Vanderbilt University Press*, 1998, 117-166.
- Brown, J. L.: Natural neighbor interpolation on the sphere, in *Wavelets, Images, and Surface Fitting*, P.J. Laurent, A. Le Mehaute, and L. L. Schumaker eds., A K Peters, Wellesley, MA, 67-74, 1994.
- Okabe, A., Boots, and K. Sugihara: Spatial Tessellations, *Wiley*, 532 pp, 1992.
- Renka, R. J.: Interpolation of data on the surface of a sphere, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 10, 417-436, 1984.
- Watson, D. F.: Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data, *Pergamon Press*, 321 pp., 1992.
- Briggs, I.C.: Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39:39-48, 1974.
- Lam, N. S.: Spatial interpolation methods review. *The American Cartographer* 10: 129-149, 1983.
- Lawson, C.L.: Generation of a triangular grid with application to contour plotting. *Tech. Memo. 299, Sect. 914, Jet Propulsion Lab., Caltech, Pasadena, California*, 1972.
- Montefusco, L.B., Casciola, G.: C1 surface interpolation. *ACM Transactions on Mathematical Software* 15: 365-374, 1989.
- Watson, D. F., Philip, G. M: A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing* 2: 315- 327, 1985.
- El Abbas, T., Jallouli, C., Albouy, Y. and Diamant, M.: A comparison of surface fitting algorithms for geophysical data. *Terra-Nova*, Vol. 2, N° 5, pp. 467-475, 1990.
- Smith, W. H. F., Wessel, P.: Gridding with continuous curvature splines in tension., *Geophysics*, Vol. 55, N°3, pp. 293-305, 1990.
- Shepard, D.: A two-dimensional interpolating function for irregularly spaced data. *Proc. ACM. nat. Conf.*, 517-524, 1968.
- Hardy, R. L.: Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *J. Geophys. Res.*, 76: 1905-1915, 1971.
- Powell, M. J. D.: The theory of radial basis function approximation in 1990. *Advances in Numerical Analysis, Vol II, W. Light (ed.)*, Oxford Science Publications, 1992.
- Gordon, W. J., Wixom, J. A: Shepard's Method of metric interpolation to bivariate and multivariate data. *Mathematics of Computation*, 32(141): 253-264, 1978.
- Shepard, D.: A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In *Proceedings of 23rd National Conference (New York, 1968)*, ACM, PP 517-523.
- Lancaster, P., Salkauskas, K.: Curve and Surface Fitting; An Introduction. *Academic Press LTD*, 24-28, London, NW17Dx, Third Edition, 1990.



**DENOISING RESISTIVITY PHOSPHATE “DISTURBANCES” USING
HAAR MOTHER WAVELET
TRANSFORM (SIDI CHENNANE, MOROCCO)**

Saad Bakkali¹ and Mahacine Amrani²

*¹Earth Sciences Department Geosciences & Environment Group
Faculty of Sciences and Techniques, Abdelmalek Essaadi University, Tangier, Morocco
saad.bakkali@menara.ma*

*²Engineering Process Department
Faculty of Sciences and Techniques, Abdelmalek Essaadi University, Tangier, Morocco
amrani.mahacine@menara.ma*

Abstract

Wavelet transforms originated in geophysics in the early 1980s for the analysis of seismic signals. Since then, significant mathematical advances in wavelet theory have enabled a suite of applications in diverse fields. In geophysics, the power of wavelets for analysis of non stationary processes that contain multiscale features, detection of singularities, analysis of transient phenomena, fractal and multifractal processes, and signal compression is now being exploited for the study of several processes including resistivity surveys. The present paper deals with denoising Moroccan phosphate “disturbances” resistivity data? map using the Haar wavelet mother transform method. The results show a significant suppression of noise and a very good smoothing and recovery of resistivity anomalies.

Key words: resistivity, phosphate, disturbance, Haar, wavelet, Sidi Chennane, Morocco.

Resumen

La transformada Wavelet tuvo sus orígenes a inicios de los 80's en el análisis de señales sísmicas, que debido a avances matemáticos significativos han permitido su aplicación a diversos campos. La energía de la ondícula; usada en el análisis de procesos no estacionarios con rasgos de múltiples escalas, detecciones de singularidades, análisis de fenómenos transientes, procesos fractales y multifractales, y compresión de señales, es aplicada a diferentes procesos incluyendo sondeos de resistividad. Este artículo muestra la atenuación del ruido en el mapa

Manuscript received April 7, 2008.

Accepted for publication June 2, 2008.

de perturbaciones de resistividad en los Fosfatos Marroquíes mediante el uso de la ondícula Haar en la transformada Wavelet. Los resultados indican una atenuación significativa del ruido, un buen suavizado y recuperación de las anomalías de resistividad.

Palabras clave: Resistividad, fosfato, perturbaciones, Haar, ondícula, Sidi Chennane, Marrueco.

Introduction

Geophysical Data are often contaminated with noise and artifacts coming from various sources. The presence of noise in data distorts the characteristics of the geophysical signal resulting in poor quality of any subsequent processing. Consequently the first step in any processing of such geophysical data is the “cleaning up” of the noise in a way that preserves the signal sharp variations. Wavelet transforms are relatively recent developments that have fascinated the scientific, engineering, and mathematics community with their versatile applicability. For geophysical processes, in particular, tools that offer the ability to examine the variability of a process at different scales are especially important. Wavelet analysis is an emerging field of applied mathematics that has provided new tools and algorithms for solving such problems as are encountered in fault diagnosis, modelling, identification, and control and optimization (Kumar *et al.*, 1994). The theory has acquired the status of a unifying theory underlying many of the methods used in physics and signal processing. The decision as to which representation (expansion) to use for a signal, for example wavelet expansion versus Fourier or spline expansion depends on the purpose of the analysis. Wavelets have become increasingly popular for analyzing data in the geosciences. Wavelets re-express data collected over a time span or spatial region such that variations over temporal/spatial scales are summarized in wavelet coefficients. Individual coefficients depend upon both a scale and a temporal/spatial location, so wavelets are ideal for analyzing geo-systems with interacting scales (Riedi, 1998). So, the wavelet transform filtering method has become a powerful signal and image processing tool which has found applications in

many scientific areas. This method is a widely used technique that is applicable to the filtering geophysical data (Kumar *et al.*, 1997).

The present paper deals with denoising Moroccan phosphate “disturbances” resistivity data map using the Haar mother wavelet transform method. (include Reference) The results show a high significant suppression of the noise and a very good smoothing and recovery of the resistivity anomalies signal. So the Haar wavelet mother transform processing is thought to be a good method to geophysical anomaly filtering and optimizing estimation of phosphate reserves.

The geophysical context

Resistivity is an excellent parameter and marker for distinguishing between different types and degree of alteration of rocks. Resistivity surveys have long been successfully used by geophysicists and engineering geologists and the procedures are well established. (include Reference) The study area is the Oulad Abdoun phosphate basin which contain the Sidi Chennane deposit. The Sidi Chennane deposit is sedimentary and contains several distinct phosphate-bearing layers. These layers are found in contact with alternating layers of calcareous and argillaceous hardpan. However, the new deposit contains many inclusions or lenses of extremely tough hardpan locally known as “*derangements*” or “disturbances” (figure 1), found throughout the phosphate-bearing sequence (Kchikach *et al.*, 2002). The hardpan pockets are normally detected only at the time of drilling. Direct exploration methods such as well logging or surface geology are not particularly effective. They interfere with field operations and introduce a severe bias in the estimates of phosphate reserves (figure 2).



* Phosphate “Disturbance”.

The study area was selected for its representativity and the resistivity profiles were designed to contain both disturbed and enriched areas. The sections were calibrated by using vertical electrical soundings. High values of apparent resistivity were encountered due to the presence of near-vertical faulting between areas of contrasting resistivity, and fault zones which may contain more or less highly conducting fault gouge. The gouge may contain gravel pockets or alluvial material in a clay matrix. Such anomalous sections are also classified as *disturbances*. Apparent resistivity values in these profiles locally exceeded $200 \Omega \cdot \text{m}$. (Bakkali, 2005; Bakkali *et al.*, 2006).

The apparent resistivity map (figure 3) obtained from a further survey was considered in fact a map of discrete potentials on the free surface, and any major singularity in the apparent resistivities due to the presence of a perturbation will be due to the crossing from a “normal” into a “perturbed” area or vice versa. In other words, the apparent resistivity map may be considered a map of scalar potential differences assumed to be harmonic everywhere except over the perturbed areas. Interpretation of resistivity anomalies is the process of extracting information on the position and composition of a target mineral body in the ground. In

the present case the targets were the inclusions called perturbations. The amplitude of an anomaly may be assumed to be proportional to the volume of a target body and to the resistivity contrast with the mother lode. If the body has the same resistivity as the mother lode no anomaly will be detected. Thus assumed in fact and in first approach that the resistivity anomalies would be representative of the local density contrast between the disturbances and the mother lode. Level disturbance of the anomalous zones is proportionnal to resistivity intensity (figure 4). (Bakkali, 2005; Bakkali, 2006). 2006 (1)? 2006 (2)?

The wavelet analysis approach

The wavelet transform is a time-frequency decomposition which links a time (or space) domain function to its time-scale wavelet domain representation. The concept of scale is broadly related to frequency. Small scales relate to short duration, high frequency features and correspondingly, large scales relate to long duration, low frequency features (Daubechies, 1990). Wavelets are functions that satisfy certain mathematical requirements and are used in representing data or other function. In the signal analysis framework, the wavelet transform of the time (or

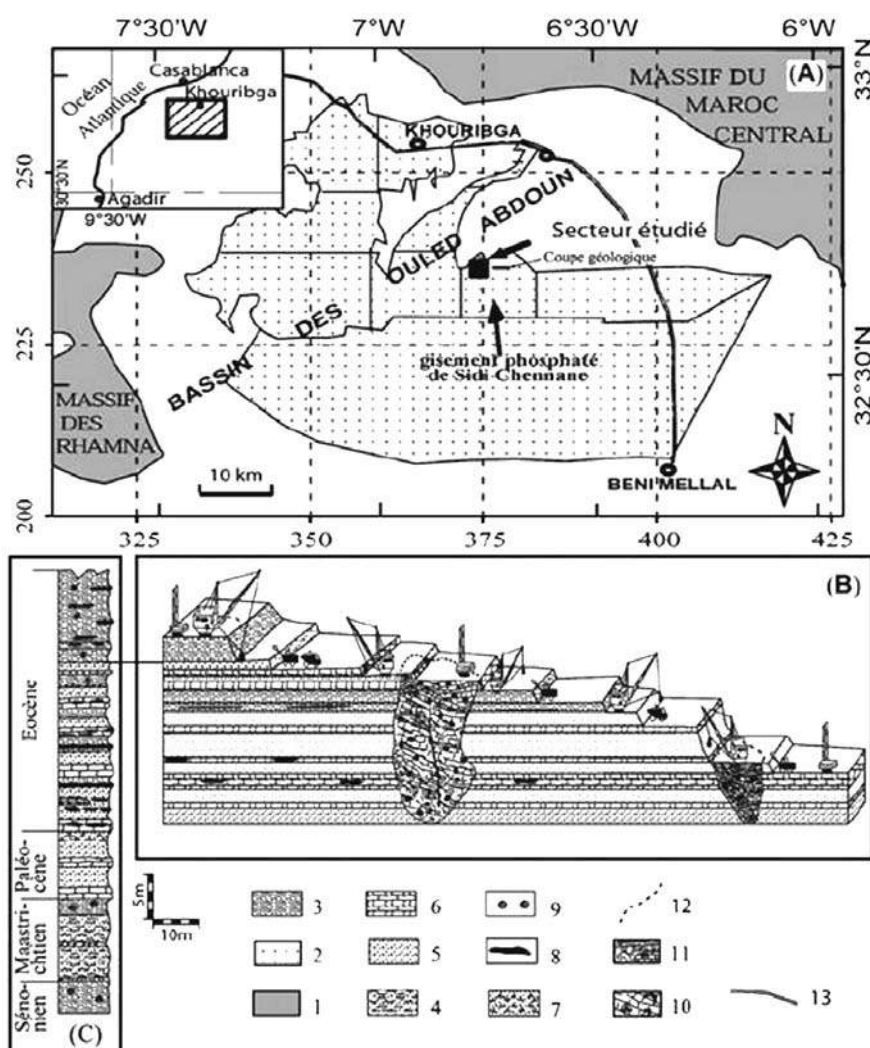


Figure 2: (A) Location of the studied area in the sedimentary basin of Ouled Abdoun. (B) Section showing the disruption of the exploitation caused by disturbances. (C) Stratigraphical log of the phosphatic series of Sidi Chennane: (1) Hercynian massif; (2) phosphatic areas; (3) marls; (4) phosphatic;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

space) varying signal depends on the scale that is related to frequency and time (or space) (Daubechies *et al.*, 1992). The 2D wavelet method provides information on many more resolution than the former method. It is a powerful tool particularly suitable in denoising, filtering and analyzing problems and potential singularities in geophysical context (Foufoula-Georgiou *et al.*, 1994) (Grossmann *et al.*, 1989). Moreover this property is crucial for perform-

ing an efficient denoising resistivity anomaly map of the Moroccan phosphate deposit "disturbances".

Theoretical review

Traditionally, Fourier transform has been used to process stationary signals acquired by computers. In this way, the representative spectrum of frequencies is obtained from the time series produced during ac-

quisition of the signal by the computer. For non stationary signals, typical of engineering processes, the existing methodologies have not been fully developed. Windowed Fourier transform, also called short-time Fourier Transform, was first applied using a Gaussian type window (Walker, 1997). For a given signal $f(t)$, a conventionally defined signal $g(t - t_0)$ is applied to a window of time that moves along with the original signal, forming a new family of functions: $fg(t_0, t) = f(t)g(t - t_0)$. Functions formed this way are centred on and have a duration defined by the characteristic time window of the function $g(t)$. Windowed Fourier transform is thus defined as:

$$F_g[w, t_0] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t - t_0)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

This transform is calculated for all t_0 values and it gives a representation of the signal $f(t)$ in the time frequency domain. If a space function $f(x)$ instead of a time signal, is considered, a representa-

tion is given in the space- frequency domain (Meyer, 1993). However as a windowed Fourier transform represents a signal by the sum of its sine and cosine functions, it restricts the flexibility of the function $g(t - t_0)$ or $g(x - x_0)$ making a characterization of a signal and simultaneous location of its high frequency and low frequency components difficult in the time-frequency domain or the space-frequency domain. Wavelets transform were developed to overcome this deficiency of windowed Fourier Transform in representing non-stationary signals. Wavelets transform is obtained from a signal by dilatation-contraction and by the translation of a special wavelet within the time or space domain. The expansion of this signal into wavelets thus permits the signal's local transient behaviour to be captured, while the sine and the cosines can only capture the overall behaviour of the signal as they always oscillate indefinitely (Walker, 1997).

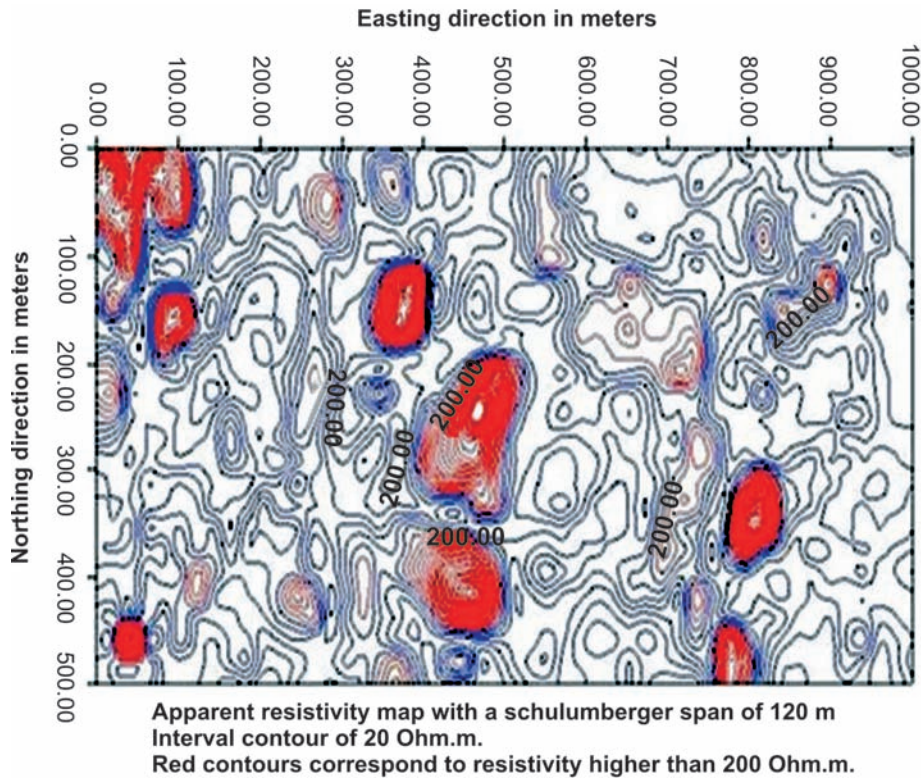


Figure 3: A map of resistivity anomalies for AB=120 m using Shepard's method for resistivity data Excentrility?

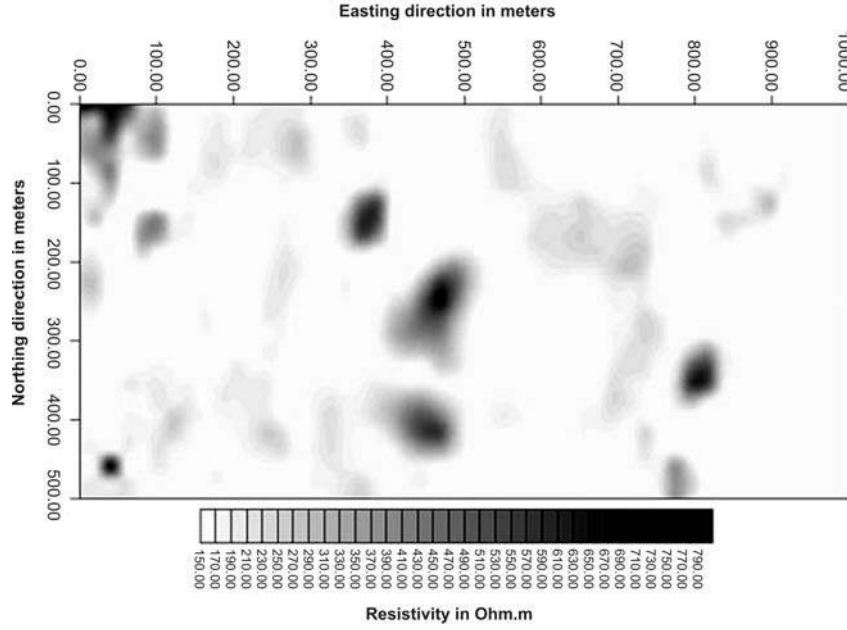


Figure 4: A map of the disturbed noisy phosphate zones corresponding to figure 3.

Signal analysis and the Haar wavelet mother

In the Fourier analysis, every periodic function having a period of 2π and an integrable square is generated by an overlay of exponential complexes, $W_n(x) = e^{inx}$, $n = 9, \pm 1, \pm 2, \dots$ obtained by dilations of the function $W(x) = e^{ix}$: $W_n(x) = W(nx)$. Extending the idea to space for Ψ integrable square functions, the following is defined :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

The function Ψ is called a mother wavelet, where a is the scale factor and b is the translation parameter. The family of simpler wavelets, which will be adopted in the present work, is that the Haar wavelet :

$$\begin{aligned} \psi(x) &= 1 \text{ if } 0 \leq x \leq \frac{1}{2}, \psi(x) = \\ &= -1 \text{ if } \frac{1}{2} \leq x \leq 1, \psi(x) = 0 \text{ if } x \notin [0,1] \end{aligned}$$

For the one-dimensional no stationary function $f(x)$ that decrease to zero when $x \rightarrow \infty$, the following assumption is normally adopted :

$$\psi_{p,q}(x) = 2^{\frac{-p}{2}} \psi(2^p x - q) \quad (3)$$

The scale factor of $2^p q$ is called the localization or dyadic translation and k is the translation index associated with the localization, where p and $q \in Z$ (Meyer, 1982) proved that wavelet thus defined are orthogonal, i.e., $\langle \psi_{p,q} \cdot \psi_{l,m} \rangle = \delta_{p,l} \delta_{q,m}$ for $p, q, l, m \in Z$ where $\langle \cdot \rangle$ is equal to the scalar product and δ refer to the delta function of Dirac. Thus the function $f(x)$ can be rewritten as follows :

$$f(x) = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} c_{p,q} \psi_{p,q}(x) \quad (4)$$

The values of the constant $c_{p,q}$ are obtained by wavelet transform in its discrete form. Then is expanded into a series of wavelets with their coefficients obtained from

$$c_{p,q} = \langle f \cdot \psi_{p,q} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{p,q}(x) dx \quad (5)$$

The wavelet transform can also be calculated using special filters called Quadrature Mirror filters (Mallat, 1989). They are defined as a low-pass filter, associated with the coarser scale, and a high-pass filter to characterize the details of the signal. The signal $f(x)$ then is described as:

$$f(x) = \sum_q c_{p_0,q} \Psi_{p_0,q}(x) + \sum_{p>p_0} \sum_q d_{p,q} \Psi_{p,q}(x) \quad (6)$$

$$\text{where } c_{p_0,q} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Phi_{p_0,q}(x) dx \quad (7)$$

$$\text{and } d_{p,q} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi_{p,q}(x) dx \quad (8)$$

In the expansion of $f(x)$ by equation 6, the first term represents the approximation of the signal and the second the signal details, filtered by the approximation. The function $\Phi_{p_0,q}(x)$ is denominated a scale function or *father wavelet*, and it is responsible for obtaining the approximation of the signal, while the mother wavelets, $\Psi_{p,q}$ are responsible for the generation of the details filtered by the approximation (Polikar, 1999) (Wickerhauser, 1994). For the family of Haar wavelets, the scale function is $\Phi_{p_0,q}(x) = 1$ if $x \in [0,1]$ and $\Phi_{p_0,q}(x) = 0$ if $x \notin [0,1]$. The mother wavelets, responsible for the details in the Haar family, are expressed as:

$$\Psi_{p,q}(x) = 2^{\frac{p}{2}}, \text{ if } 2^{-p} \leq x \leq 2^{-p} \left(q + \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

$$\Psi_{p,q}(x) = -2^{\frac{p}{2}}, \text{ if } 2^{-p} \left(q + \frac{1}{2} \right) \leq x \leq 2^{-p} (q+1) \quad (10)$$

and $\Psi_{p,q}(x) = 0$, otherwise.

The processing data

The resistivity data base is a compilation of 51 traverses at a spacing of 20 m. There were 101 stations at 5 m distance for every traverse, which makes 5151 stations all together in the resistivity survey. We choose the Haar wavelet basis for its smoothness and compact support (Torrence *et al.*, 1998). We calculated the magnitude square of the Haar wavelet transform coefficients (Rioul *et al.*, 1991) using Origin

Pro 8 routine (Origin Pro, 2007) for each resistivity traverse (figure 5). Then we deferred all the results to built a 2D wavelet spectrum regular maps which represent in fact filtering and denoising map of the phosphate deposit “disturbances”. Since a major potential application of wavelets is in image processing, the 2D wavelet transform is a necessity to be applied as a detector and analyser of singularities like edges, contours or corners (Ucan *et al.*, 2000). (Tsivouraki-Papafotiou *et al.*, 2005).

Results & conclusions

Figure 6 represents an indicator of the level of variation of the contrast of density between the disturbances and the normal phosphate-bearing rock. The surface modeling of resistivity anomalies is obtained by AutoSignal routine from our apparent resistivity survey transformed data obtained using the Haar wavelet mother response. These procedure enables us to define the surface phosphate disturbed zones. The Haar wavelet analysis surface of phosphate deposit disturbance zones modeling as obtained by the above procedure in the study area provided a direct image for an interpretation of the resistivity survey. These method enable us to identify the anomalies area which turned out to be strongly correlated with the disturbances. The use of magnitude square of the Haar mother wavelet transform represent an effective filtering method which makes it possible to attenuate considerably the noise represented by the minor dispersed and random disturbances. The overall effect is that of scanning and denoising the anomalous bodies. Comparatively to classical approaches used in filtering and denoising the same geophysical data map (Bakkali, 2007), the advantage of the Haar wavelet transform method is doesn't introduce significant distortion to the shape of the original resistivity signal.

The Haar wavelet output of the apparent resistivity which correspond to the wavelet output of the anomalous phosphate deposit map obtained from such a technical tool represent the crossing dominate area from a “normal” into a “perturbed” area or vice versa. Moreover the level of disturbance is very clearly

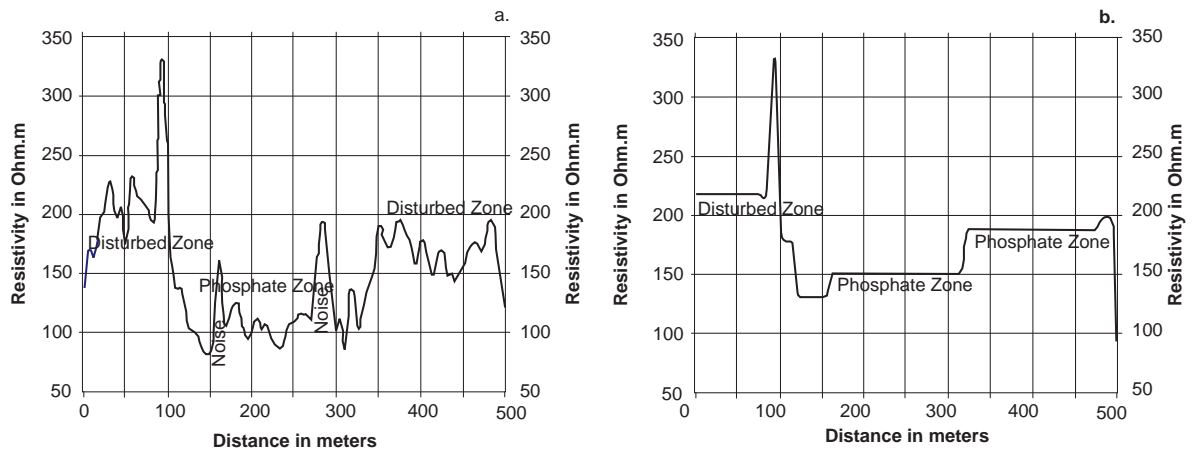


Figure 5: Example of real resistivity traverse data of the survey (A) and the corresponding Haar wavelet transform denoised output (B).

shown. The proposed filtering and denoising method using Haar wavelet transform tends to give a real estimation of the surface of the phosphate deposit “disturbances” zones with a significant suppression of the noise. The level disturbance resulting from such method is also more defined in all the disturbed zones.

We have described an analytical procedure to analyze the anomalies of a specific problem in the phosphate mining industry. The results proved satisfying. Data processing procedures as the Haar wavelet mother response transform of resistivity data map was found to be consistently useful and the corresponding map may be used as auxiliary tools for decision making under field conditions.

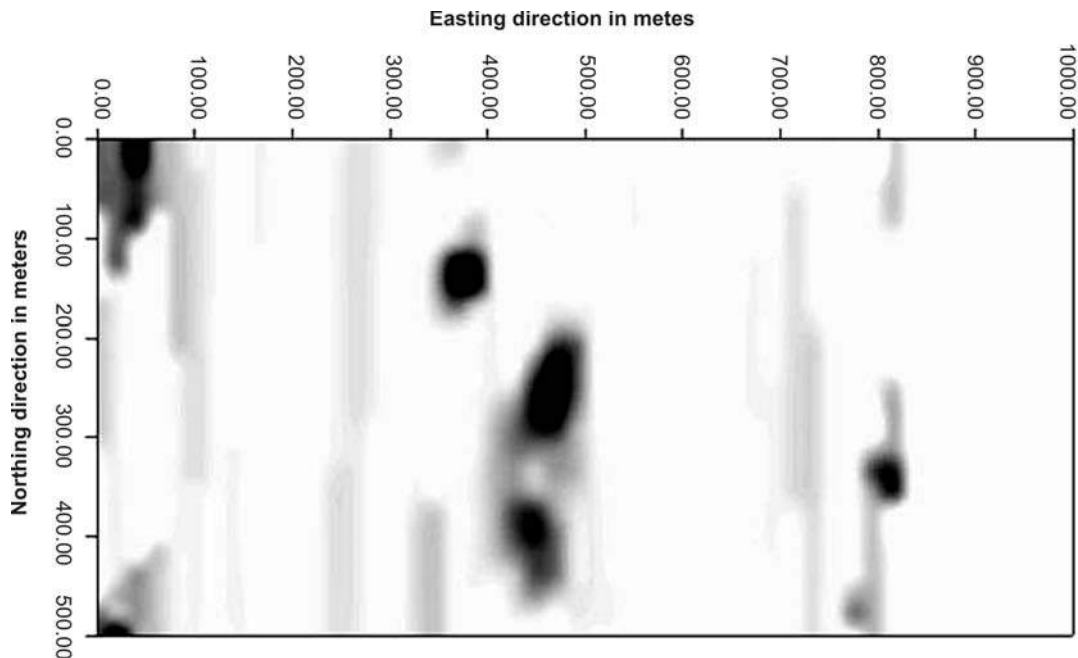


Figure 6: Wavelet output of the phosphate deposit “disturbances” map given in figure 4.

References

- 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, p123-131.
- Bakkali, S., (2006). A resistivity survey of phosphate deposits containing hardpan pockets in Oulad Abdoun, Morocco, *Geofisica Internacional*, 45 (1), p73-82.
- Bakkali, S. and 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, p1-10.
- Bakkali, S., (2007). Enhancement of edges of Sidi Chennane phosphate “disturbances” using sunshading responses of resistivity data, *Russian Geology and Geophysics*, RGG, 48 (9), 775–781.
- Daubechies, I., (1992). *Ten Lectures on Wavelets*, 357 pp., Soc. for Ind. and Appl. Math., Philadelphia, Pa.
- Daubechies, I., Mallat, S. and A. S. Willsky., (1992). Introduction to the special issue on wavelet transforms and multiresolution signal analysis, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 38(2), 529–531.
- Daubechies, I., (1990). The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 36(5), 961–1005.
- Foufoula-Georgiou, E., and P. Kumar., (1994). *Wavelets in Geophysics*, Academic, San Diego, Calif., 384 pp.
- Grossmann, A., Kronland-Martinet, R. and J. Morlet., (1989). Reading and understanding continuous wavelet transforms, in *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*, edited by J. Combes, A. Grossmann and P. Tchamitchian, 2–20, Springer-Verlag, New York.
- Kchikach, A., Jaffal, M., Aifa, T. and L. Bahi., (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.
- Kumar, P., and E. Foufoula-Georgiou., (1994). Wavelet analysis in geophysics: An introduction, in *Wavelets in Geophysics*, edited by E. Foufoula-Georgiou and P. Kumar, Academic, San Diego, Calif. 1–43.
- Kumar, P. and E. Foufoula-Georgiou., (1997). Wavelet analysis for geophysical applications, *AGU, Reviews of Geophysics*, 35, 4, 385–412.
- Mallat, M., (1989). A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation, *IEEE Trans. on PAMI*, 11(7), 674-693.
- Meyer, Y., (1992). *Wavelets and Operators*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Meyer, Y., (1993). Review of *An Introduction to Wavelets* by C. K. Chui and *Ten Lectures on Wavelets* by I. Daubechies, *Bull. Am. Math. Soc.*, 28(2), 350–360.
- Origin Pro 8 (2007). About Origin Pro 8 SRO,V8.0724 software, Copyright 1991-2007, Origin Lab Corporation, www.originlab.com.
- Polikar, P., (1999). The Engineer’s Ultimate Guide to Wavelet Analysis , The Wavelet Tutorial, <http://engineering.rowan.edu/~polikar>.
- Riedi, R.H., (1998). Multifractals and Wavelets: A potential tool in Geophysics, SEG meeting 1998, Technical Session on Novel Transforms, New Orleans, LA, September 1998.
- Rioul, O., and M. Vetterli., (1991). Wavelets and signal processing, *IEEE Signal Process. Mag*, 8(4), 14–38.
- Systat (2002). About AutoSignal V1.6 software, Copyright 2002 AISN Software Inc.
- Torrence, Ch. and G.P. Compo., (1998). A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78.
- Tsivouraki-Papafotiou, B., Tsokas, G.N. and P. Tsurlos. (2005). Wavelet denoising of magnetic

- prospecting data, Journal. Balkan Geophysical Society, Vol 8, 2, 28-36.
- Ucan, O.N., Seker, S., Abora A.M and A. Ozmen, A., (2000). Separation of magnetic fields in geophysical studies using a 2-D multiresolution wavelet analysis approach. Journal. Balkan Geophysical Society, Vol 3, 3, 53-58.
- Walker, J.S., (1997). Fourier Analysis and Wavelet Analysis, Notices of the AMS, Vol 44, 6, 658-670.
- Wickerhauser, M. V., (1994). Adapted Wavelet Analysis From Theory to Software, 486 pp.

« 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.

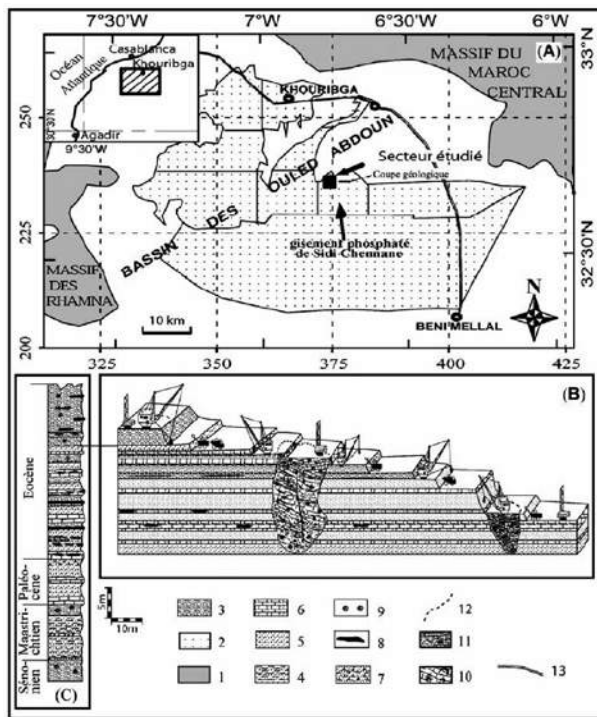
INTRODUCTION

La résistivité 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 Ωm .

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

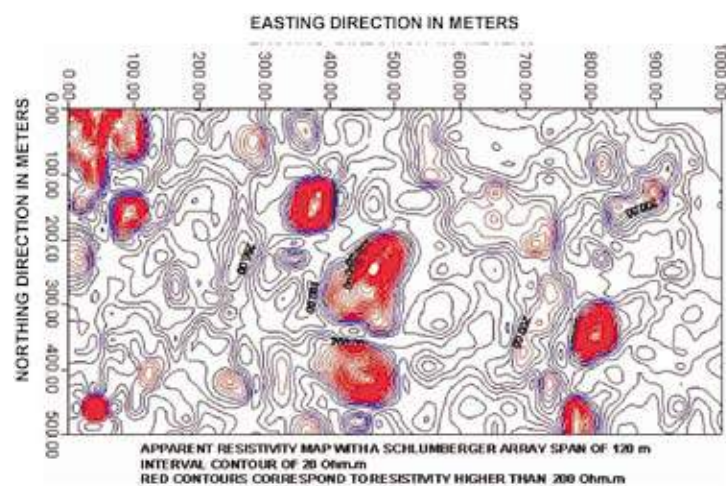


Figure 3. Carte des résistivités apparentes de la zone d'étude

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

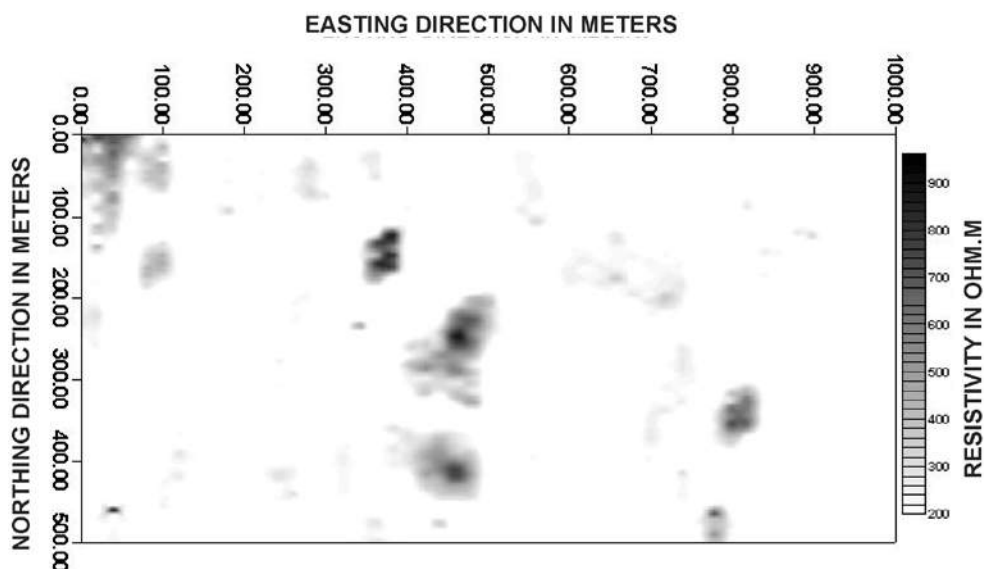


Figure 4. Carte des zones «dérangées» correspondante à la figure 3

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:

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

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:

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

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:

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

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

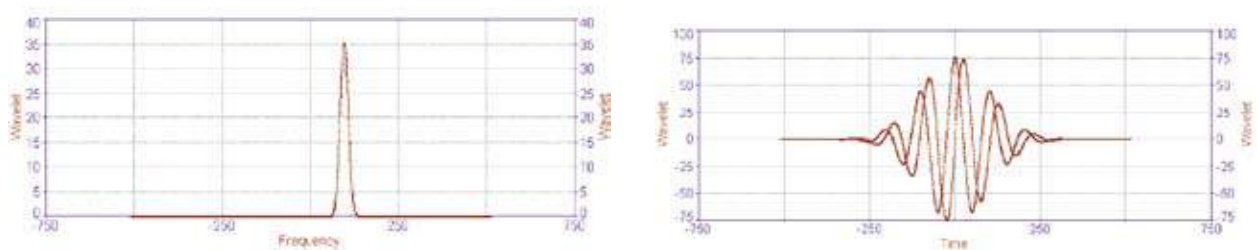


Figure 5. Réponses en temps et en fréquence de l'« ondelette mère » Morlet



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.

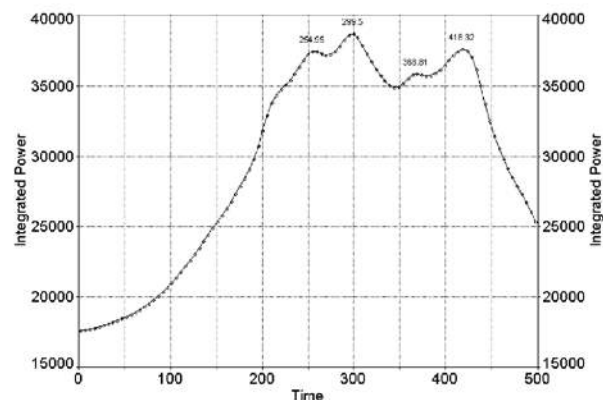
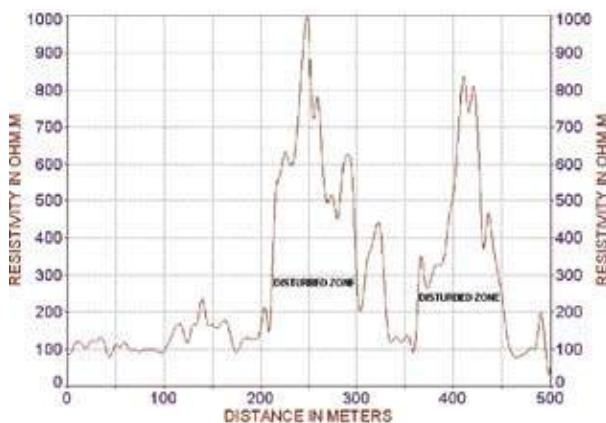


Figure 6. Exemple d'un profil de traîné électrique et sa réponse par transformée en ondelette analysante de type Morlet

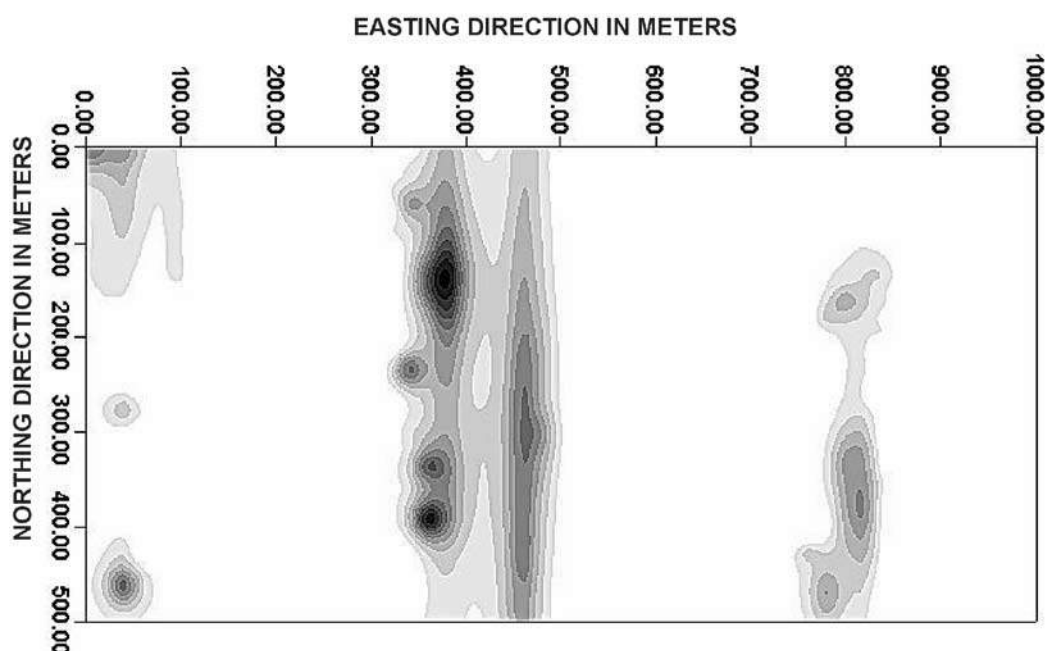


Figure 7. Réponse par transformée en ondelette analysante de la carte des "dérangements" de la figure 4

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 anormales 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.



Environmental and Engineering Geophysical Society

1720 South Bellaire, Suite 110
Denver, CO 80222-4303
303-531-7517 · Fax 303-820-3844
staff@eegs.org

Saad Bakkali
Prof.Eng
Faculty of Sciences & Techniques
P.O Box 416 Tangier Morocco

E-mail: saad.bakkali@gmail.com
Date of Birth: 08/02/1965
Place of Birth: Casablanca (Morocco)
Passport Expiration Date: 18/08/2013
Additional Information:
Passport N° P510484

Sep 07, 2008

Dear Saad Bakkali,

The Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS) is pleased to extend an **Official Letter of Invitation** to you to attend the 2008 Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP) to be held March 29-April 2, 2009 in Fort Worth, TX, USA.

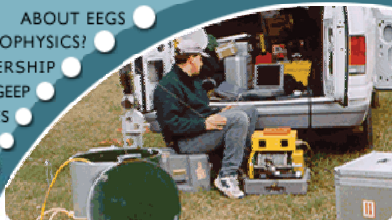
For the past 21 years EEGS has sponsored SAGEEP to bring together industry professionals from around the world to learn the latest applications and techniques to better serve the world we live in. The wide-ranging technical program includes hundreds of formal presentations by individual speakers, workshops and continuing education short courses. More than 40 companies will display their newest geophysical equipment and techniques in the accompanying exhibition.

We understand that you will bear all of the expenses related to your visit.

We look forward to your attendance at this important meeting.

Sincerely,

Doug Laymon
SAGEEP 2009 General Chair

[ABOUT EEGS](#)[WHAT IS GEOPHYSICS?](#)[MEMBERSHIP](#)[ANNUAL MEETING/SAGEEP](#)[FASTTIMES](#)[EEGS STORE](#)[JOURNAL OF
ENVIRONMENTAL AND
ENGINEERING
GEOPHYSICS \(JEEG\)](#)

SAGEEP Proceedings

[< Return to the Home Page](#)

SAGEEP Proceedings

2009

Title	Authors	Pages
3-D MASW	Park, Choon, Carnevale, Mario	
A Challenging GPR Investigation to Assess the State of Damage of a Water Tunnel	Munda, Stefano, Zanzi, Luigi , Arosio, Diego	
A Decade of Lessons Learned at a Geophysical Test Site	Sauck, William	
A Geoarcheological Investigation in Medieval Coastal Dunes using Ground-Penetrating Radar	Bakker, Marcel, Vos, Peter, de Vries, Sieb, Doornenbal, Pieter	
A Geophysical Investigation of a Deep Tunnel Rock Bore in Nottingham, UK	Beetham, Paul , Hutchison, Robert	
A New Approach to Predict Hydrogeological Parameters Using Shear Waves from Multichannel Analysis of Surface Waves Method	Cameron, Antonio, Knapp, Camelia	
A New High Resolution Magnetic Gradient Survey for Kimberlites	Gamey, T. Jeffrey, Norton, Jeannemarie, Lockhart, Grant	
A New Method for Statics Corrections: A Tomographic Approach	Mayer, Lindsay, Miller, Richard, Ivanov, Julian, Weis, Thomas, Anderson, Bob Anderson, Newmont Gold, Denver, CO	
A non conventional approach for down-hole data analysis and interpretation	Rainone, Mario Luigi, Pizzica, Fabio, Torrese, Patrizio, Signanini, Patrizio	
A Real-Time, Automated SP Array for Rapid Detection of High Volume Ground-water Inflow into an Active Carbonate Quarry	Crist, W. Konrad, Carr, Bradley, Xianjin, Yang	
A trade-off solution of regularized geophysical inversion using model resolution and covariance matrices	Xia, Jianghai , Xu, Yixian, Miller, Richard, Zeng, Chong	
ANALYSIS OF VARIABLES FOR DETECTION OF MEC IN DIVERSE ENVIRONMENTS AND CONDITIONS	Wagner, Harry, Hall, Darrell, Brunette, Brian, Perry, Richard	
Application of ERT to Leakage Investigation: A Case Study at the Shin-Shan Earth Dam	Lin, Chih-Ping, Hung, Yin-Chun , Yu, Zen-Hung	
Application of Magnetic Susceptibility for Wetlands Delineation	Lobred, Anthony, Simms, Janet	
Application of Microgravity at Archaeological Sites in Israel: Some Estimation Derived from 3-D Modeling and Quantitative Analysis of Gravity Field	Eppelbaum, Lev	
Application of Near-Surface Geophysical Methods to Assess Subsurface Drainage System and Soil Property Differences Between Replicated Agricultural Test Plots	Allred, Barry, Clevenger, Bruce, Saraswat, Dharmendra	

APPLICATION OF THE MEAN TRAVELTIME CURVES TO GPR AND VSP DATA

Fernandez Martinez, Juan Luis , Pedruelo González, Luis Mariano, Deparis, Jacques James , Mangriotis, Maria Daphne, Rector, James W.

APPLICATIONS OF GEOPHYSICS TO ARCHAEOLOGY: MAGNETIC AND GROUND-PENETRATING RADAR INVESTIGATION AT HATSHEPSUT TEMPLE, LUXOR, EGYPT

Odah, Hatem, Ismail, Ahmed, Elhemaly, Ibrahim, Abbas, Abbas, Shaaban, Fathy

Assessment of electrical resistivity method to map groundwater seepage zones in heterogeneous sediments.

Gagliano, Michael, Nyquist, Jonathan, Toran, Laura, Rosenberry, Donald

Attenuation Measurements Using Array-Based Surface Wave Tests with Frequency-Wavenumber Estimation Method

Yoon, Sungsoo, Rix, Glenn

Automatic Localization of Acoustic Sensors

Bernasconi, Giancarlo, Rovetta, Diego

Bridge Deck Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR)

Wamweya, Amos, Torgashov, Evgeniy, Kovin, Oleg, Anderson, Neil

Broadband Finite Difference Time Domain Modeling

Daniels, Jeffrey, Lee, Robert, Yi, YuChan, Ortega, Ruben, Shalek, Kyle

Characteristics of Lightning-induced Magnetic Anomalies in Low-altitude Aeromagnetic Data

Beard, Les, Norton, Jeannemarie, Sheehan, Jabob

Characterization of solid waste in a bioreactor landfill using seismic borehole methods

Glancy, Taryn, Samson, Claire , Van Geel, Paul

Coincident ERI and GPR surveys in epikarst terrains: do they complement each other?

Young, Roger A., Halihan, Todd, Sample, Michael , Davogustto, Oswald

Combined Use of Frequency-Domain Electromagnetic and Electrical Resistivity Surveys to Delineate the Freshwater/Saltwater Interface near Saline Lakes in the Nebraska Sand Hills

Ong, John, White, Eric , Lane, Jr., John, Zlontik, Vitaly

Correlating Helicopter EM, CPTs and Borings for Levee Foundation Studies in California.

Amine, Dima, Hodges, Greg, Woldringh, Bob

Current Applications of GPR in Forest Research

Butnor, John, Johnsen, Kurt, Samuelson, Lisa , Pruyn, Michele

Deep Groundwater Exploration in the Flagstaff, Arizona Area using CSAMT

Carlson, Norman, Pellatz, Randy, Paski, Phillip

Delineation of fractures in granite from seismic attributes applied to 3D GPR data

Davogustto, Oswaldo, Young, Roger A., Cemen, Ibrahim

DENOISING RESISTIVITY PHOSPHATE DISTURBANCES USING HAAR MOTHER WAVELET TRANSFORM (SIDI CHENNANE, MOROCCO)

Bakkali, Saad, Amrani, Mahacine

Detailed Imaging of Near-surface Faulting Structure using Land Streamer

INAZAKI, Tomio

Detecting Tunnels and Underground Facilities Using Diffracted P-Waves

Walters, Shelby, Miller, Richard, Xia, Jianghai, Ivanov, Julian, Steeples, Don, Zeng, Chong

Detection of Ferro-Metallic Objects from Magnetic Data Using a Scaled Hopfield Neural Network

Salem, Ahmed, El.Tobely, Tarek, El-Kabbani, Ahmed, El Maksood, Ashraf, Soliman, Fouad

Determination of the Magnetic Viscosity for Cold-Rolled Carbon-Steel 55-Gallon Drums in Earth's Magnetic Field

Freed, Chad, Doherty, Edward, Bechtel, Timothy

Determining EMI Inversion Limits of UXO Survey Data with a Realistic Simulation of Sensor Noise, Sensor Platform Motion, and Survey Parameters

Barrow, Bruce, Miller, Jonathan, Steinhurst, Dan

Development of a New High Sensitivity Potassium MiniMag with Integrated GPS for Geophysical Mapping

Hrvoic, Ivan, Wilson, Mike, Lopez, Francisco

Development of Low Enthalpy Geothermal Resource at the Tattapani, India

Sharma, S. K.

SAGEEP 2011 POSTER SESSION MONDAY

8:30 – 4:30 pm Monday April 11, 2011

P01: Poster Session 1 – Chair: Moe Momayez – Exhibit Hall Prefunction Area

8:30 – 4:30 pm Monday April 11, 2011 P01: Poster Session 1 – Chair: Moe Momayez – Exhibit Hall Prefunction Area

1. **Police Cars Spatial Movements Modeling, Analysis and Presentation**
Anahid Bassiri, K.N.Toosi University; Pouria Amirian; Ali Bassiri
2. **True? 3D Acquisition Using GPR over Small Areas: A Cost Effective Solution**
Maurizio Lualdi, Politecnico di Milano
3. **An Integrated Geophysical Study to Characterize the Near-Surface of Barringer Meteorite Crater**
Soumya Roy, Robert Stewart, Arkadiusz Turolski, Susan Green, Li Chang, University of Houston
4. **Modelling Phosphates Disturbances Depth Using Analytical Signal Responses of Geoelectrical Resistivity Data (Sidi Chennane, Morocco)**
Saad Bakkali, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier
5. **Application of the Automatic Optimal Spline Smoothing Method to Optimizing Edges of Moroccan Bouguer Gravity Anomaly Map**
Saad Bakkali, Faculty of Sciences & Techniques, Tangier
6. **Application of Informational and Wavelet Approaches for Integrated Processing of Geophysical Data in Complex Environments**
Lev Eppelbaum, Dept. of Geophysics, Leonid Alperovich, Valery Zheludev, Alex Pechersky, Tel Aviv University
7. **Use of the Resolve Airborne Electromagnetic (AEM) Data In the Assessment of the Salinity Hazard and Risk to Iconic River and Wetland Ecosys tems, Murray River, SE Australia**
Ken Lawrie, Kok Tan, Larysa Halas, Ross C. Brodie, Heike Apps, Laura Gow, Geoscience Australia
8. **Analysis of the Deformation of the Odessa, TX Meteorite Crater Using Time-Domain Controlled-Source Electromagnetics**
Mark Hickey, Mark E. Everett, Dept. of Geology and Geophysics, Texas A&M University
9. **Integration of Surface and Borehole Geophysical Methods to Develop a Bedrock Model**
Mario Carnevale, Alex Buller, Jutta Hager, Hager GeoScience, Inc.
10. **GPR Imaging in the Range of 40 to 400Mhz Applied to the Knowledge of Internal Geological Structures of Coastal Dunes in Fortaleza City-Brazil**
Mariano Castelo Branco, Federal University of Ceará - Brazil
11. **The WARRP Program Package**
Uni K. Petersen, Jardfeingi
12. **Seismic Refraction Shootout: Using Ray-Based Tomographic Inversion**
Nedra Bonal, Leiph Preston, Sandia National Laboratories
13. **Technology-Assisted Shared-Teaching and Instruction: Impact on Student Learning and Attendance**
Moe Momayez, University of Arizona
14. **Packaged Case Studies and Spreadsheet-Based Modules for Teaching Geophysics to Students Without Access to Field Experiences**
Sarah Kruse, University of South Florida
15. **Application of Geophysical Methods to Locate Buried Tunnel Channels Beneath the Glacial Drift Deposits in Texas Township, Kalamazoo County, MI**
Arthur Obiadzie, Western Michigan University
16. **Satellite-Based In SAR Measurements: A New Approach to Groundwater Monitoring**
Jessica Reeves, Rosemary Knight, Howard Zebker, Stanford University
17. **Investigating Proglacial Wetland-Groundwater Systems with Ground Penetrating Radar in the Yanamarey and Quilcayhuanca Pampas, Cordillera Blanca, Peru**
Laura Maharaj; Jeffrey McKenzie, McGill University
18. **Automated Leak Detection of Buried Tanks using Geophysical Methods at the Hanford Nuclear Site**
Shawn Calendine, Dale Rucker, James Fink, Marc Levitt, hydroGEOPHYSICS
19. **Regional, Reconnaissance Scale AEM Surveys to Better Define Surface Water - Groundwater Processes Beneath Large Unregulated River Systems**
Andrew Fitzpatrick, Timothy Munday, Glenn Harrington, CSIRO; Louise Stelfox, Department of Environment and Conservation (Western Australia)
20. **A New Marine Acoustics Prospecting Instrument with the Advantage of Sub-Bottom Profiler And Shallow Seismic Reflection Method on River and Sea**
Zhong Shihang, China Academy of Railway Sciences
21. **Geoelectrical and Hydrogeological Modeling of The Fresh Water / Saline Water Interface in the Lower Florida Keys**
Albert Yeboah-Forson, Dean Whitman, Danielle Ogurrcak, Mike Sukop, Florida International University
22. **A Novel Approach for Continuous Monitoring of Diurnal and Seasonal Changes in Near-Surface Electrical Resistivity**
Kaya Diker, Remke Van Dam, Ajay Bhardwaj; Stephen Hamilton, William Johnson, Michigan State University