

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
(U.S.T.H.B.)

*Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie
et de l'Aménagement du Territoire*
(FSTGAT)

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

EN : SCIENCES DE LA TERRE

Spécialité : **Géophysique**

Par : Mlle **KHALDAOUI Fatma**

THEME

**Application des techniques de
prospection électrique à l'identification
des structures de sub-surface**

Soutenu publiquement le 29 / 09 / 2004, devant le jury composé de :

Mr. M. HAMOUDI	Professeur, (USTHB)	Président
Mr. M.A. BOUNIF	Maître de Conférence, (USTHB)	Directeur de Thèse
Mr. H.A. BAKER	Professeur, (USTHB)	Examineur
Mr. Med. DJEDDI	Maître de Conférence, (USTHB)	Examineur
Mr. A. BOUDELLA	Maître de Conférence, (USTHB)	Examineur
Mr. A. Ydri	Chargé de Cours, (USTHB)	Examineur

*A mes parents,
A tous ceux qui me sont proches.*

Remerciements

Cette partie, est la plus délicate à rédiger tant il est difficile de résumer en quelques mots les sentiments éprouvés pendant des années où j'ai pu apprendre beaucoup auprès de chaque contact scientifique.

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu, le grand puissant pour la volonté et le courage qu'il m'a donné tout le long de ce travail.

Je voudrais adresser mes plus sincères remerciements à Mr Bounif M.A, maître de conférence à l'USTHB pour la proposition et l'encadrement de ce sujet de thèse. Ainsi que pour ses orientations et ses critiques constructives. Ses corrections ont été essentielles pour la progression, l'aboutissement et l'amélioration de ce travail. Ceci m'a permis d'entreprendre de nombreuses expériences, surtout sur terrain, car celles-ci ont grandement contribué à l'enrichissement de cette thèse.

Je tiens à remercier le Professeur Hamoudi M. (USTHB) qui m'a honoré en acceptant de Présider le jury. Qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de mon profond respect.

J'adresse aussi mes remerciements au Professeur Baker H.A.(USTHB) pour m'avoir aidée et transmis les connaissances appropriées et d'avoir accepté de faire parti du jury.

Je tiens à remercier Docteur Djeddi Mohamed, maître de conférence à l'USTHB, qui m'a beaucoup aidé et donné de bons conseils, et surtout pour sa patience, qu'il trouve ici tout mon respect.

Je remercie Mr Boudella A. maître de Conférence à l'USTHB pour son soutien et son aide. C'est un honneur pour moi de vous compter parmi les membres du jury.

Je tiens à remercier Monsieur Ydri chargé de cours à l'USTHB de me faire l'honneur de s'intéresser à ce travail et de faire partie du jury. Son aide à bien comprendre le phénomène de la polarisation provoquée m'a été très utile. Encore merci.

Je tiens, très sincèrement, à remercier tous les enseignants du département de géophysique (FSTGAT-USTHB) pour leur compréhension et le savoir qu'ils m'ont transmis.

Je voudrais, plus particulièrement, remercier Le Professeur Benhallou, H., doyen à la faculté des sciences de la terre (USTHB), pour son aide, son soutien et les discussions enrichissantes sur l'état de l'avancement de mes travaux de thèse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Mr Sabri, N., Directeur de la division Sud Ouest de l'ORG, ainsi qu'à Mr Bousmaha, Tayeb et à tout le personnel de cette division pour leur gentillesse, leurs encouragements et l'aide qu'ils m'ont apporté durant ma mission sur terrain. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et ma sympathie.

Durant cette thèse, J'ai profité des discussions, échanges et conseils scientifiques avec plusieurs chercheurs étrangers. Chacun d'eux mérite un remerciement plus particulier.

Je cite :

Mr et Mme Tabbagh, chez qui j'ai trouvé l'apport informatique et les conseils précieux à l'exécution des calculs de modélisation. Encore merci

Dr Loke M.H. de l'université de Birmingham (Angleterre) pour les discussions sur la tomographie électrique et sur l'utilisation de son logiciel. Je le remercie vivement pour avoir répondu à mes nombreuses questions qui ont donné à cette thèse une forme plus éclaircie. Tout simplement merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Dr Marescot, L. de l'Université de Lausanne (suisse) pour son aide précieuse et les connaissances qu'il m'a transmises. Il m'a aidé dans l'interprétation des résultats, sans oublier la simplicité de ses explications. Un grand merci pour le temps qu'il m'a accordé.

Dr Frankcombe.K de "Southern Geoscience Consultants" (SGC), pour son aide efficace au début de cette thèse et d'avoir répondu à mes nombreuses questions.

Je ne pourrais pas oublier le soutien moral et les conditions de travail agréables qui m'ont été fournis par mes amis El Hadi Oubaich, Rabah Bensalem et Khadidja Abbas du CGS. Je souhaite, vivement, conserver au delà de cette thèse la qualité de leur amitié.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à l'équipe de l'ORGM. Je cite : Mrs Zenia M.S., Meziani A., Benali. M., Acheraiou, Allilou H., et Daf ainsi que toute l'équipe géophysique de la division Sud Ouest de L'ORGM, sans oublier H. Saada. Leur accueil, avec beaucoup de gentillesse, et leur soutien moral durant mon séjour à Bechar m'ont permis de bénéficier de leur expérience sur terrain. Qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance.

Je voudrais remercier tendrement Anissa, Leila, Karima, Mahdia et Bahia pour tout ce qu'elles ont fait pour moi et pour notre merveilleuse complicité. Vous étiez toujours présentes pour moi en chaque circonstance.

Je ne peux oublier de remercier les anciens stagiaires avec qui j'ai partagé une tranche de vie d'équipe, merci et bonne chance donc à Lila, Lamine, Nabila et Moh.

J'adresse aussi mes remerciements à Moad, Samir, Ahmed, Karim et Hichem, pour les discussions, l'aide, et tous les bons moments que j'ai eu l'occasion de partager avec eux, aussi bien sur terrain qu'au bureau. Je leur souhaite bonne chance pour faire aboutir leur thèse et toute la suite.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à Benzine S. Allek K., Bellabes S., Boubaya D., Bouchedda A, Kaci H, Bailiche A et Hadoune N., pour l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté.

J'aimerais remercier du fond du cœur mes parents, mes frères et sœurs, pour leur soutien moral inconditionnel, et pour leurs encouragements tout au long de mes études. Je ne saurais oublier ma nièce Hanane pour l'aide qu'elle m'a apporté en informatique. Que toute ma famille soit assurée de ma parfaite reconnaissance.

Enfin, je voudrais dire un grand merci aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Table des matières

Remerciements

Introduction Générale1

Chapitre I - Principes théoriques des méthodes électriques et électromagnétiques

I.1	Méthodes électriques	4
I.1.1	Principe de la prospection électrique	4
I.1.2	Résistivité apparente.....	4
I.1.3	Potentiel à la surface d'un milieu horizontal stratifié.....	5
I.1.4	Méthodes électriques utilisées.....	9
I.1.4.1	Profilage électrique.....	9
I.1.4.2	Imagerie électrique.....	11
I.1.4.3	Polarisation provoquée (PP).....	13
I.2	Méthodes électromagnétiques.....	17
I.2.1	Rappel sur les équations de Maxwell	17
I.2.2	Les équations d'ondes	18
I.2.3	Principe de la prospection électromagnétique	18
I.2.4	Techniques de la prospection électromagnétique utilisées	19
I.2.4.1	Technique VLF.....	19
I.2.4.2	Technique VLF-R.....	20
I.2.5	Paramètres mesurés.....	21
I.2.6	Profondeur de pénétration.....	22

Chapitre II - Modélisation Tridimensionnelle des structures

II.1	Cartographie électrique.....	24
II.1.1	Introduction.....	24
II.1.2	Etude des cas synthétiques	25
II.2.3	Présentation et Discussion des résultats.....	27

II.2	Transformation des cartes de résistivité électrique en cartes VLF-EM.....	32
II.2 .1	Introduction	32
II.2 .2	Relation de la Transformation.....	32
II.2.3	filtre de dérivation	33
II.2.4	application a un cas synthétique	33

Chapitre III : Identification des structures 2D par modélisation et inversion

III.1	Introduction.....	37
III.2	Théorie d'inversion.....	37
III.2.1	Introduction	37
III.2.2	Formulation du problème inverse et du problème direct	38
III.2.3	Solution du problème inverse	38
III.2.4	Non linéarité.....	38
III.3	Tomographie électrique.....	40
III.3.1	Introduction.....	40
III.3.2	Représentation graphique.....	40
III.4	Application à des cas synthétiques.....	42
III .4.1	Présentation des modèles	42
III .4.2	Résultats et discussions	42
III .4.2.1	Résultats électriques.....	43
III .4.2.2	Résultats électromagnétiques.....	54
III.4.2.3	Conclusion.....	54
III. 5	Application de l'indice DOI (Depth Of Investigation) à l'imagerie.....	58
	électrique 2D pour les sous-sols à forts contrastes de résistivité	
III.5.1	Introduction	58
III.5.1	Exemple d'application.....	58
III. 5. 2 .1	Cas synthétique.....	58
III. 5. 2 .2	Cas réel.....	61

Chapitre IV – Etude d'un cas réel

IV.1	Situation géographique.....	64
IV.2	Contexte géologique	65
IV.3	Objectif et méthodologie d'acquisition des travaux des données sur terrain	66
IV.4	Exploitation des données.....	70

IV.5	Résultats et discussions.....	71
IV.5.1	Résultats obtenus par la méthode électrique.....	71
IV.5.2	Résultats obtenus par la méthode électromagnétique	73
IV.5.3	Discussions des modèles.....	75
IV.5.3.1	Profil électrique 2D N°1600 E.....	75
IV.5.3.2	profil électrique 2d N° 00.....	77
IV.5.3.3	profil 2d n° 800 W.....	80
IV.5.4	Transformation des cartes de résistivité électrique..... en cartes VLF-EM	80
IV.5.5	Conclusion.....	81
	Conclusion Générale.....	82
	Références Bibliographiques.....	85
	Liste des notations et abréviations.....	89
	Liste des figures.....	90
	Liste des tableaux	92

Introduction générale

La détection des structures de sub-surface, caractérisées par leur résistivité, s'effectue principalement par la mise en œuvre des méthodes géophysiques en générale et les techniques électriques en particulier. Ces dernières, qui par leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût, sont souvent plus utilisées que d'autres méthodes. A partir des mesures de la résistivité électrique, il est possible d'identifier les différents faciès géologiques présents où leurs limites. Ces techniques, adaptées à l'identification de structures de différentes formes ont été également comparées aux résultats obtenus par l'électromagnétisme. La combinaison de ces deux méthodes géophysiques permet de mieux comprendre et de visualiser les structures du sous-sol.

Des techniques récentes de la prospection électrique ont pris une place, importante, ces dernières années, en particulier la tomographie électrique. Elle a été l'objet de recherche par plusieurs auteurs. Nous pouvons citer les travaux de Griffiths et Barker 1993, Hagrey et Michaelsen, 1999, Bourennane et al 1998, Ogilvy et al.1999, Olayinka et Yaramanci, 1999, michot, D. 2003. Son but est la détermination de la distribution latérale et verticale des paramètres électriques à partir d'une série de mesures effectuées en surface.

Parmi les méthodes électriques utilisées dans cette étude, nous citons la polarisation provoquée (PP). Celle-ci, permettant de mesurer la chargeabilité, est utilisée en prospection minière. Elle sert, le plus souvent, à identifier les structures géologiques susceptibles de renfermer des minéralisations, car la détection, et surtout, la délimitation des enrichissements ne peuvent se faire uniquement par la géochimie. La PP permet, donc, de localiser les zones minéralisées contenant des sulfures.

La présente étude porte, ainsi, sur l'utilisation de ces techniques. Elle traite les cas synthétiques et leur application à des cas réels. Elle s'articule, essentiellement autour de quatre chapitres :

Le chapitre I, est consacré aux principes théoriques des méthodes électriques et électromagnétiques, où seront présentées les techniques employées à savoir : en électrique, la PP et l'imagerie électrique et en électromagnétique, la VLF et la VLF-R. Ce chapitre traite, également, le calcul du potentiel en polarisation provoquée en surface et les différents paramètres qui le caractérisent.

Le chapitre II traite de la reconnaissance à grande échelle de la distribution de la résistivité ou de la chargeabilité, en sub-surface dans les domaines archéologique, géotechnique, minier et de l'environnement à une cartographie de résistivité et de chargeabilité. Pour ce faire, une étude théorique porte sur les réponses (mesurées) en surface de quelques modèles synthétiques 3D. Ceci permet d'évaluer le pouvoir de détection, de sensibilité, et par la suite d'évaluer les avantages et les inconvénients de chaque dispositif. Dans ce chapitre, nous introduisons un traitement des données électriques par le filtre dérivé. Ce dernier permet la transformation des données de résistivité en données VLF-EM en mettant en évidence certains paramètres géométriques des structures du sous-sol.

Le troisième chapitre comporte une étude 2D des structures du sous-sol. Pour cela une méthodologie portant sur l'acquisition d'une technique d'imagerie géo électrique est présentée. Cette dernière s'appuie sur le phénomène de la polarisation provoquée qui est un moyen d'investigation géophysique pour des applications de terrain. Toutefois, la modélisation et l'inversion permettent d'améliorer la qualité d'interprétation des données électriques et électromagnétiques, grâce à l'étude de la réponse des modèles synthétiques et leurs comparaisons aux résultats des données de VLF, VLF-R et de la PP en utilisant diverses configurations d'électrodes.

Le chapitre IV concerne l'étude d'un cas réel grâce à une mission d'acquisition de données sur terrain avec l'ORGM. Celle-ci a eu lieu à Toumiat (chaîne d'Ougarta) et a pour objectif l'identification d'un filon de quartz ainsi que sa minéralisation aux sulfures. Les résultats obtenus après traitement des données acquises lors de cette campagne, par application de plusieurs techniques, sont illustrés sous forme de cartes pour être exploités dans un objectif minier.

Finalement, l'établissement de plusieurs modèles et cartes enrichissent cette étude et facilitent le choix de l'outil de travail approprié.

Chapitre I :
Principes théoriques des
méthodes électriques et
électromagnétiques

Chapitre I

Principes théoriques des méthodes électriques et électromagnétiques

I.1	Méthodes électriques	4
I.1.1	Principe de la prospection électrique	4
I.1.2	Résistivité apparente.....	4
I.1.3	Potentiel à la surface d'un milieu horizontal stratifié.....	5
I.1.4	Méthodes électriques utilisées.....	9
I.1.4.1	Profilage électrique.....	9
I.1.4.2	Imagerie électrique.....	11
I.1.4.3	Polarisation provoquée (pp).....	13
I.2	Méthodes électromagnétiques.....	17
I.2.1	Rappel sur les équations de Maxwell	17
I.2.2	Les équations d'ondes	18
I.2.3	Principe de la prospection électromagnétique.....	18
I.2.4	Techniques de la prospection électromagnétique utilisées	19
I.2.4.1	technique VLF.....	19
I.2.4.2	Technique VLF-R.....	20
I.2.5	Paramètres mesurés.....	21
I.2.6	profondeur de pénétration.....	22

I.1 Méthodes électriques

L'objectif de ce chapitre est de rappeler les équations de base qui régissent le comportement du champ électrique pour les milieux homogènes et hétérogènes.

I.1.1 Principe de la prospection électrique en courant continu

C'est une méthode qui consiste à mesurer la résistivité des formations qui constituent les terrains prospectés. En pratique, on injecte un courant continu d'intensité I , au moyen de deux électrodes A et B et on mesure la différence de potentiel ΔV entre deux autres électrodes M et N. D'après la loi d'Ohm, la circulation du courant injecté obéit au principe de la conservation de la charge électrique. Ce principe s'écrit sous forme d'une équation de continuité qui exprime le fait que lorsqu'une charge quitte un point, la densité de charge en ce point diminue, alors que la densité de courant augmente. La densité de charge q et la densité de courant J satisfont toujours à la condition :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

- $\vec{\nabla}$: Opérateur nabla.
- q : Densité de charge (C/m^3)

Si la densité de courant J est constante au cours du temps, la distribution de courant est stationnaire alors :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{I.2})$$

C'est la cas de la prospection électrique par courant continu, qu'on va utiliser lors de cette étude.

I.1.2 Résistivité apparente

La résistivité noté $\rho(\Omega.m)$ ou son inverse la conductivité $\sigma(Sm^{-1})$ d'un milieu est définie par la loi d'ohm. Elle correspond à la constante de proportionnalité entre le champ électrique E (Vm^{-1}) et la densité de courant J (Am^{-2}) en un point du milieu:

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}V \quad (\text{I.3})$$

Dans un milieu anisotrope, ρ est un tenseur, alors que pour un milieu isotrope ρ est un scalaire. L'expression mathématique de la résistivité électrique, d'un horizon de sol d'extension semi-infini et homogène, mesurée avec un quadripôle électrique, est donnée par l'expression suivante :

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (I.4)$$

Où k est le coefficient géométrique dépendant des distances séparant les électrodes. Il est donnée par :

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (I.5)$$

D'après le principe de superposition, la différence de potentiel entre les deux électrodes de mesures, M et N est donnée par :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (I.6)$$

Comme le sol est en général, plus ou moins hétérogène, la valeur donnée par la formule ne correspond pas à une résistivité vraie mais à une **résistivité apparente**.

I.1.3 Potentiel à la surface d'un milieu horizontal stratifié

Il s'agit de définir la relation qui existe entre les différences de potentiel mesurées ΔV et les paramètres qui définissent la stratification, en l'occurrence la résistivité et l'épaisseur des couches qui constituent le milieu. C'est ainsi qu'il est possible, d'après Stepanesco et al 1930, d'évaluer l'expression du potentiel à la surface.

Pour se faire, on définit un modèle composé d'une succession de couches horizontales séparées par des interfaces planes. Chaque couche est électriquement homogène et isotrope.

Le champ électrique est créé en un point du sol par une source ponctuelle située également en surface (Fig.I.1).

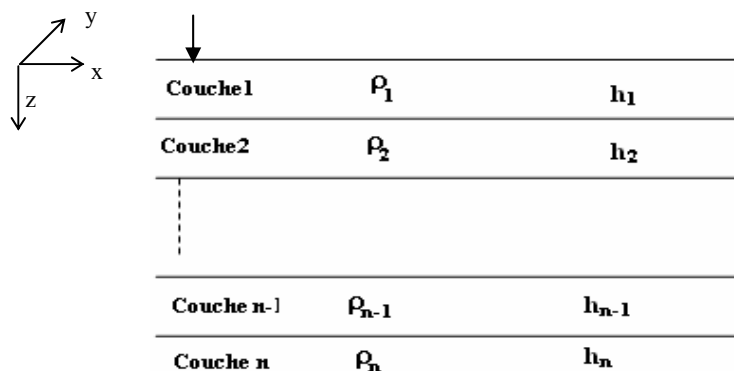


Figure I.1 stratification du sous-sol

Le potentiel électrique V est une fonction harmonique qui satisfait à l'équation différentielle, de Laplace qui s'écrit en coordonnées cartésiennes :

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I.7})$$

Et en coordonnées cylindriques, en tenant compte de la symétrie par rapport à la verticale oz :

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I.8})$$

La solution générale de cette équation est donnée par :

$$V = \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) [\Phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \Psi(\lambda) e^{\lambda z}] d\lambda \quad (\text{I.9})$$

Où :

- $\Phi(\lambda)$ et $\Psi(\lambda)$ sont des fonctions arbitraires, sont déterminées en écrivant les conditions aux limites.

- $J_0(\lambda r)$ est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre zéro.

On exprime le potentiel V_s généré par une source ponctuelle, placée à la surface d'un sol homogène et isotrope par :

$$V_s = \frac{\rho_1 I}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad (\text{I.10})$$

Où

ρ_1 désigne la résistivité électrique couche du terrain homogène .

A partir de la théorie des fonctions de Bessel, l'intégrale de Lipchitz est exprimée par :

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda z} J_0(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

Par conséquent, la solution générale peut alors s'écrire :

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda z} + \theta(\lambda) e^{-\lambda z} + \chi(\lambda) e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.11})$$

Avec

$\theta(\lambda)$ et $\chi(\lambda)$ sont des fonctions arbitraires de λ . Elles ne sont pas nécessairement, les mêmes dans les différentes couches. Pour la $i^{\text{ème}}$ couche on écrira :

$$V_i = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda z} + \theta_i(\lambda) e^{-\lambda z} + \chi_i(\lambda) e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (\text{I.12})$$

Cette expression doit satisfaire les conditions aux limites suivantes :

*** Continuité du potentiel :** $V_i = V_{i+1}$

$$\text{Donc} \quad \theta_i(\lambda) e^{-\lambda h_i} + \chi_i(\lambda) e^{\lambda h_i} = \theta_{i+1}(\lambda) e^{-\lambda h_i} + \chi_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} \quad (\text{I.13})$$

h_i : représente la profondeur de l'interface de séparation des couches i et $i+1$

*** Continuité de la composante normale de la densité de courant aux interfaces de séparation des couches :**

$$(J_i)_\perp = (J_{i+1})_\perp$$

Il revient

$$\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial V_i}{\partial z} \right)_{z=h_i} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \left(\frac{\partial V_{i+1}}{\partial z} \right)_{z=h_i}$$

D'où

$$\frac{1}{\rho_i} \left[(1 + \theta_i(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - \chi_i(\lambda) e^{\lambda h_i} \right] = \frac{1}{\rho_{i+1}} \left[(1 + \theta_{i+1}(\lambda)) e^{-\lambda h_i} - \chi_{i+1}(\lambda) e^{\lambda h_i} \right] \quad (I. 14)$$

*** A la surface d'un terrain tabulaire, la composante normale de la densité de courant doit être nulle partout sauf au voisinage immédiat de la source de courant : $(J_i)_\perp = 0$**

$$\theta_1(\lambda) = \chi_1(\lambda) \quad (I. 15)$$

*** Le potentiel s'annule à l'infini dans la dernière couche soit : $V_n = 0$**

$$\chi_n(\lambda) = 0 \quad (I. 16)$$

L'indice n correspond à la couche la plus profonde. Pour n couches, on aura un système de 2n équations à 2n inconnues qui sont $\theta(\lambda)$ et $\chi(\lambda)$. Les équations I.15 à I.16 permettent de calculer $\theta_i(\lambda)$, donc l'expression du potentiel à la surface du sol ($z=0$) en tenant compte des constants arbitraires θ et λ

$$V_s = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [1 + 2\theta_1(\lambda)] J_0(\lambda) d\lambda \quad (I. 17)$$

Où θ_1 est la fonction noyau de Stepanesco. La fonction de Kernel $K(\lambda)$ est définie par :

$$K(\lambda) = [1 + 2\theta_1(\lambda)]$$

L'expression I.17 devient :

$$V_s = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty K(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda$$

La solution en θ_i pour deux couches est : $\theta_1 = \frac{k_1 e^{-2\lambda h_i}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h_i}}$

h_i est la profondeur

Pour un terrain de trois couches, on obtient :

$$\theta_2 = \frac{k_1 e^{-2\lambda h_1} + k_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 + k_1 k_2 e^{-2\lambda(h_2 - h_1)} - k_1 e^{-2\lambda h_1} - k_2 e^{-2\lambda h_2}}$$

Avec

$k_n = \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{\rho_{n+1} + \rho_n}$ est le coefficient de réflexion du nième plan de séparation

Après avoir donné la résolution de l'équation de Laplace d'après Stephanesco, un autre développement a été fait par Koefoed dans le quel il introduit la notion de résistivité transformé $T(\lambda)$ tel que :

$$T(\lambda) = \rho K(\lambda) \quad (\text{I. 18})$$

On pose $AB=2\ell$ et $MN=2b=a$

Pour le dispositif Wenner :

$$\rho_w = 2a\rho_1^2 \int_0^\infty K(\lambda)[J_0(\lambda a) - J_0(2\lambda a)]d\lambda \quad (\text{I. 19})$$

Et pour le dispositif Schlumberger :

$$\rho_{sh} = \rho_1 + 2\rho_1 \ell^2 \int_0^\infty \theta_1(\lambda) J_1(\lambda \ell) \lambda d\lambda \quad (\text{I. 20})$$

Avec J_1 est la fonction de Bessel d'ordre 1 ($\frac{\partial}{\partial x} J_0(x) = -J_1(x)$), on aura alors

$$\rho_{sh} = \rho_1 \ell^2 \int_0^\infty K(\lambda) J_1(\lambda \ell) \lambda d\lambda$$

Les équations (I. 19) et (I. 20) deviennent :

$$\rho_w = 2a \int_0^\infty T(\lambda)[J_0(\lambda a) - J_0(2\lambda a)]d\lambda$$

$$\rho_s = \rho_1 + \ell^2 \int_0^\infty (T(\lambda) - \rho_1) J_1(\lambda \ell) \lambda d\lambda$$

On exprime les fonctions de résistivité apparente en fonction des variables logarithmiques $X = \ln(\ell)$ et $z = \ln(1/\lambda)$ pour le convertir en intégrale de convolution comme :

$$\rho_a(x) = \int_{-\infty}^\infty T(z) J_1(e^{x-z}) e^{2(x-z)} dz \quad (\text{I. 21})$$

Les expressions de la résistivité apparente pour les deux dispositifs deviennent :

$$\rho_w = 2 \int_{-\infty}^\infty T(y) [J_0(e^{x-y}) - J_0(2e^{x-y})] e^x - y dy$$

$$\rho_s = \rho_1 + \ell^2 \int_{-\infty}^\infty (T(y) - \rho_1) J_1(e^x - y) dy$$

On exprime ensuite la résistivité transformée en fonction de la résistivité apparente par une inversion de Hankel. Gosh (1971) donne l'expression de T pour un dispositif Schlumberger

$$T(\lambda) = \int_{-\infty}^\infty \rho_s(x) J_1\left(\frac{1}{e^{y-x}}\right) dx \quad (\text{I. 22})$$

C'est une relation de convolution entre une fonction d'entrée $\rho_s(x)$ et une fonction de sortie $T(y)$:

Après l'utilisation des conditions aux limites on aura :

Pour la $i^{\text{ème}}$ couche

$$k_i = \frac{k_{i+1} + P_i \tanh(\lambda d_i)}{P_i + k_{i+1} \tanh(\lambda e_i) / \rho_i} \quad (\text{I. 23})$$

Avec

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \quad (\text{I. 24})$$

Par conséquent, la résistivité transformée (Das et Gosh, 1974) est donnée par la relation I. 25 :

$$T_i = \frac{T_{i+1} + \rho_i \text{tg}(\lambda d_i)}{1 + T_{i+1} \text{tg}(\lambda d_i) / \rho_i} \quad (\text{I. 25})$$

Donc la résistivité transformée est calculée à partir des paramètres des couches (ρ_i , h_i)

Pour trois couches ($i=3$)

$$T_2 = \frac{\rho_3 + \rho_2 \text{tg}(\lambda d_2)}{1 + \rho_3 \text{tg}(\lambda d_2) / \rho_2} \quad (\text{I. 26})$$

La résistivité apparente est déterminée par l'application d'un filtre linéaire (O'Neill, 1975) qui fournit 20 coefficients pour un dispositif Schlumberger :

$$\rho_a(m) = \sum_{i=-5}^{14} b_i T_{m-i} \quad (\text{I. 27})$$

Où :

$m=0, 1, 2, 3, 4$, Nombre de points de calcul de la résistivité.

b_i sont les coefficients du filtre.

I.1.4 Méthodes électriques utilisées

I.1.4.1 Profilage électrique :

Cette technique consiste à faire des mesures de résistivité ou de chargeabilité (terrain homogène) sur plusieurs profils. Ces derniers, disposés parallèlement. Les mesures obtenues permettent de faire une investigation des terrains prospectés à une profondeur constante. La dimension du dispositif reste fixe, alors que son centre se déplace horizontalement suivant le profil considéré (Fig.I.2A).

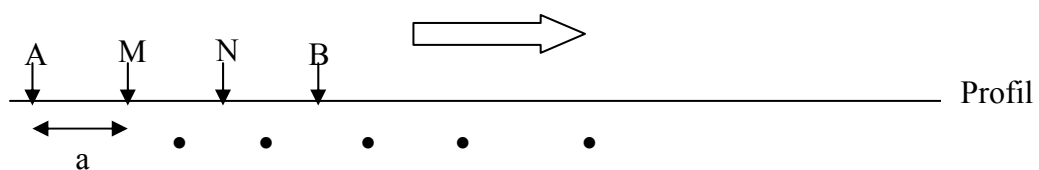
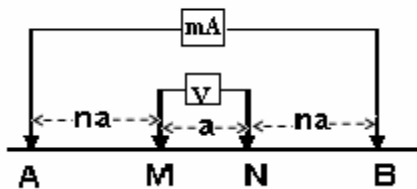


Figure I.2A : Représentation d'une acquisition en traînée (Profilage) avec un dispositif Wenner

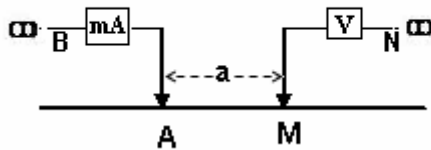
Ce profilage a été réalisé avec cinq dispositifs ; Wenner-Schlumberger, pôle-pôle, dipôle-dipôle, pôle-dipôle et le dispositif rectangulaire. La figure I.2B illustre leurs configurations et leurs coefficients géométriques qui leurs associés, où a est l'espacement entre les électrodes et n est un facteur d'espacement, sa valeur maximale est égale à 8 pour un pôle dipôle (Loke 2001).

a) Wenner-Schlumberger



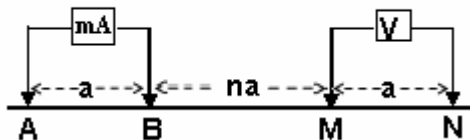
$$k = \pi n(n + 1)a \quad (I.28)$$

b) Pôle-pôle



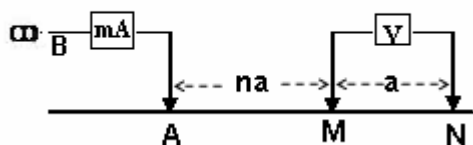
$$k = 2\pi a \quad (I.29)$$

c) Dipôle-dipôle



$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (I.30)$$

d) Pôle-dipôle



$$k = 2\pi n(n + 1)a \quad (I.31)$$

e) Rectangulaire

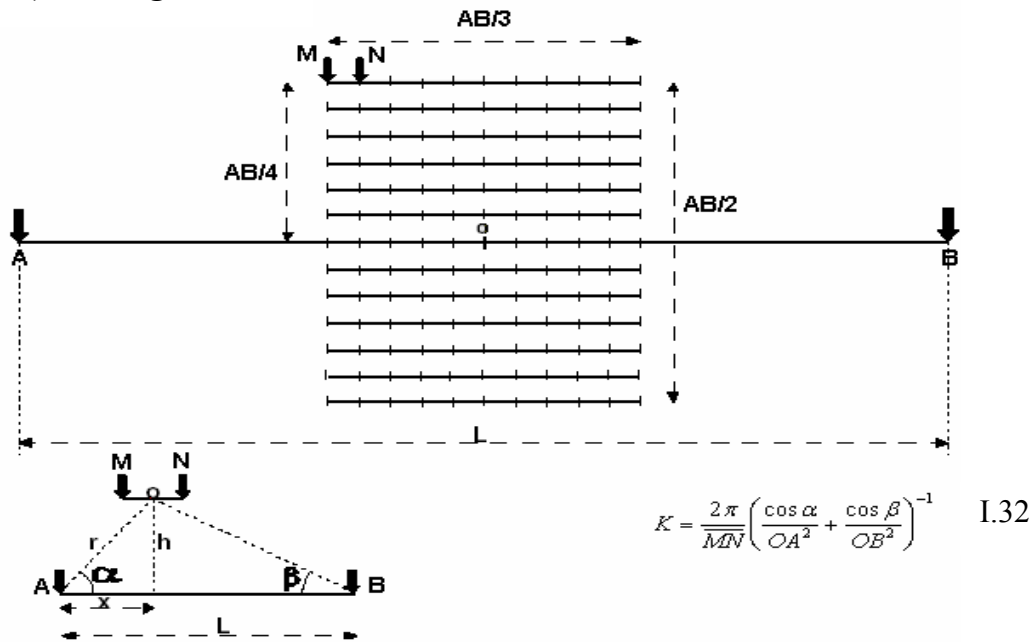


Figure I.2B : a, b, c, d, e ; Les dispositifs électriques utilisés

I.1.4.2 Imagerie électrique

Appelée aussi panneau électrique, elle consiste à étudier la variation latérale et verticale de la résistivité ou de la chargeabilité apparente des structures. Il s'agit d'effectuer des mesures le long d'un profil avec des distances variables entre électrodes. Cette technique permet d'obtenir une image à deux dimensions du sous-sol ou "pseudo-section".

Ces pseudo sections présentent souvent des artefacts de mesures qui nuisent à leurs interprétations. Ces artefacts sont liés, d'une part au mode de représentation et, d'autre part aux effets des à-coups de prise produits par les hétérogénéités superficielles.

L'inversion des coupes de résistivité ou de chargeabilité mesurée est alors une étape indispensable avant toute interprétation (Panissaud et al, 2001). L'algorithme d'inversion 2D parvient en général à éliminer ces artefacts de mesure. Il permet également de contrôler, grâce aux paramètres de résolution, le degré de validité des résultats (chap. III).

Pour cette technique d'imagerie, quatre dispositifs ont été utilisés. Il s'agit de Wenner-Schlumberger, Pôle – pôle, Dipôle – dipôle et le Pôle - dipôle (fig.I.3). Toutefois, l'obtention d'une bonne image du sous-sol nécessite une densité de points suffisante. Les électrodes de courant et de potentiel, sont placées le long du profil. La distance entre chacune d'elle est constante, et l'inter-électrodes est notée 'a'. La figure 1.3 illustre la disposition des électrodes.

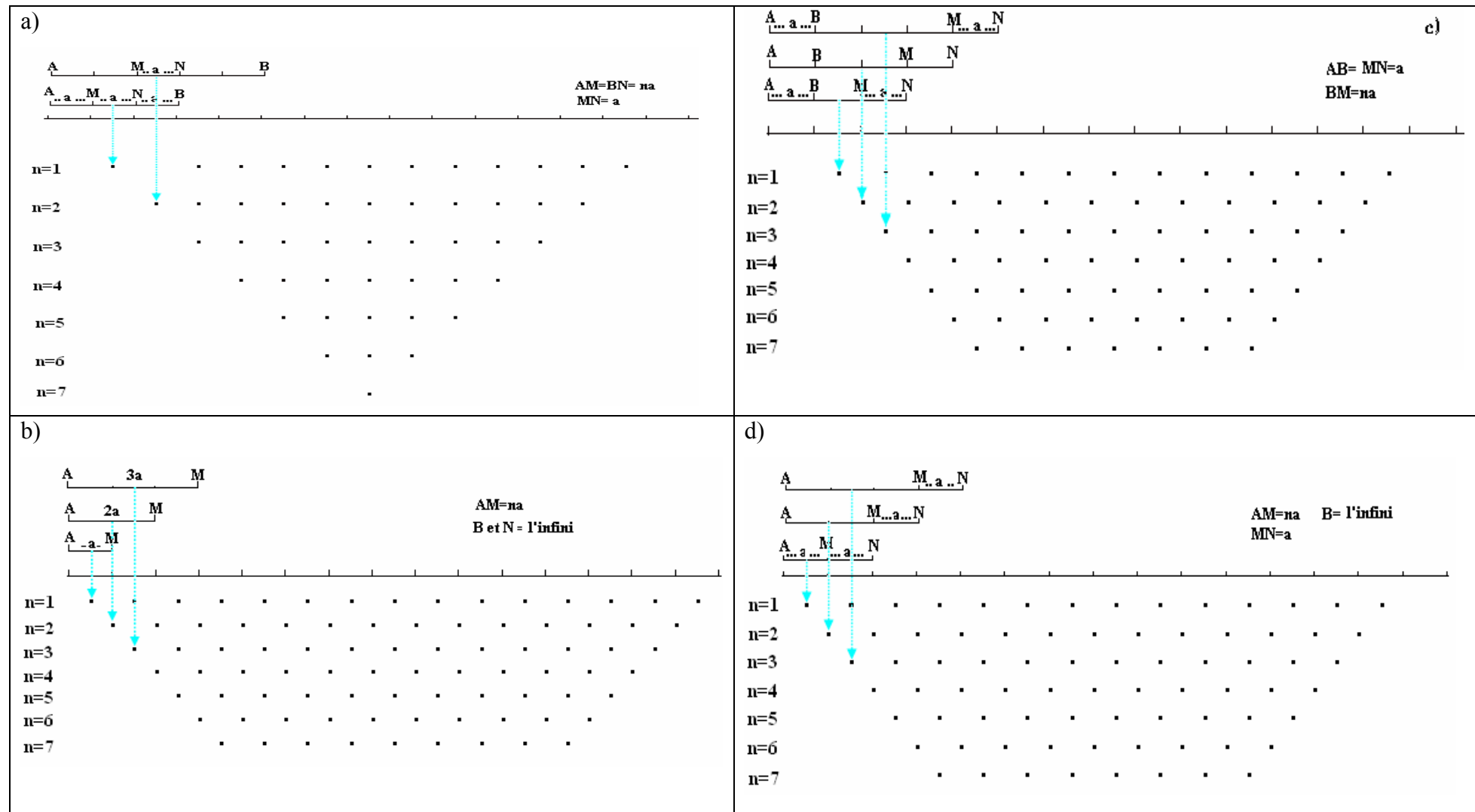


Figure 1.3 : Représentation des différentes configurations d'électrodes, avec les différents niveaux d'acquisition ; a) wenner Schlumberger ; b) pole- pole ; c) dipôle- dipôle ; d) pôle - dipôle.

Chacun de ces configurations d'électrodes (fig.I.3) à des avantages et des inconvénients différents (Loke, 1997) et ceux-ci en terme de profondeur d'investigation, de sensibilité aux variations horizontales ou verticales de la résistivité, et à la force de signal (inversement proportionnelle à la constante géométrique du dispositif) . Il existe différentes représentations d'une même structure lorsque l'on emploie des dispositifs différents. Le choix de la configuration d'électrode dépend de la structure à identifier et les caractéristiques du dispositif. Le tableau II récapitule les caractéristiques de ces configurations :

	Wenner – Schlumberger	Pole- pole	Dipôle - dipôle	Pôle –dipôle
Sensibilité du dispositif aux structures horizontal	••	••	•	••
Sensibilité du dispositif aux structures vertical	••	••	••••	••••
Profondeur d'investigation	•	••••	••	•••
Couverture horizontale	•	••••	••	•••
Force du signal	••••	•	••	•••

Tableau.I.1 : Caractéristiques des différentes configurations (d'après Loke 2001)

I.1.4.3 Polarisation provoquée (PP)

a) - Objectif et Principe

La polarisation provoquée est une technique appliquée en recherche minière. Elle a été constatée par Conrad Schlumberger en 1912. Elle a pour objectif, l'identification des structures géologiques susceptibles de renfermer des minéralisations. Son principe consiste à :

- Injecter un courant continu dans le sol.
- Interrompre le courant rapidement.
- Mesurer en fonction du temps la décroissance du potentiel (fig.1.4).

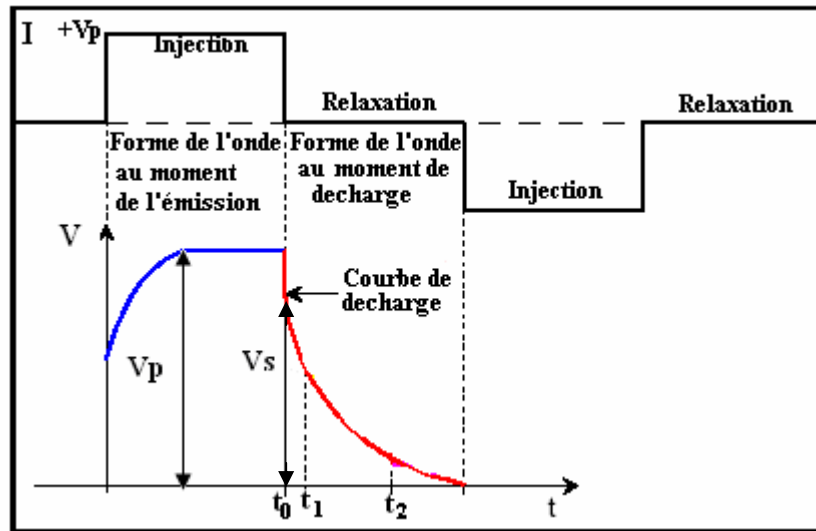


Figure I.4 : phénomène PP – Domaine temps

Le potentiel résiduel est appelé polarisation provoquée. Il s'atténue graduellement en l'absence de courant. Le sol devient polarisé à cause de la présence, dans celui-ci, de charges électriques au moment de l'injection. A la coupure du courant, la dépolarisation de ce système produit une réponse PP.

b) - Calcul du potentiel en polarisation provoquée

L'interprétation qualitative en prospection électrique par courant continu, s'obtient grâce à la mesure de la résistivité apparente. Cette dernière dépend, à la fois, de la résistivité vraie, de la structure du sous-sol et de la géométrie du dispositif utilisé. En polarisation provoquée, pour un cas simple, nous allons montrer comment s'effectue le calcul de la différence de potentiel (Tournier 1977).

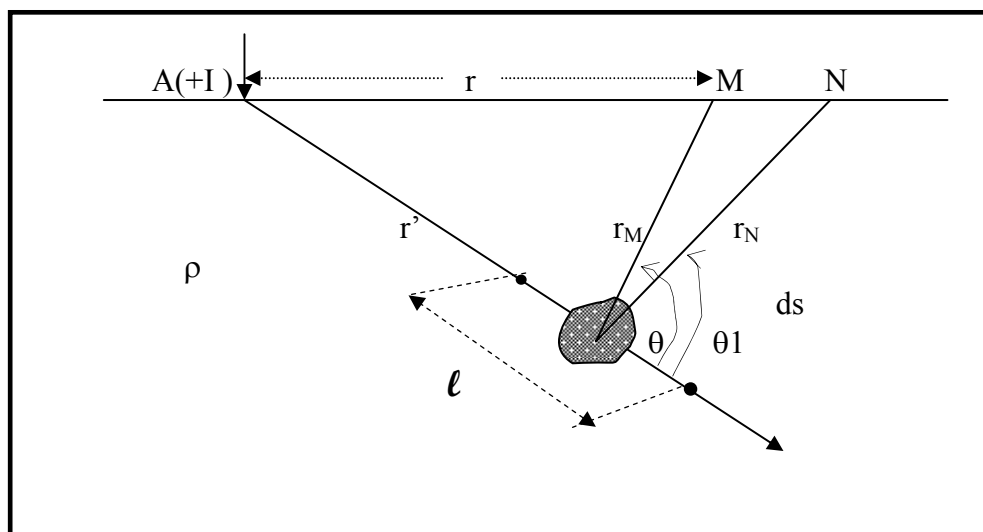


Figure I.5 : Schéma de la polarisation de l'élément de volume

On injecte un courant d'intensité I à l'aide d'une électrode ponctuelle A (fig.1.5), dans un élément de surface ds . Dans l'hypothèse du phénomène stationnaire, la polarisation provoquée de l'élément de volume dv a pour effet de faire apparaître deux sources ponctuelles $+a$ et $-a$, séparées par une distance ℓ . Les deux sources de courants forment un dipôle de moment \mathcal{M} :

$$\mathcal{M} = \frac{\rho dI' \vec{i}}{4\pi} \quad (\text{I. 33})$$

dI' : L'intensité du courant traversant $+a$ et $-a$

On admet en outre en ds la relation linéaire suivante :

$$\mathcal{M} = k \vec{E} \quad (\text{I.34})$$

E étant le champ électrique, le moment devient :

$$\mathcal{M} = k \rho \vec{J}$$

- k : représente la polarisation de l'élément de volume dv .

- ρ : La résistivité uniforme du demi espace

A l'état d'équilibre, la polarisation provoquée apparaît comme la superposition de deux distributions de courant I et dI' dans le milieu. Celles-ci obéissent à l'équation de Laplace.

Après une durée et d'après le principe de superposition, le potentiel en un point M du milieu, sera égal à la somme du potentiel en $1/r$ dû à la source A et du potentiel du dipôle de polarisation.

Le potentiel dû à la source A : $V_M^A = \frac{\rho I}{2\pi r}$

Le potentiel du dipôle en M s'exprime alors par :

$$V_M^a = k\rho \frac{I}{2\pi r^2} \cdot \frac{\cos\theta}{r_M^2} \quad (\text{I. 35})$$

Le potentiel total en M sera alors :

$$V_M^A + V_M^a = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{k \cos\theta}{r^2 + r_M^2} \right) \quad (\text{I. 36})$$

Pour le cas de deux électrodes ponctuelles, le potentiel du dipôle entre M et N sera :

$$\Delta v_{MN} = \frac{k\rho I}{2\pi r^2} \left(\frac{\cos\theta}{r_M^2} - \frac{\cos\theta_1}{r_N^2} \right) \quad (\text{I. 37})$$

De cette relation on peut tirer la résistivité qui a la même forme que celle donnant la résistivité apparente (en l'absence de polarisation), mais cette dernière est calculée à partir d'un voltage secondaire V_s .

c) - Mesure de la Polarisation provoquée

La mesure de la PP s'effectue dans les domaines temporel et fréquentiel :

▪ .Domaine temporel (TD)

Le courant injecté, sous forme d'onde carrée suivi par des interruptions produira une courbe de voltage – temps (fig.I.4). V_p correspond au voltage mesuré alors que V_s est observé lorsque le courant fut coupé. La mesure de la réponse PP, donnée par la chargeabilité, est définie par :

$$\eta = \frac{V_s}{V_p} * 1000 \quad (I.38)$$

Les mesures sont données en mv/v. Pour un milieu hétérogène, composé de différents matériaux, la chargeabilité apparente est donnée par :

$$\eta_a = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (I.39)$$

En l'absence de polarisation, le voltage est une fonction de la conductivité (Seigel 1959)

$$V = V(\sigma_i) \quad (I.40)$$

En présence de dipôle chargé, le potentiel devient $V' = V(\sigma')$ (I.41)

Avec $\sigma'_i = \sigma_i(1 - \eta_i)$

▪ Domaine fréquentiel (FD)

La technique fréquentielle consiste à comparer les différences de potentiel ΔV_1 et ΔV_2 , pour la même station de mesure, en utilisant deux fréquences différentes. Il revient donc, à comparer les résistivités apparentes. On peut les retrouver en appliquant la relation générale I.6, utilisée en courant continu. Ainsi, on obtient deux résistivités ρ_{a1} et ρ_{a2} qui définissent l'effet de fréquence EF exprimé en % :

$$EF = \frac{\rho_{a1} - \rho_{a2}}{\rho_{a1}} \quad (I.42)$$

En pratique, on injecte un courant alternatif de basse fréquence (f compris entre 0.05 et 0.5 Hz) pour la première mesure, et un courant alternatif de fréquence plus élevé (1 à 10Hz) pour la deuxième.

I.2. Méthodes électromagnétiques

1.2.1 Rappel sur les équations de Maxwell

Une théorie généralisée de l'électromagnétisme a été établie par James Clerk Maxwell (1891). Elle correspond à quatre lois de la physique reliant le comportement du champ électrique E ($V \cdot m^{-1}$), du champ magnétique H ($A \cdot m^{-1}$), du champ de déplacement D ($C \cdot m^{-2}$), de l'induction magnétique b ($Wb \cdot m^{-2}$) et de la densité de courant de conduction J ($A \cdot m^{-2}$). Elles sont données par les relations suivantes :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I.43})$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (\text{I.44})$$

$$\text{div} \vec{D} = \nabla \cdot D = \rho \quad (\text{I.45})$$

$$\text{div} \vec{B} = \nabla \cdot B = 0 \quad (\text{I.46})$$

Ce sont les équations fondamentales de la théorie de l'électromagnétisme. Elles s'appliquent partout où la distribution de courant est continue.

- La première équation (1) correspond à la loi d'induction de Faraday selon laquelle il existe un champ électrique dans la région où existe un champ magnétique variable dans le temps.
- La seconde équation est l'expression mathématique de la loi d'Ampère- Maxwell. Un champ magnétique est créé dans l'espace par un flux de courant. Le champ est proportionnel au courant total correspondant à la somme des courants de déplacement et de conduction.
- La troisième équation est équivalente à loi de Coulomb.
- La quatrième énonce qu'il n'existe pas d'autre source d'induction que les courants. Pour le cas stationnaire, la densité de courant est constante ce qui est traduit par l'équation :

$$\nabla \cdot j = \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot D = -\nabla \cdot \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{I.47})$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (\text{I.48})$$

On a également

$$\frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (\text{I.49})$$

Les équations de Maxwell s'écrivent alors :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \quad (\text{I.50})$$

$$\nabla \wedge \vec{H} = 0 \quad (\text{I.51})$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (\text{I.52})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (I.53)$$

Le milieu est supposé homogène et isotrope. Dans ce cas, les inductions sont proportionnelles aux champs.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (I.54)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (I.55)$$

Avec

μ : Perméabilité magnétique

ε : Permittivité électrique

μ_r : Perméabilité relative du milieu (sans unité)

ε_r : Permittivité relative du milieu (sans unité).

Dans l'air :

$$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (H \ m^{-1}) \quad \text{et} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 = 1/(36\pi 10^9) \quad (FM^{-1})$$

I.2.2 Les équations d'ondes

Une onde électromagnétique EM dérive de l'un des caractères fondamentaux des équations de Maxwell qui permettent la propagation de champs électrique et magnétique, même en l'absence de charges et de courants. Ces deux composantes sont perpendiculaires entre elles et à la direction de propagation. Leurs équations d'ondes sont respectivement :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (I.56)$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (I.57)$$

Ce système d'équations est plus facile à analyser. Le principal intérêt réside dans le fait que les équations d'onde sont découplées, c'est-à-dire que chacune d'elles ne fait intervenir qu'un champ. Elles sont donc très utiles pour résoudre des problèmes de conditions aux limites.

I.2.3 Principe de la prospection électromagnétique :

Les méthodes électromagnétiques sont basées sur l'analyse des courants induits dans le sol. Un champ électromagnétique de fréquence imposée est émis par un émetteur. Ce champ primaire (champ inducteur) est perturbé par la présence des conducteurs qui provoquent l'apparition de courants induits produisant des champs secondaires superposés au champ primaire.

I.2.4 Techniques de la prospection électromagnétique utilisée :

Parmi les techniques connues d'électromagnétique, seules celles du VLF et VLF-R ont été utilisées lors de cette étude.

I.2.4.1 Technique VLF (Very Low Frequency):

La méthode VLF utilise les ondes EM transmises par des émetteurs terrestres de très basse fréquences. Elle utilise comme source d'énergie les signaux venant de stations militaires. les fréquences d'émission varient, normalement, entre 10 et 30 khz. Son utilisation est connue depuis 1908 (paterson et ronka, 1971).

En présence de corps conducteurs, les signaux émis par l'antenne (champs primaires) induisent des courants secondaires dans ces corps qui, à leur tour, produiront un champ secondaire superposé au primaire. Le champ résultant (combinaison du champ primaire et secondaire) est donc polarisé elliptiquement et déformé au voisinage des conducteurs. Ce sont ces déformations que l'on mesure à la surface du sol et qui renseignent sur la présence du conducteur souterrain (fig.1.7).

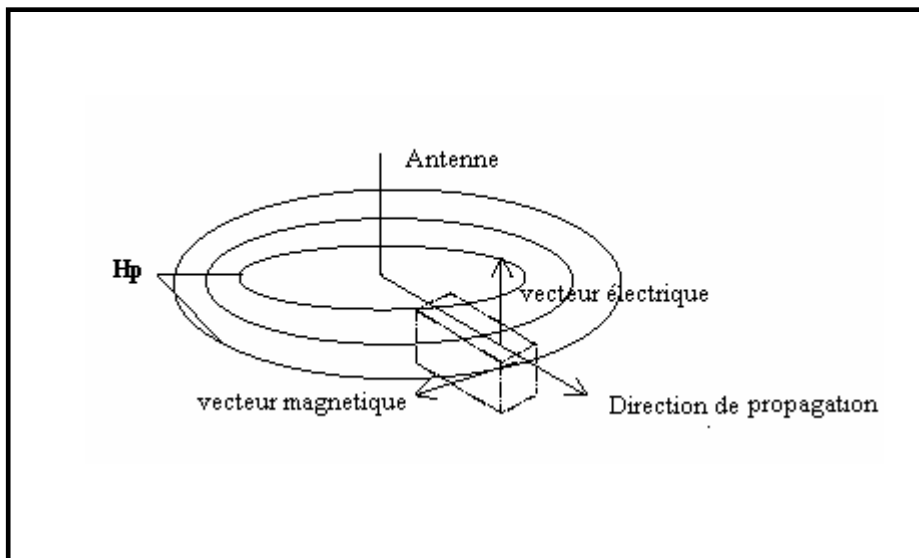


Figure I.6 : principe de la méthode VLF

Les principaux émetteurs VLF repartis à travers le monde sont représentés dans le tableau N°1 :

Fréquence (kHz)	Situation	Puissance (KW)	Indicatif
15.1	Le Blanc (France)	500	FUO
15.6	Odessa, Ukraine	500	EWB
16.0	Rugby (Angleterre)	750	GBR
16.4	Helgeland (Norvège)	350	JXZ
17.1	Moskova (Russie)	1000	UMS
17.4	Yosami (Japon)	200	NTD
17.8	Cutler (USA)	1000	NAA
18.6	Seattle (USA)	300	NLK
19.0	Criggeon (Angleterre)	250	MHW
19.6	Anthom (Angleterre)	500	GBZ
20.3	Tavalora (Italie)	500	ICV
21.4	Annapolis (USA)	400	NSS
22.3	NW Cape (Australie)	1000	NWC
24.0	Balboa (Panama)	150	NBA
24.0	Cutler (USA)	1000	NAA
28.5	Puerto Rico(USA)	100	NAU

Tableau 1.2 : liste des émetteurs les plus disponibles au monde (CCIR* 1993 ; Paterson and Ronka , 1971, McNeill and Labson, 1991)
CCIR* : Comité Consultatif International des Radiocommunications

1.2.4.2 Technique VLF-R

Elle est utilisée pour déterminer la résistivité apparente du recouvrement et le déphasage entre les champs électrique et magnétique horizontaux E_x et H_y . Le champ électrique E_x , dans la direction de propagation x , est mesuré entre deux électrodes plantées dans le sol et espacées de 10m. La résistivité est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{Z^2}{2\pi f \mu_0} \quad (I.58)$$

Avec $Z = \frac{E_x}{H_y}$

E_x : champ électrique (Vm^{-1})

H_y : champ magnétique (Am^{-1})

μ_0 : est la perméabilité magnétique du vide

- **La résistivité apparente** représente la résistivité du terrain prospecté pour une profondeur d'investigation δ .

- **Le déphasage φ** permet d'estimer le contraste du milieu. On distingue trois cas :
 - $\varphi = 45^\circ$: Milieu est homogène (composé par une lithologie de résistivité uniforme).
 - $\varphi < 45^\circ$: La couche la plus conductrice surmonte la couche la moins conductrice.
 - $\varphi > 45^\circ$: La couche la moins conductrice surmonte la couche la plus conductrice.

Par exemple dans une stratification dans laquelle des argiles couvrent les calcaires, la valeur du déphasage enregistré est inférieure à 45° . Par contre, dans une conduite remplie d'argile, la valeur du déphasage est supérieure à 45°

Les enregistrements peuvent être effectués par différentes fréquences (donc par différents émetteurs et profondeurs d'investigation), réalisant une prospection multifréquence, avec l'avantage de permettre une meilleure définition des structures du sous sol.

I.2.5 Paramètres mesurés

Dans le cas d'un terrain hétérogène, la structure induit un champ magnétique secondaire H_z vertical. Ce dernier combiné au champs primaire H_y , décrira ce qu'on appelle une ellipse de polarisation dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (fig.I.7). Deux paramètres sont mesurés par les récepteurs VLF:

- **l'inclinaison θ** du grand axe de l'ellipse de polarisation avec l'horizontale (composante en phase).
- **ellipticité ε** : le rapport des axes de l'ellipse (composante en quadrature).

Ces deux paramètres s'expriment respectivement par :

$$\tan 2\theta = \frac{2Z \cos \Delta\phi}{1 - Z^2} \quad (\text{I.59})$$

Avec $\Delta\phi = \phi_z - \phi_y$ différence de phase entre H_z et H_y et $Z = \frac{H_z}{H_y}$

et

$$\varepsilon = \frac{b}{a} = \frac{Z \sin \Delta\phi}{H_1^2} \quad (\text{I.60})$$

$$H_1^2 = |H_z e^{i\Delta\phi} \sin \theta + H_y \cos \theta| \quad (\text{Smith et Ward, 1974})$$

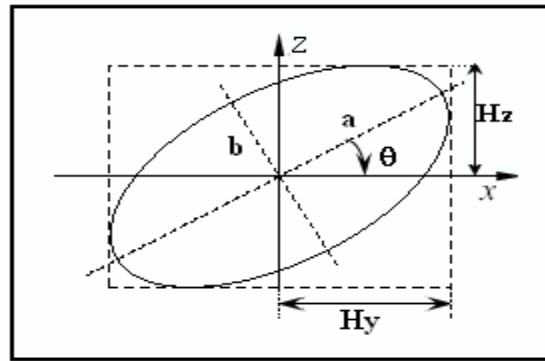


Figure I.7 : Ellipse de polarisation.

I.2.6 Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration du champ électromagnétique δ est proportionnelle à la résistivité du milieu et inversement proportionnelle à la fréquence de la source. Elle est définie par la relation 1.61 :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (I.61)$$

Où

ω : Fréquence angulaire, $\omega = 2\pi f$ en hertz

f : fréquence du champ primaire (émis) en Hertz.

$\mu = \mu_0(1 + \chi)$, Avec χ est la susceptibilité magnétique du milieu. Pour un milieu non magnétique χ est nulle et $\mu = \mu_0$.

Chapitre II

Modélisation Tridimensionnelle des structures

Chapitre II

Modélisation Tridimensionnelle des structures

II.1	Cartographie électrique.....	24
II.1.1	Introduction.....	24
II.1.2	Etude des cas synthétiques	25
II.2.3	Présentation et Discussion des résultats.....	27
II.2	Transformation des cartes de résistivité électrique en cartes VLF-EM.....	32
II.2.1	Introduction	32
II.2.2	Relation de la transformation	32
II.2.3	Filtre de dérivation	33
II.2.4	Application a un cas synthétique	33

II -1 Cartographie électrique

II. 1. 1 Introduction

Le but d'une prospection électrique est de déterminer la résistivité et/ou la chargeabilité électrique de subsurface, en mesurant une différence de potentiel en surface. A partir des valeurs mesurées, ainsi que de leur traitement, on peut faire une interprétation qualitative. Cette dernière fait appel à la simulation numérique qui permet d'aboutir à une solution représentative du modèle électrique proche de la réalité. Pour cette simulation, il existe plusieurs techniques d'analyse mathématique. Parmi lesquelles on distingue celles des différences finies, des moments, et celles des éléments finis. La structure, à définir (de dimension XL, YL, ZL), est divisée en cellules de tailles constantes, dont lesquelles le champ électrique est considéré comme uniforme (constant). Sa valeur est attribuée au centre (fig.II.1) de chaque cellule. On aura, alors, à définir 3 inconnus pour chaque cellule. Il s'agit des trois composantes du champ électrique. Pour la structure entière (composée de n cellules), on aura à résoudre un système linéaire de 3n équations à 3n inconnues.

Le calcul de la résistivité a été, ainsi, fait par adaptation à nos données d'un programme appelé "PGELEC-3D" basé sur la méthode des éléments finis. Ce programme a été mis au point par TABBAGH et al (1994). Les calculs ont été effectués pour plusieurs structures, situées dans la deuxième couche, d'un modèle tabulaire à trois terrains. Cette modélisation a été faite dans le cas de la prospection de résistivité et de polarisation provoquée.

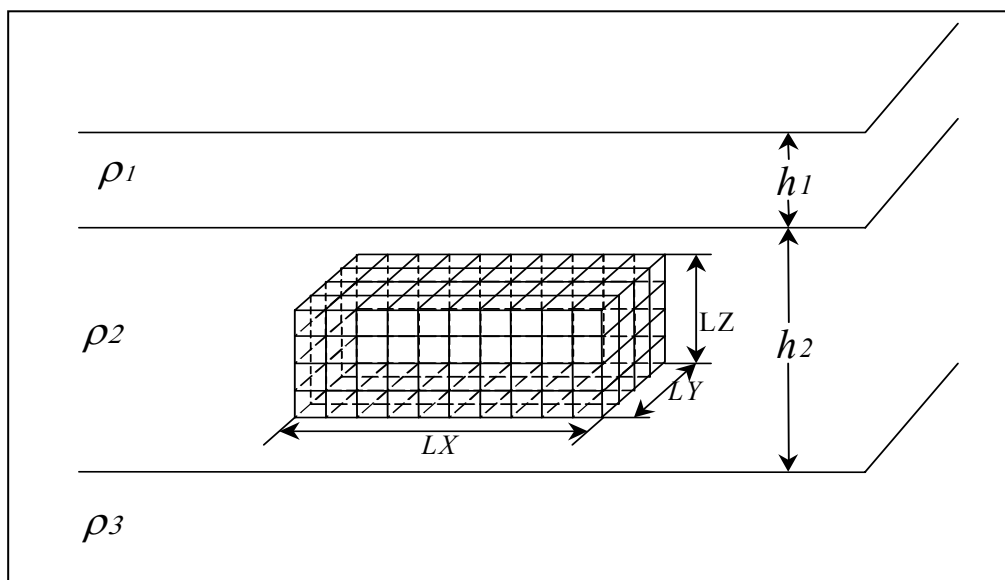


Figure II.1 : Présentation des paramètres du modèle.

II . 1. 2 Etude des cas synthétiques

La cartographie électrique s'appuie sur des mesures de résistivité ou de chargeabilité des sols. C'est un outil qui permet de mettre en évidence la variabilité horizontale des sols à grande échelle. Ainsi présentés, les modèles de résistivité et de chargeabilité, utilisent diverses configurations d'électrodes. Ceci aide à analyser les anomalies théoriques, créées par des structures rencontrées en prospection. Pour cela, plusieurs modèles ont été définis et choisis afin d'assurer une meilleure représentation des structures répondues dans la nature :

- Le premier modèle est représenté par une structure conductrice (dyke) affleurante et chargeable, de résistivité $25 \Omega.m$, de chargeabilité $\eta = 80 \text{ mv/v}$ et de 10 m d'épaisseur. l'étendue de cette structure a trois dimension est de 40m suivant l'axe des z et de 150m suivant y. Ce conducteur est noyé dans un encaissant résistant ($200 \Omega.m$) et peu chargeable (fig.II.2).

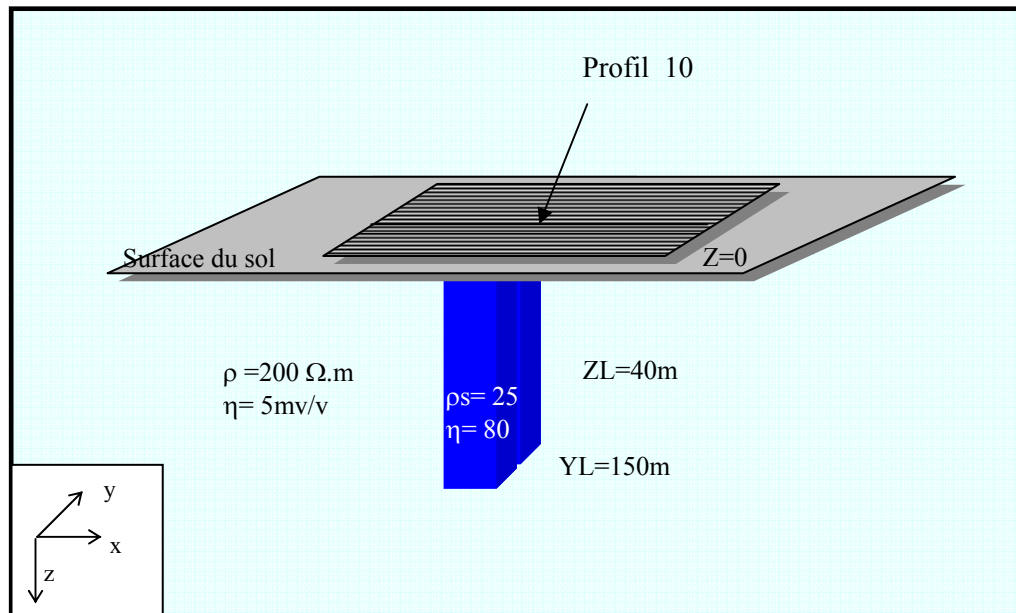


Figure II.2 : paramètres du modèle théorique correspondant à un demi-espace comportant une structure conductrice affleurante : dyke (échelle non respectée).

- Cette même structure conductrice, est placée à 10m sous une couverture résistante ($200 \Omega.m$) et de chargeabilité 10 mv/v . Par ailleurs, elle se trouve dans un milieu de $1000 \Omega.m$. Ce schéma constitue le deuxième modèle (fig.II.3).

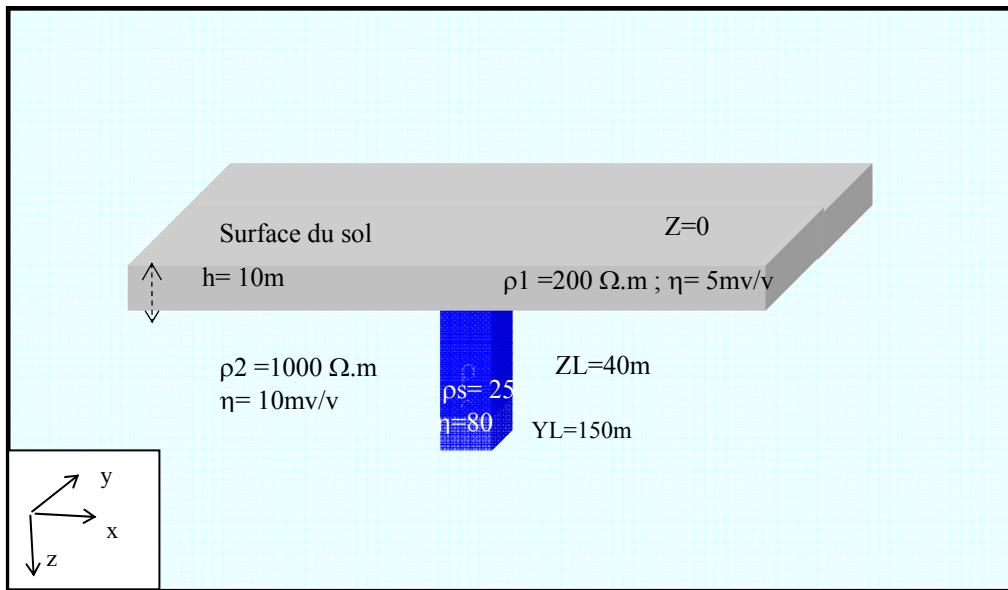


Figure II.3 : Modèle théorique représentant une structure conductrice sous une Couverture résistante.

- Un troisième et dernier modèle a été choisi. Il est représenté par deux structures : la première conductrice (10 Ω.m) présentant des sulfures, de forme L. Elle a une épaisseur de 10m. Son toit se trouve à 20m de profondeur. La seconde résistante (1000 Ω.m) est de forme cubique, de même chargeabilité que la première. Ces deux structures se trouvent dans un milieu résistant de 200 Ωm (fig.II.4).

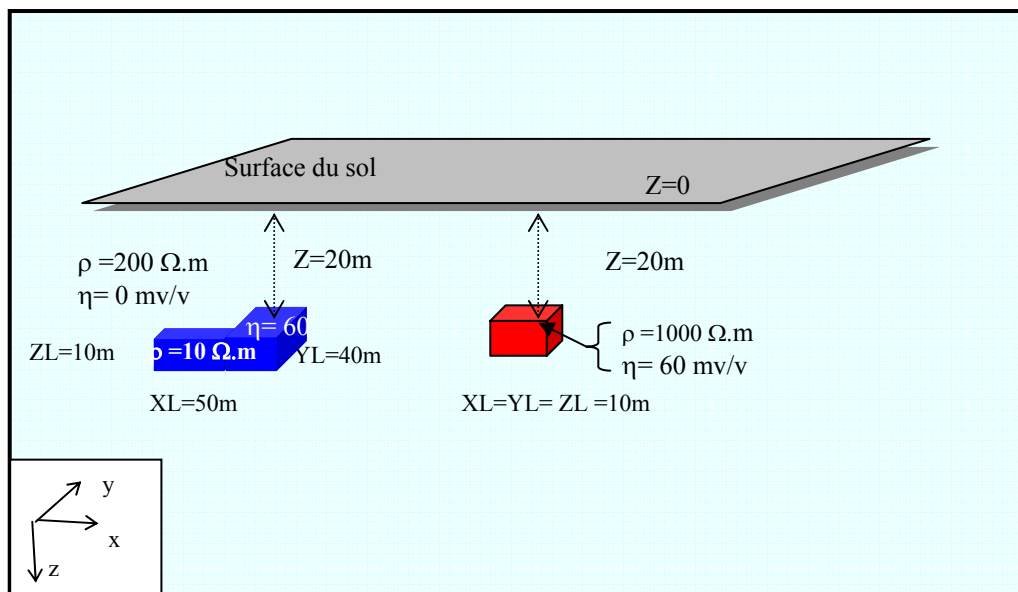


Figure II.4 : Modèle d'un demi-espace comportant deux structures, l'une résistante de forme cubique, et l'autre conductrice de forme L

II.3- Présentation et Discussion des résultats :

D'un point de vue méthodologique, les mesures électriques (résistivité et chargeabilité) ont été calculées à partir des modèles connus (II.2, II.3, II.4) en utilisant cinq différentes configurations d'électrodes. Il s'agit de Wenner-Schlumberger, pôle-pôle, dipôle-dipôle, pôle-dipôle et le dispositif rectangulaire (Fig.I.2). Les résultats sont représentés par les figures: II.5, II.6 et II.7.

On se donne une zone carrée de 200 m de côté, la maille est de $10 \times 10 \text{m}^2$ sur un sous sol homogène. A partir des trois modèles synthétiques, on se propose d'illustrer à l'aide de la cartographie de la résistivité et de la chargeabilité apparente les variations engendrées par ces structures. En plus de la variation de ces deux paramètres, on donne les représentations selon un profil de la résistivité et de la chargeabilité.

a) – Dispositif Wenner- Schlumberger :

L'anomalie apparaît sous forme de plusieurs structures parallèles dans les trois cas (Fig.II.5a, II.6a, II.7a). Cela est dû probablement à l'effet de bord du conducteur. Il est clair que ce dispositif est sensible uniquement aux structures conductrices et les formations tabulaire

b) – Dispositif Pôle- pôle :

Dans les trois cas (Fig II.5b, II.6b, II.7b), il renseigne bien sur la position et la géométrie des structures résistantes et conductrices.

c) – Dispositif Dipôle – dipôle :

Ce dispositif a une grande capacité de détecter les structures résistantes et conductrices, en donnant avec une grande précision leurs géométries et leurs positions. Il définit ces structures par leurs vraies propriétés électriques.

d) – Dispositif Pôle – dipôle :

C'est un dispositif asymétrique car l'une des électrodes d'émission est mise à l'infinie. Ceci peut décaler la position du corps. Les anomalies de résistivités et de chargeabilités apparentes sur les deux cartes (résistivité et chargeabilité) sont asymétriques.. Une méthode pour éliminer l'effet de cette asymétrie est de refaire les mesures avec les électrodes disposées de la façon inversée.

e) – Dispositif Rectangulaire :

Il se caractérise par une grande profondeur d'investigation. Il donne de bons résultats concernant la position et la géométrie des corps, qu'ils soient résistants ou conducteurs, il est mieux conseillé pour les structures allongées où il donne une bonne résolution latérale.

En résumé, on peut dire que, d'après l'analyse des cartes de résistivités et de chargeabilités, la présence de structures de dimensions finies, tels que : dyke, filons ou structures cubiques est facilement détectable. On remarque alors, selon leur nature, une augmentation ou une diminution brutale de la résistivité apparente, d'où la présence d'anomalies. L'amplitude de ces anomalies nous renseigne sur la taille et la nature de la structure. On peut également détecter le contraste entre les propriétés physiques caractérisant la structure et l'encaissant.

Compte tenu des résultats précédents, on peut dire que les dispositifs, Dipôle – dipôle et rectangulaire sont les mieux conseillés pour la détection des structures de dimensions finies du sous-sol.

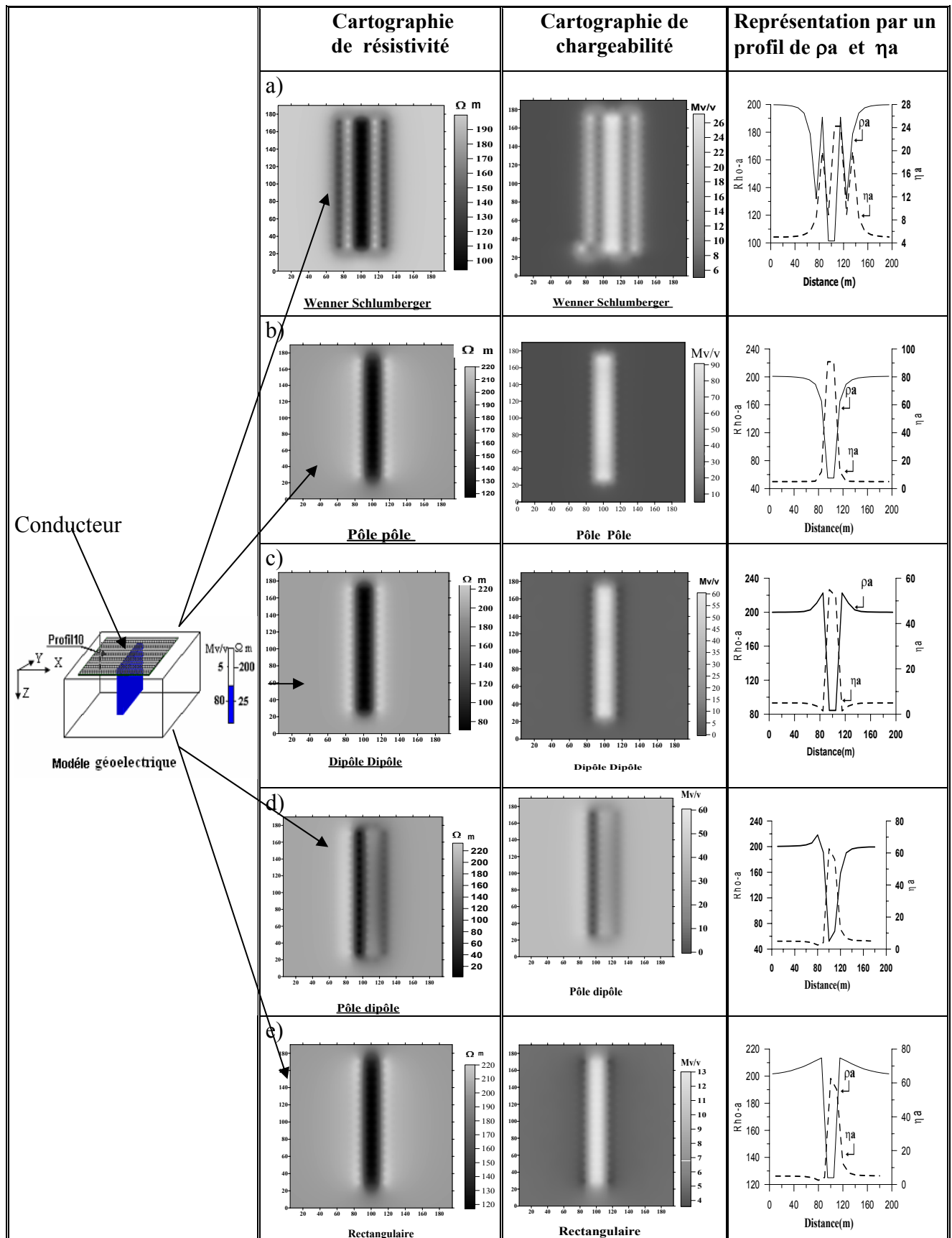


Figure II.5 : Résultats obtenus à partir de la modélisation 3D d'un dyke ($L_x = 10$, $L_y = 150m$, $L_z = 40m$) obtenus avec diverses configurations d'électrodes, $a = 10$ m) et une représentation graphique le long du profil 10.

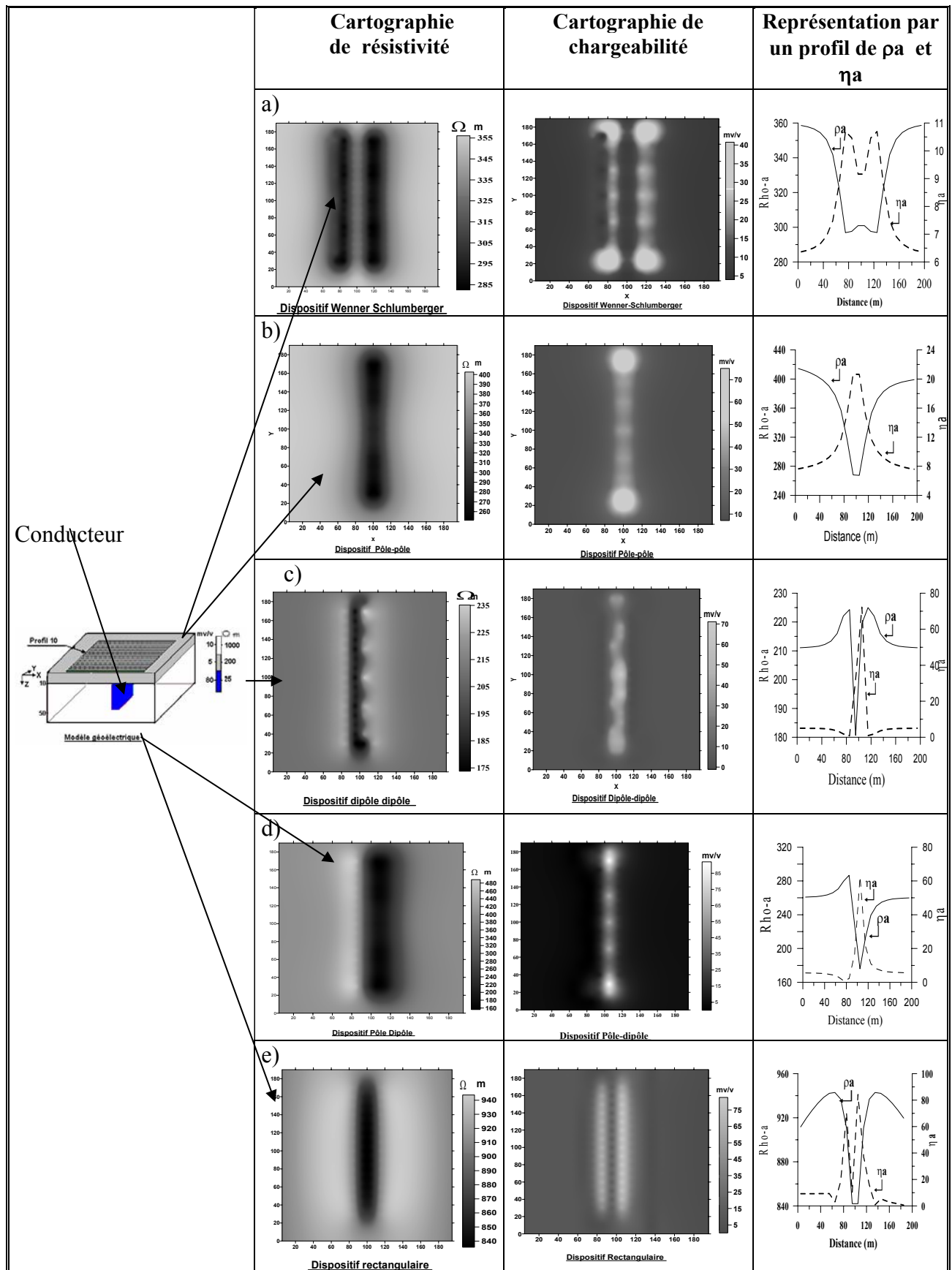


Figure II.6 : Résultats obtenus à partir de la modélisation 3D d'un dyke ($L_x = 10$, $L_y = 150m$, $L_z = 40m$) à la profondeur de 10m, obtenus avec diverses configurations d'électrodes, $a = 10m$) et une représentation graphique le long du profil 10.

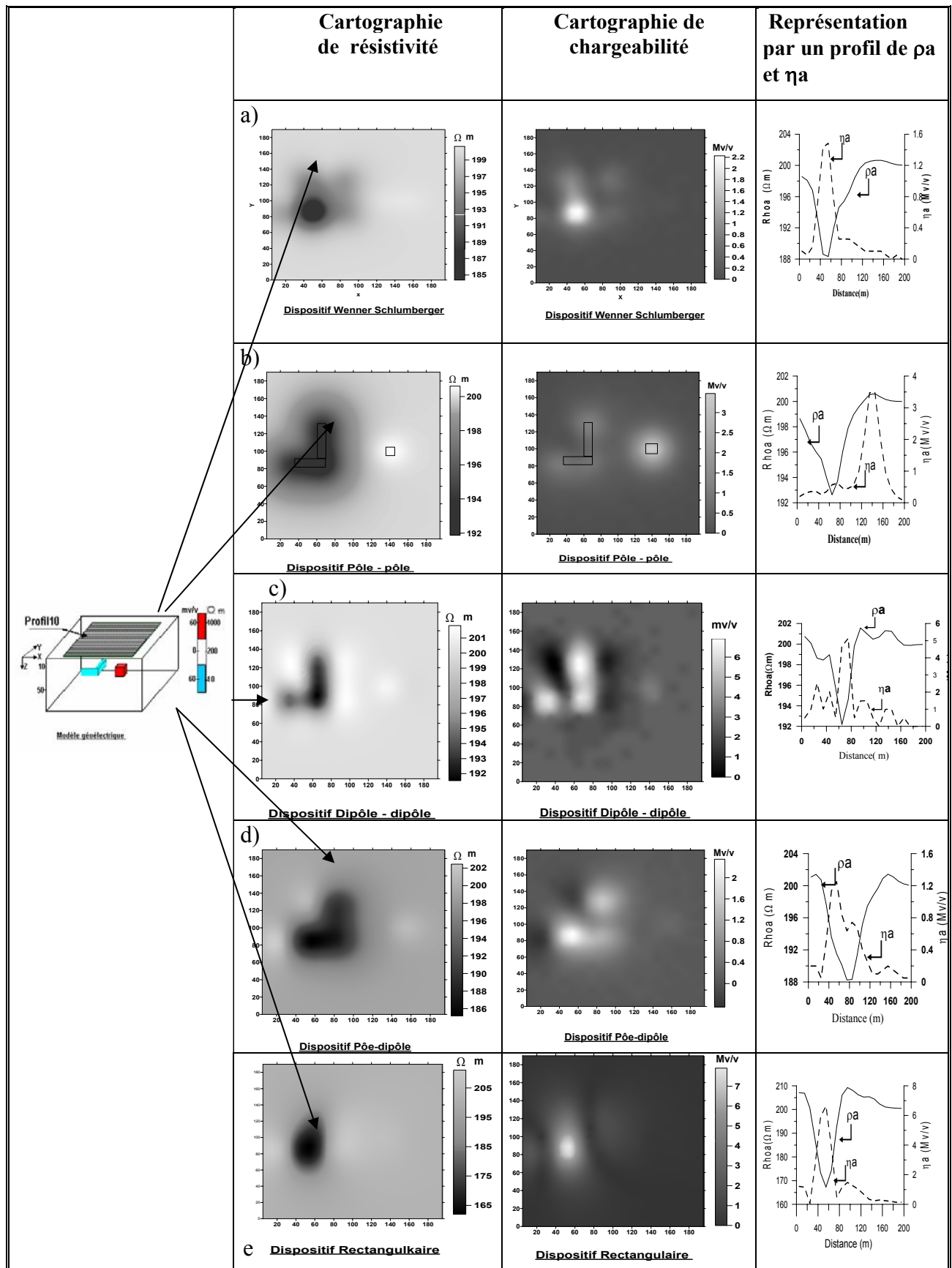


Figure II.7 : Résultats obtenus à partir de la modélisation 3D de deux corps l'un résistant et l'autre conducteur, obtenus avec diverses configurations d'électrodes, $a=10$ m) et une représentation graphique le long du profil 10.

II – 2 Transformation des cartes de résistivité électrique en cartes VLF-EM

II . 2. 1 Introduction

La détection des structures est l'objectif de toute prospection géophysique, l'interprétation d'une carte de résistivité électrique est très limitée dans le domaine 3D, elle nous renseigne seulement sur la position, la forme et la direction de l'anomalie. Par ailleurs, elle nous donne une indication sur la résistivité de la structure anormale. Nous ne pouvons pas déterminer l'extension de la structure à partir d'une cartographie de résistivité électrique.

De nouvelles techniques d'interprétation des données électriques (Djeddi 1998) permettent de délimiter aux mieux l'extension de l'anomalie. A cet effet, une carte nommée pseudo-VLF résultant de la transformation d'une carte de résistivité en prospection électrique en une carte VLF-EM. Sur cette dernière nous appliquons les traitements des données de la VLF-EM. Parmi ces traitements, nous citons le filtre de dérivation dans le plan horizontal, afin de restituer les dimensions et la profondeur du corps perturbateur comme en VLF-EM. Nous allons appliquer ce filtre à des données théoriques et expérimentales. Par conséquent, Il est utile de donner l'équation générale de la transformation et de définir le filtre dérivé.

II . 2.2 Relation de la transformation

La transformation est effectuée sur les données de résistivité. Celle-ci est basée sur les équations de Maxwell. La théorie de cette transformation est développée dans les travaux de Djeddi, M. (1998). Nous donnons seulement l'expression finale qui sert à effectuer la transformation :

$$C\delta(\rho^{1/2})/\delta y = P \quad \text{II.1}$$

Avec

- C est une constante dépendant de la profondeur de pénétration.
- P : La pseudo-VLF

Cette équation montre qu'il est possible d'obtenir des données de la VLF-EM par simple dérivation de la résistivité. Par analogie, cette expression est appliquée à la prospection électrique.

II . 2. 3 - Filtre de dérivation

a) - dérivée suivant x

L'application du filtre dérivé dans la direction des X (direction du champ électrique E_x) transforme la carte de la pseudo-VLF en une carte sur laquelle on observe quatre extremums.

Les informations tirées de cette carte sont:

- Les lignes zéro correspondant aux axes de symétrie de la structure, dans le plan XOY.
- La distance séparant deux extremums le long de la direction X, correspondant à l'extension du corps dans cette direction (XL).
- La distance entre deux extremums adjacents, le long de la direction Y est similaire à la distance « peak to peak » observée sur les anomalies VLF. Elle est utilisée pour la détermination de la profondeur de la structure causant l'anomalie.

b) - Dérivée suivant y :

L'application du filtre dérivé dans la direction des Y (direction perpendiculaire au champ E_x) transforme la carte à deux extremums (Pseudo-VLF) en une carte à trois extremums . La largeur à mi-hauteur du maximum sur la coupe, prise à partir de la carte dérivée (Y), parallèle à l'axe des Y, nous donne l'extension de la structure le long de l'axe Y (YL).

II.2.4 Application à un cas synthétique

Le modèle utilisé pour cette transformation est celui de la figure II.2, le calcul de la résistivité électrique a été fait pour un dispositif dipôle- dipôle. La cartographie de résistivité a été calculée pour ce modèle puis transformée pour obtenir la carte pseudo-VLF (II.8b). On observe sur cette carte les deux extremums observés pour une anomalie en VLF-EM

Après avoir appliqué le filtre de dérivé dans les deux directions X et Y, à la pseudo-VLF (fig.II.9 et II.10), les dimensions déterminées à partir des cartes dérivées sont $XL=9m$, $YL=150m$, et la profondeur du toit de la structure est estimé d'après l'abaque donné par Baker et Mayer et développé (fig.II.11) par Djeddi dans le cas d'un modèle synthétique 3D (fig. II.2). Elle donne la relation entre Δx et la profondeur, elle est tirée empiriquement, a et b sont respectivement les dimensions du corps dans les direction X et Y.

L'information apportée pour la détermination de la géométrie de la structure est acceptable comparativement aux dimensions réelles. Cette interprétation est valable seulement quand la profondeur du toit est plus petite ou égale à la plus petite des dimensions de la structure dans le plan XY (Djeddi, 1998). La carte transformée un effet de même fréquence (la dérivé s'annule a cet endroit) , il est préférable de faire la simulation par partie.

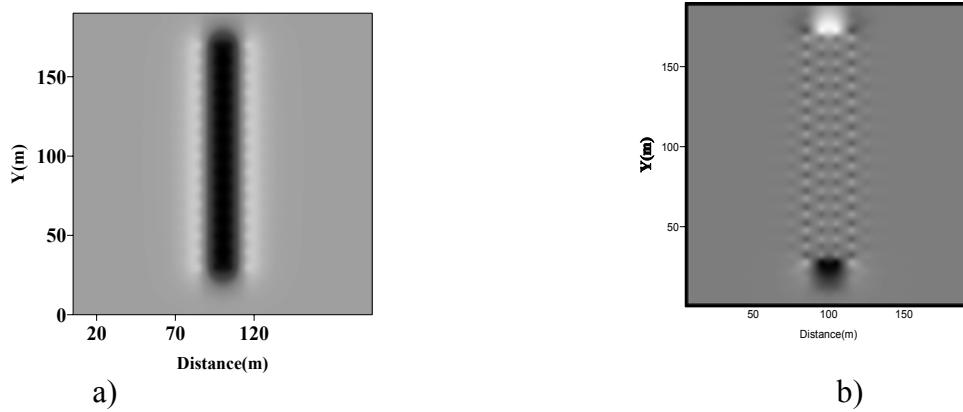


Figure II.8 Carte de : a) résistivité pour une structure conductrice. b) Pseudo-VLF.

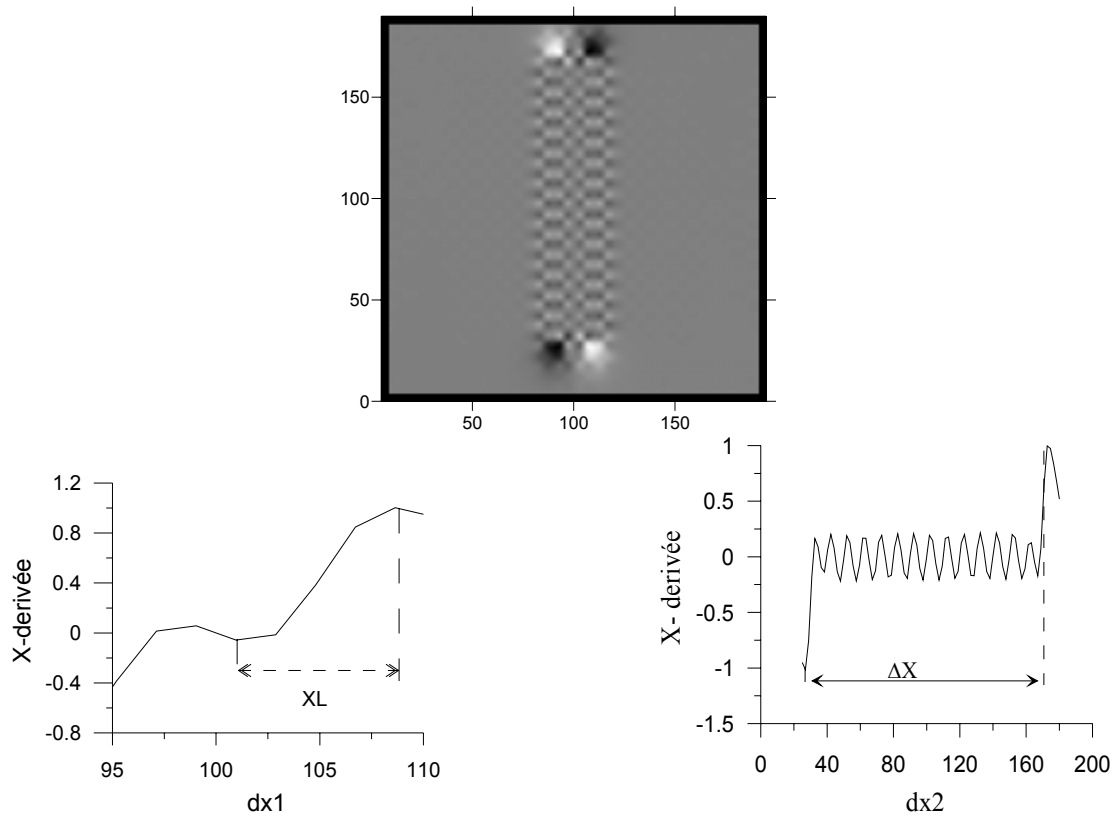
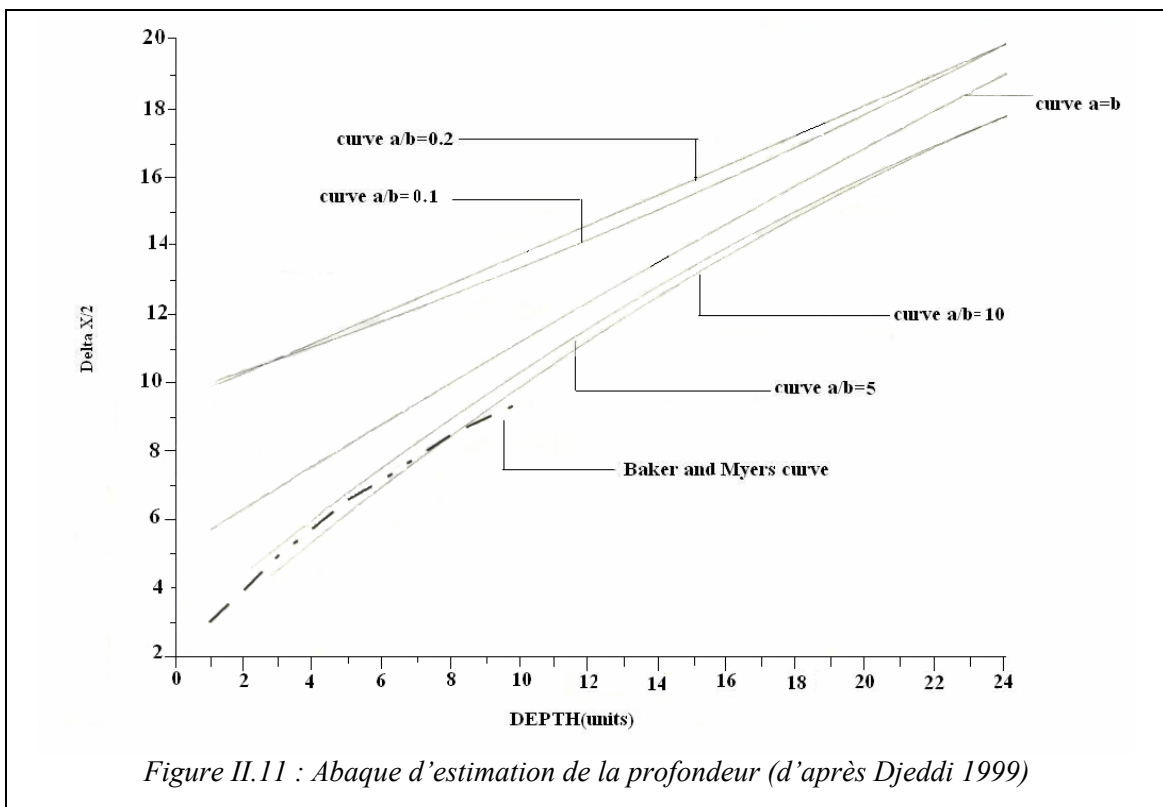
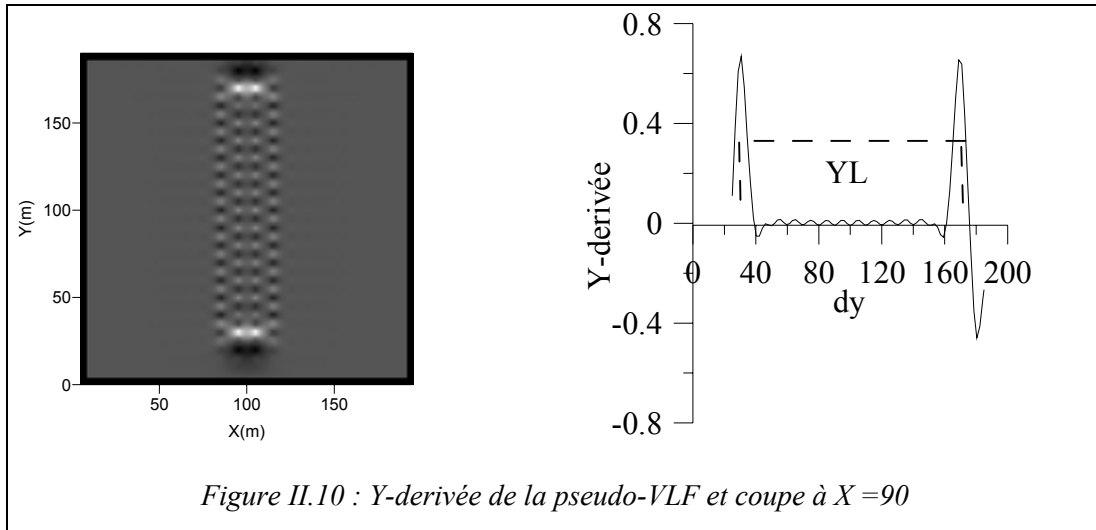


Figure II.9 : X-derivée de la pseudo-VLF et coupe suivant $X=90$ et $Y=25$



Chapitre III

Identification des structures 2D par modélisation et inversion

Chapitre III

Identification des structures 2D par modélisation et inversion

III.1	Introduction.....	37
III.2	Théorie d'inversion.....	37
III.2.1	Introduction	37
III.2.2	Formulation du problème inverse et problème direct	38
III.2.3	Solution du problème inverse.....	38
III.2.4	Non linéarité.....	40
III.3	Tomographie électrique.....	40
III.3.1	Introduction.....	40
III.3.2	Représentation graphique.....	40
III.4	Application à des cas synthétiques.....	42
III .4.1	Présentation des modèles	42
III .4.2	Résultats et discussions	42
III .4.2.1	Résultats électriques.....	43
III .4.2.2	Résultats électromagnétiques.....	54
III .4.2.3	Conclusion.....	54
III. 5	Application de l'indice DOI (Depth Of Investigation) à l'imagerie électrique 2D pour les sous-sols à forts contrastes de résistivité	58
III.5.1	Introduction	58
III.5.1	Exemple d'application.....	58
III. 5. 2 .1	Cas synthétique.....	58
III. 5. 2 .2	Cas réel.....	61

III.1 Introduction

Des cartes de résistivité et de chargeabilité apparentes ont été complétées par une étude 2D donnant la répartition verticale et latérale de la résistivité électrique des sols par l'imagerie électrique, appelée aussi tomographie électrique. Les techniques VLF et VLF-R ont été aussi appliquées. Après de brefs rappels théoriques sur les inversions et la tomographie électrique, nous proposons d'imager un milieu synthétique contenant plusieurs hétérogénéités, en acquérant des données de résistivité et de chargeabilité grâce à une modélisation numérique des phénomènes électriques par éléments finis (Loke 2001).

Pour la méthode électromagnétique, nous avons utilisé un programme modélisation établi par Edsen N.A. et Niessen J., 1997. Ce programme permet de calculer, par la méthode VLF et VLF-R, la réponse d'un corps ayant des propriétés différentes de celles du milieu encaissant. Le but de ces deux modélisations est d'extraire, à partir des données électriques et électromagnétiques, l'information concernant la géométrie et les paramètres électriques (résistivité, chargeabilité électrique..). Le traitement de données électriques est fait à l'aide d'un programme, établi par Loke et Barker, 1995-2003, qui déterminera automatiquement par une méthode itérative (Loke et Barker 1995 et 1996a), un modèle bidimensionnel (2-D) de résistivité ou de chargeabilité.

III.2 Théorie de l'inversion

III.2.1 Introduction

Les méthodes géophysiques ont pour but d'étudier l'hétérogénéité du sous sol et d'en caractériser la structure à partir des mesures qui se font, généralement, depuis la surface. Néanmoins, il est difficile d'utiliser ces mesures pour décrire, de manière quantitative les propriétés du sous-sol. Un traitement est, donc, nécessaire afin d'obtenir un résultat exploitable.

La tomographie est destinée à avoir la variabilité latérale et verticale du sous-sol à travers les paramètres physiques qui le caractérisent. Sa signification est d' imager les tranches d'une structure. L'image de cette structure géologique peut être modélisée en utilisant un logiciel 2D : c'est **l'inversion tomographique** dont la réponse est conforme le mieux possible, aux données mesurées. Une brève description du problème inverse et de sa solution sont présentées dans ce chapitre. La terminologie, la notation et la dérivation des équations sont prises de Menke (1989).

III.2.2 Formulation du problème inverse et du problème direct

Le problème direct en géophysique consiste à calculer la réponse d'une structure du sous sol. Par contre, le processus d'inversion ou le problème inverse permet la reconstruction de la structure profonde à partir de données mesurées en surface. Ce type de traitement est nécessaire si l'on souhaite exploiter de manière quantitative les mesures effectuées en utilisant toutes les informations disponibles. La résolution du problème inverse par la méthode des moindres carrés est, sans doute, une des solutions les plus fréquemment utilisées en géophysique, bien que d'autres méthodes de résolution existent : méthodes ART (Algebraic Reconstruction Technique) et Rétro Projection. Toutefois, la solution n'est pas unique. En effet, la qualité du modèle obtenu dépend fortement de la quantité et de la qualité des informations introduites dans le processus d'inversion. L'algorithme par moindres carrés à contraintes de lissage est appliqué à des données de résistivité et de polarisation provoquée synthétiques, pour des structures 2D, ainsi qu'à des mesures de terrain.

On peut encore schématiser la relation entre le problème direct et le problème inverse comme suit :

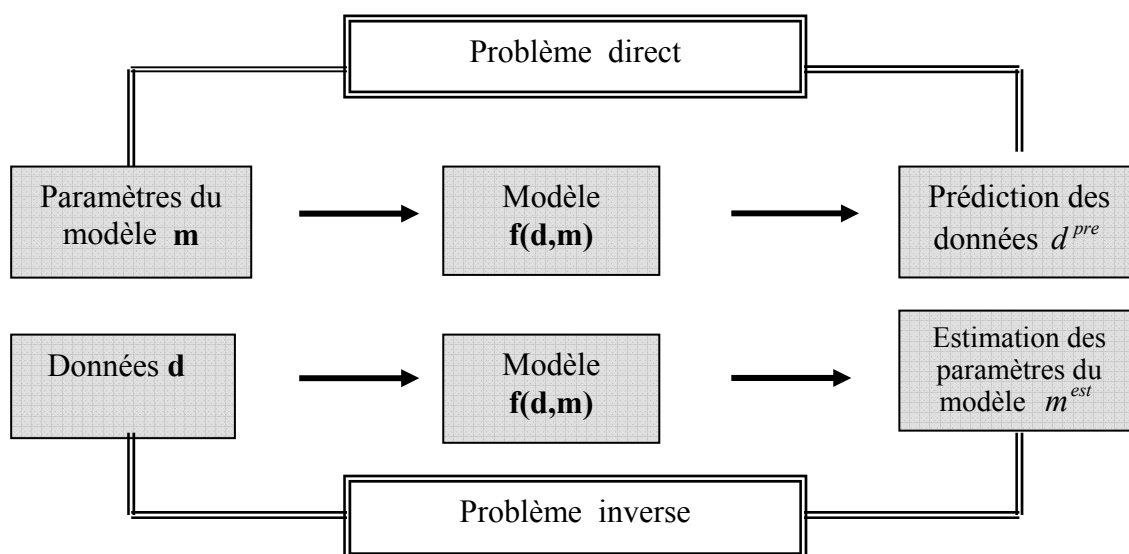


Figure III.1 : Définition des problèmes direct et inverse

III.2.3 Solution du problème inverse

En géophysique, le problème inverse se réduit à déterminer un modèle qui minimise l'écart entre les données calculées $f(\mathbf{m})$: $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_p)$ étant le vecteur des paramètres à estimer ; et les n observations que l'on appellera $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. L'équation III.1

donne une relation linéaire entre les données observées et les paramètres modèles inconnus.

$$\text{On a} \quad d = Gm \quad (\text{III.1})$$

Avec G est la matrice de sensibilité (ou matrice des dérivées partielles ou le Jacobien).

En d'autres termes, on souhaite calculer des réponses se rapprochant le plus possible des observations. Cet écart peut s'illustrer par le vecteur erreur $e = d - f(m)$. Habituellement, on cherche à minimiser la somme des écarts (la somme du carré des écarts dans le cas d'une minimisation par moindres carrés) entre les données observées et calculées (Menke 1989).

$$\Phi = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_i^{cal})^2 \quad (\text{III.2})$$

c'est à dire, la fonction Φ qu'on appelle fonction objectif (notation matricielle) :

$$\Phi = e^T e = (d - f(m))^T (d - f(m)) \quad (\text{III.3})$$

$$\Phi = e^T e = (d - Gm^{est})^T (d - Gm^{est})$$

Où T est la matrice transposée.

La racine carrée de ce terme divisée par le nombre d'observations est connue sous le nom d'erreur quadratique moyenne ou erreur RMS (Root Mean Square error). La minimisation de la fonction Φ consiste à chercher le zéro de son gradient ($\partial\Phi/\partial m = 0$). On obtient une matrice carrée pour les paramètres du modèle inconnu :

$$G^T Gm^{est} - G^T d = 0 \quad (\text{III.4})$$

Supposant que $(G^T G)^{-1}$ existe, ce qui donne la solution de :

$$m^{est} = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (\text{III.5})$$

En ce qui est de la solution du problème inverse $Gm = d$, la solution obtenue est alors unique avec un vecteur d'écart nul entre les données mesurées et ceux calculées. Cette situation n'arrive jamais en science expérimentale car les données mesurées sont toujours entachées d'erreurs. Le problème peut être sous-déterminé si le nombre de paramètres à estimer sera plus important que le nombre d'observations dont on dispose. Ainsi, il apparaît une ambiguïté du fait que le modèle de paramètres estimé n'est pas unique, car le système linéaire de l'équation (III.5) comporte plus d'inconnues (m) que d'équations ($f(m)$). Il est surdéterminé, dans le cas contraire. Par

conséquent, une infinité de solutions existe. Ce type de problème est résolu en introduisant des informations afin de sélectionner la solution la plus probable.

III.2.4 Non linéarité

Dans la plupart des applications géophysiques, les fonctions modèles sont non linéaires. Pour les rendre linéaires, on effectue un développement en série de Taylor autour d'une solution estimée m^{est} (modèle de départ). La non linéarité est donnée par $g(m)=d$ et la linéarisation des fonctions (modèle) est donnée par :

$$\Delta d = \hat{G} \Delta m \quad (III.6)$$

$$\text{Où } \Delta d = d^{obs} - g(m^{est}), \quad \hat{G} = (\partial g / \partial m^{est}) ; \quad \Delta m = m - m^{est}$$

Δd est un vecteur contenant les différences entre la réponse calculée du modèle et les données observées. L'équation (III.6) doit être résolue itérativement avec un nouveau paramètre du modèle estimé pour une différence de données Δd .

III.3 Tomographie électrique

III.3.1 Introduction

Le paramètre physique principal utilisé dans les méthodes électriques est la résistivité électrique ou son inverse, la conductivité électrique. Ces dernières années, la tomographie 2D et 3D de résistivité a été largement employée dans la géophysique de l'environnement. Nous nous intéressons aux travaux de Loke et Barker (1995-2001). Ils ont développé des algorithmes d'inversion 2D et 3D, basés sur la méthode des moindres carrés avec contrainte de lissage. A la première itération, un modèle homogène est utilisé comme point de départ pour lequel les valeurs des dérivées partielles des résistivités apparentes (coefficients de sensibilité) peuvent être calculées analytiquement. Pour les itérations suivantes, une méthode quasi-newtonienne est utilisée pour estimer les dérivées partielles, ce qui réduit le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaire. Cet algorithme est appliqué aux méthodes de résistivité et en polarisation provoquée.

III.3.2 Représentation graphique des coupes de résistivité et de chargeabilité

Les pseudo- coupes sont représentées à l'aide d'un programme de modélisation (Loke 1995-2002) en résistivité et chargeabilité apparentes, de n'importe quelle structure. L'inversion

de ces données permet d'établir une coupe de résistivité vraie en fonction de la profondeur, elle est interprétable en terme de formation géologique.

Le logiciel d'inversion 2D découpe l'espace en blocs dans le plan (x,z). La figure (III.2) montre un arrangement des blocs du modèle et les positions des points de mesures. Donc l'inversion consiste à ajuster la résistivité ou la chargeabilité de chaque bloc afin de minimiser la différence entre les valeurs calculées et mesurées. Cette erreur est donnée par l'erreur quadratique (RMS), paramètre utilisé pour évaluer la qualité d'inversion. Elle sera satisfaisante lorsque deux itérations successives donne un RMS qui ne varie pas de façon significative.

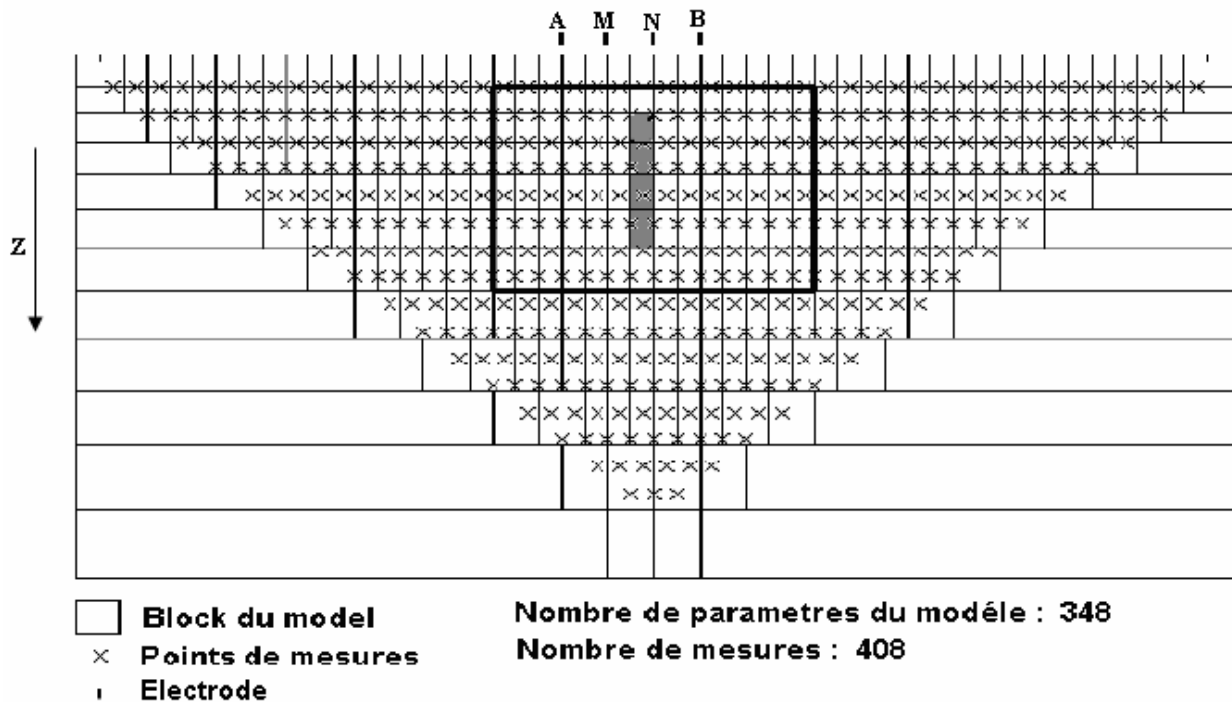


Figure III.2. Diagramme schématique d'un modèle (dyke) ainsi que l'arrangement des blocs employés par le programme d'inversion.

Le problème inverse traité ici est non linéaire et la méthode des moindres carrés avec contrainte de lissage (Groot-Hedlin et Constable, 1990) utilisée dans RES2DINV a la forme suivante:

$$\Delta m_i = [J_i^T J_i + \lambda_i S^T S]^{-1} J_i^T \Delta d_i \quad (\text{III.7})$$

Avec

- i : Représente le nombre d'itérations
- Δd_i : Le vecteur qui contient les différences entre les logarithmes des valeurs de résistivités apparentes mesurées et calculées.
- λ_i : Facteur de régularisation.
- Δm_i : Le vecteur de perturbation du paramètre modèle pour la i^{me} itération (Loke et

- Barker, 1995).
- S : Paramètre de lissage (Sasaki, 1992).

L'algorithme d'inversion peut être divisé en cinq étapes principales :

- Calcul des résistivités apparentes, $\rho_{a,i}$ pour un modèle initial avec des résistivités ρ_i
- Calcul du vecteur $\Delta d_i = \rho_{a,i}^{est} - \rho_a^{obs}$ où $\rho_{a,i}^{est}$ et ρ_a^{obs} sont les résistivités apparentes calculées et observées, respectivement
- Calcul de la matrice Jacobienne J_i des dérivés partielles des paramètres du modèle.
- Résolution de l'équation des moindres carrés (III.7) pour déterminer le Δm_i vecteur de perturbation du paramètre modèle.
- Estimation de la résistivité du modèle pour chaque bloc par l'utilisation de la formule suivante :

$$\rho_{i+1} = \rho_i + \Delta m_i$$

Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que l'algorithme converge (Loke & Barker, 1995).
vers une solution acceptable (modèle homogène).

III. 4 Application à des cas synthétiques

III .4.1 Présentation des modèles

Nous avons choisi des modèles dans lesquels on connaît l'ensemble des caractéristiques du terrain :

- Les structures établies au chapitre précédent vont servir de support pour calculer les paramètres électriques de différentes configurations se trouvant dans la nature. Rappelons qu'il s'agit de dyke, filon, corps conducteurs et résistants de forme cubique et L (fig.II.2, 3, 4 et fig.III.3e, 5e, 7e). Tous les calculs ont été réalisés sur un profil défini (profil N° 10).
- Couche conductrice minéralisée à l'intérieur d'un milieu résistant.
- Couche résistante minéralisée à l'intérieur d'un milieu moins résistant.
- Une faille afin de générer une anomalie.

III .4.2 Résultats et discussions

Les résultats obtenus par modélisation et inversion pour les cas synthétiques sont présentés par les figures III.4 à III.10

III .4.2.1 Résultats électriques

Les données de la méthode électrique permettent d'estimer à différentes profondeurs la résistivité et la chargeabilité électrique apparente le long d'un même profil, et de visualiser les résultats sous la forme d'une pseudo section. Un graphe selon ce profil présente la distribution verticale des résistivités et des chargeabilités observées et les résistivités vraies (interprétées) ($\rho=f(x)$) et $\eta=f(x)$). Pour cette étude plusieurs configurations d'électrodes sont utilisées afin de comparer les résultats de la modélisation et d'inversion d'un profil électrique 2D. Sur ce même profil on a utilisé les techniques VLF et VLF-R de la méthode électromagnétique. Ces techniques d'interprétations contribuent à l'amélioration de la connaissance du sous-sol.

Les constatations préliminaires entre les coupes de résistivités mesurées (observées) et les résistivités obtenues après inversion (interprétées) nous permettent de dire qu'il est impossible d'interpréter correctement une pseudo section (non inversée). On peut seulement faire quelques hypothèses sur la distribution des résistivités ou de chargeabilités apparentes. Les résultats obtenus par les données synthétiques sont :

- Les pseudos sections de résistivité et de chargeabilités mesurées et les résistivités inversées sont représentées par les figures (III.3) et (III.4) du premier modèle (un dyke conducteur et chargeable). Le profil électrique pour le modèle (1), indique un minimum de résistivité et un maximum de chargeabilité à l'aplomb du conducteur, observés avec toutes les configurations d'électrodes. On remarque également que les valeurs de résistivités sont relativement représentatives des valeurs réelles pour les quatre configurations. Avec le dipôle - dipôle, l'extension de la cible selon z n'est pas bien définie. Ceci est dû, probablement, à l'espacement entre les électrodes. Nous avons, aussi, comparé les graphes de résistivités et de chargeabilités mesurées et interprétées à une profondeur de 9m. On observe l'effet du modèle proposé sur les profils tracés à partir des résistivités et des chargeabilités interprétés.

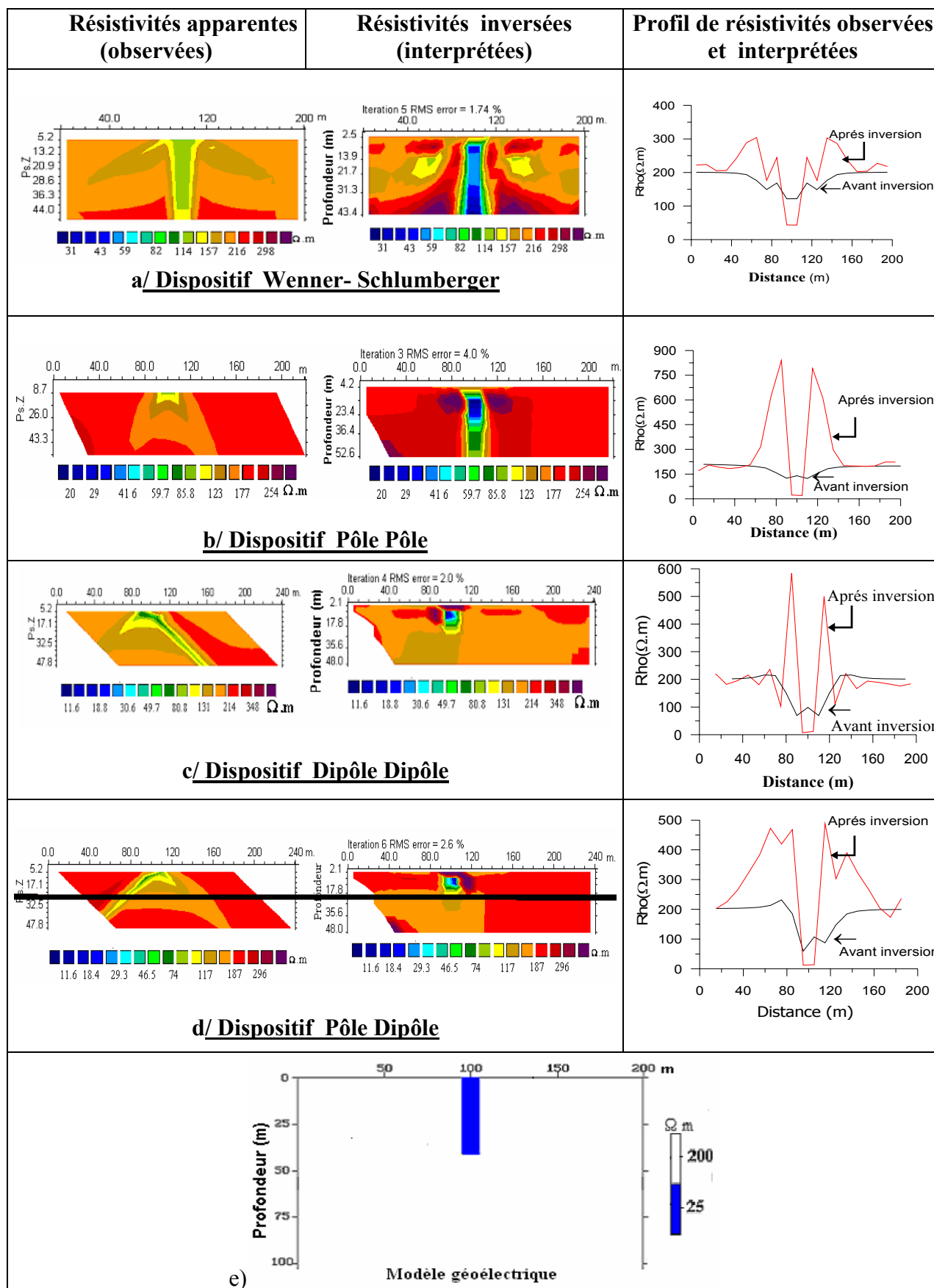


Figure III.3 : Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique observée et interprétée obtenues à partir d'un dyke affleurant avec diverses configurations d'électrodes et un graphe représentant la variation de la résistivité en profondeur.

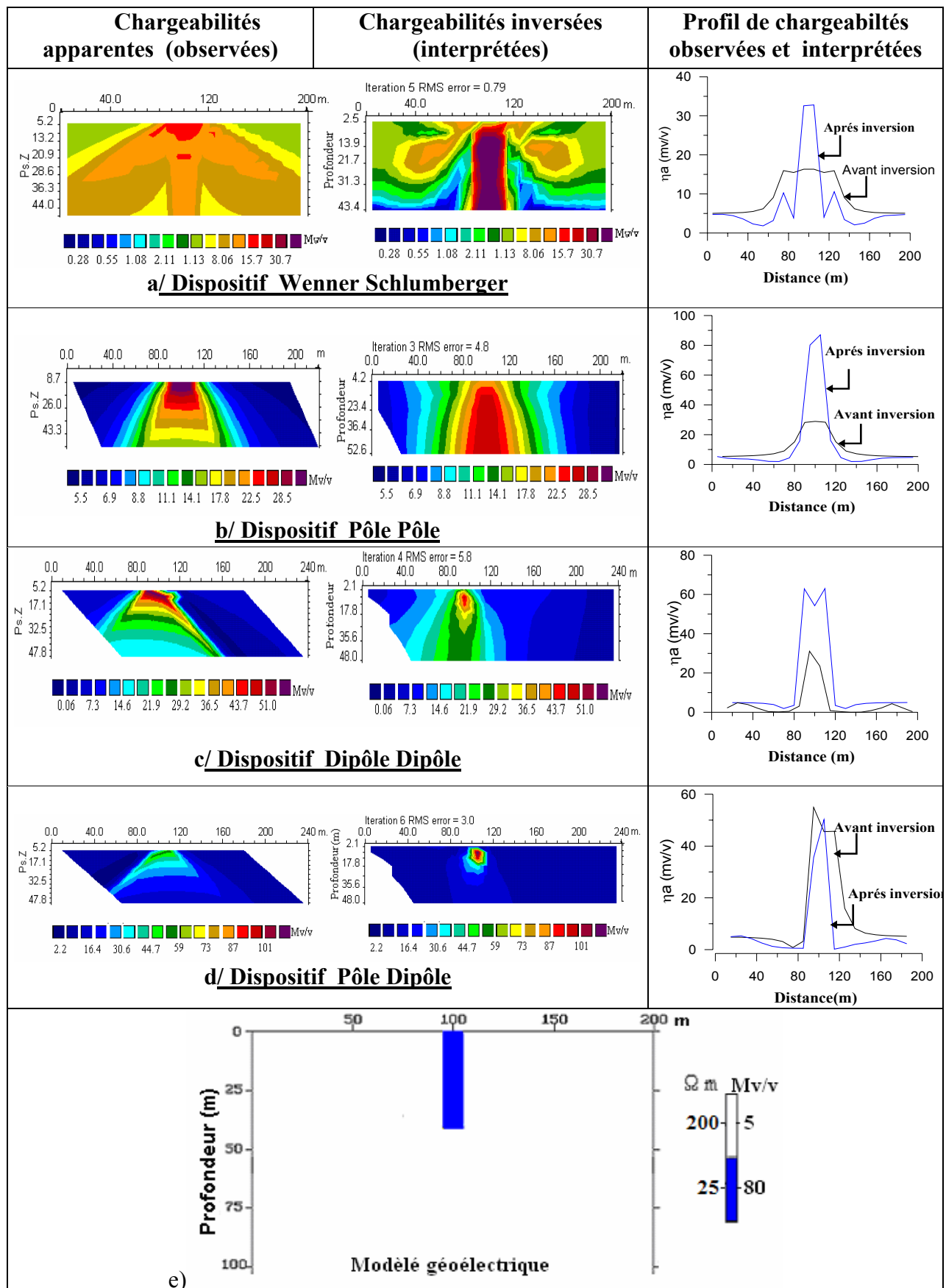


Figure III.4 : Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique observée et interprétée obtenues à partir d'un dyke chargeable et affleurant en surface avec diverses configurations d'électrodes et un graphe représentant la variation de chargeabilité en profondeur

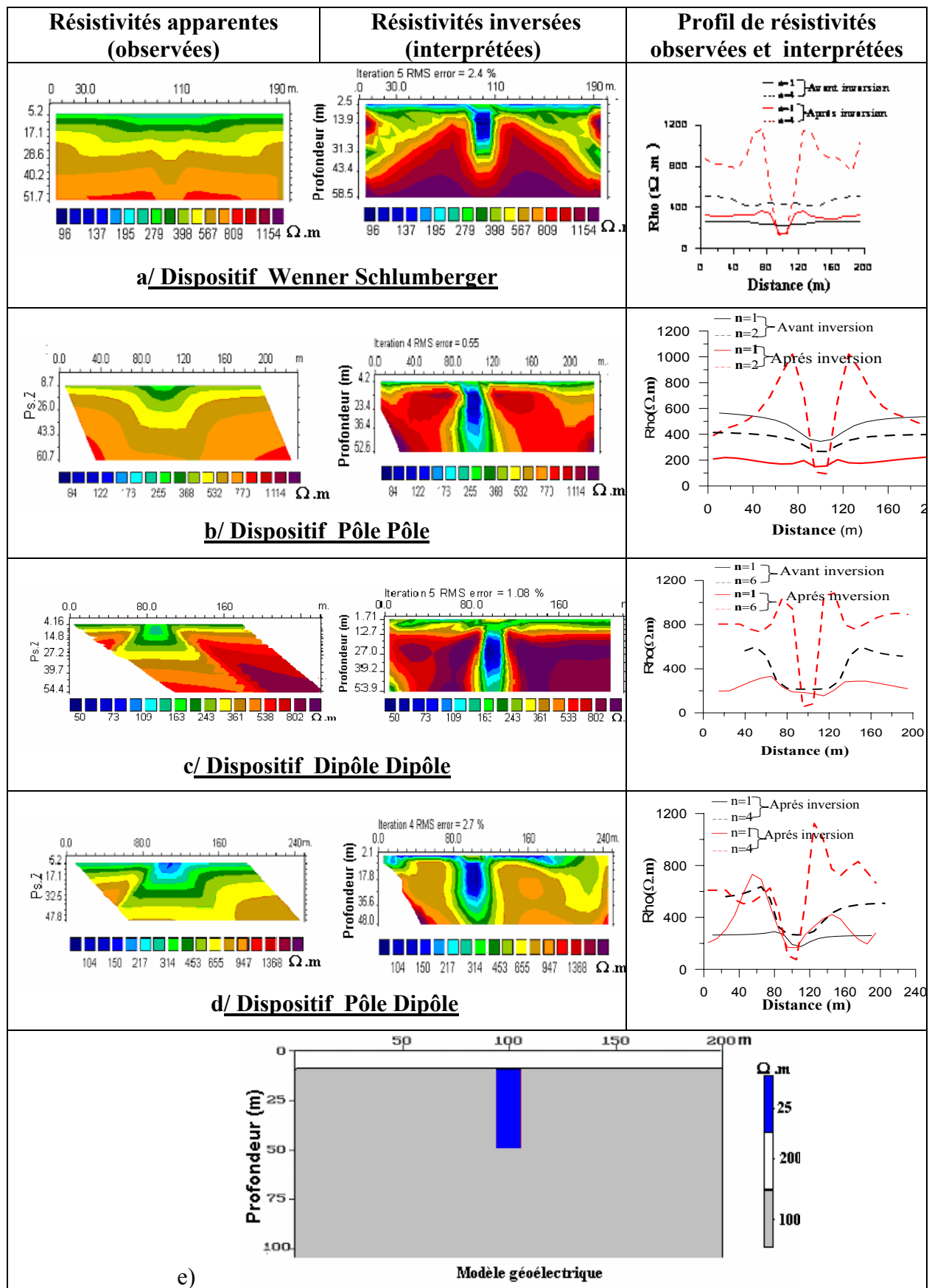


Figure III.5: Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique observée et interprétée obtenues à partir d'un dyke sous une couverture résistante avec diverses configurations et un graphe représentant la variation de résistivités en profondeur.

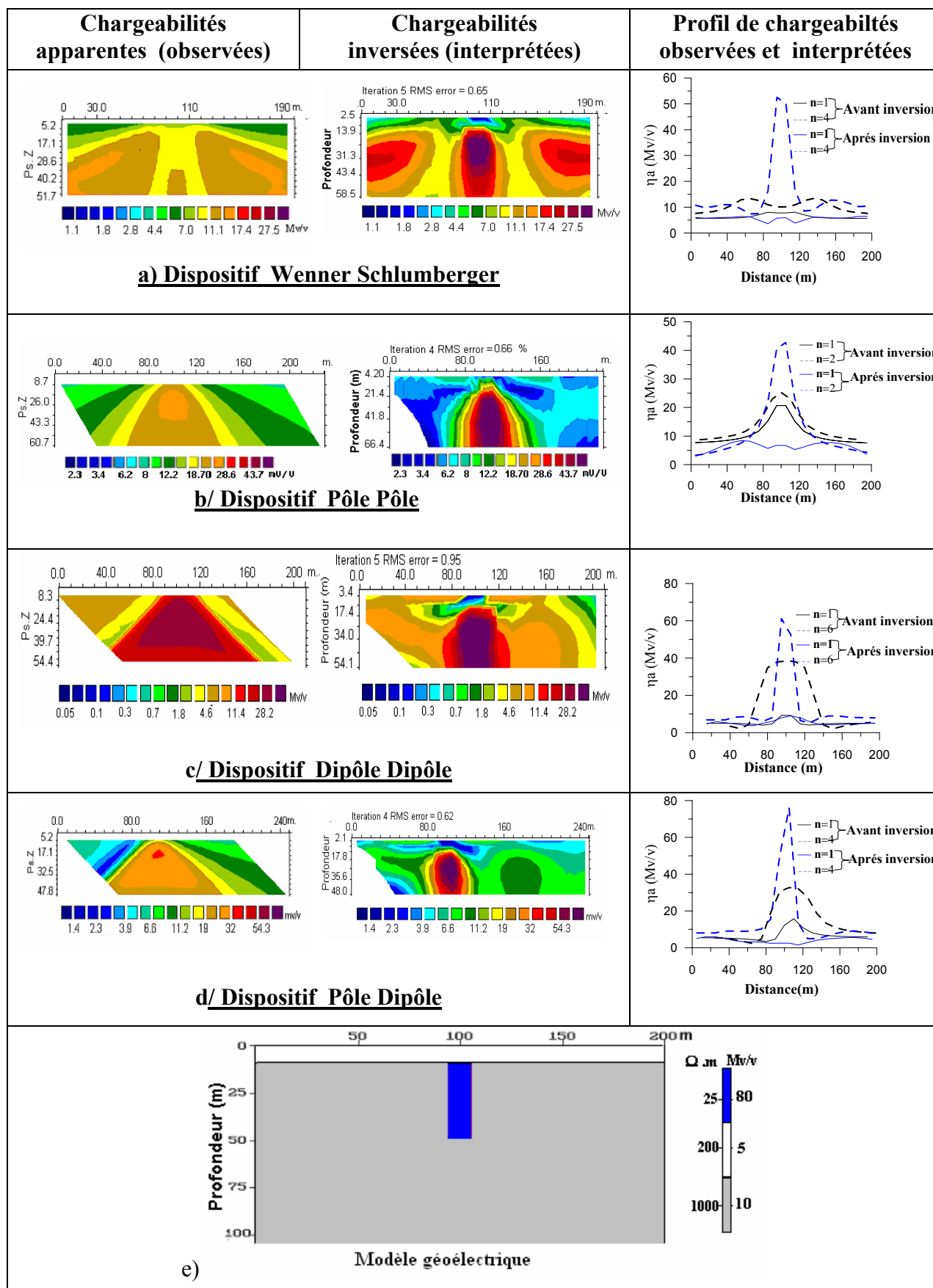


Figure III.6: Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique observée et interprétée obtenues à partir d'un dyke chargeable sous une couverture peu chargeable avec diverses configurations et un graphe représentant la variation de chargeabilité en profondeur.

- L'interprétation du deuxième modèle 2D est illustrée par les figures (III.5) et (III.6). La baisse de résistivité et l'augmentation de la chargeabilité est bien marquée à la position du corps conducteur minéralisé; observées avec les différentes configurations et notamment par le dipôle dipôle et le pôle - pôle. La couverture résistante masque les valeurs réelles de la résistivité et de la chargeabilité du corps minéralisé. La réponse avec le dispositif dipôle dipôle est beaucoup plus proche du modèle initial.

Les graphes représentant les valeurs de la résistivité et de la chargeabilité mesurées et interprétées pour un même profil à des profondeurs variant entre 5m et 17m, montrent bien la présence d'une couche résistante de 200 Ω .m avec les configurations pôle -pôle et dipôle dipôle et d'un corps minéralisé à l'aplomb de la structure.

- On observe à partir des figures (III.7) et (III.8) la réponse électrique causée par la présence de deux corps de dimension, égale à 10m selon les trois directions. Ces deux corps présentent des sulfures disséminés. Les résultats présentés par les sections représentant les valeurs calculées et interprétées montrent clairement la présence des deux corps par les dispositifs dipôle dipôle et pôle-pôle, tandis que les autres dispositifs ne mettent pas en évidence le corps résistant. L'anomalie de la polarisation provoquée est très remarquable, d'autant plus que l'encaissant est peu minéralisé ou stérile. On peut, cependant, observer sur ce profil une variation d'amplitude de la chargeabilité qui s'identifie aux variations latérales des sulfures. L'inversion des chargeabilités apparentes, avec la configuration Wenner-Schlumberger se caractérise par une augmentation de la chargeabilité à l'emplacement du corps résistant avec une géométrie bien définie, contrairement à l'inversion des résistivités apparentes où la présence du corps conducteur n'est pas marquée.

Pour pouvoir visualiser une telle anomalie, il aurait fallu prétendre une maille de mesure plus petite.

Les graphes de résistivité et de chargeabilités tracés à 9m de profondeur confirment bien la présence d'un encaissant résistant et de chargeabilité nulle. Les valeurs du profil interprété sont proches de celles réelles.

- Une interprétation a été effectuée et illustrée par les figures (III.9) et (III.10) pour les modèles représentés par la couche résistante et celle conductrice caractérisée par une épaisseur

de 10m. Les données ont été calculées en utilisant la configuration Wenner - Schlumberger. On note :

- La présence d'une couche conductrice minéralisée où les valeurs de résistivités enregistrées à des profondeurs différentes sont conformes aux valeurs du modèle initial.
- Pour la couche résistante, les résultats de l'inversion ne sont pas concluants. Ceci s'explique par le fait que la profondeur d'investigation maximale du courant dans un milieu résistant est plus faible (Roy et Apparo ; 1971) et que cette couche agit comme un écran si le contraste est trop élevé. Pour la polarisation provoquée, on constate que l'emplacement de la couche minéralisée est décalé.

▪ La méthode d'imagerie électrique a été appliquée sur un modèle représenté par un décrochement de 3m entre le compartiment gauche et le compartiment droit. Le dispositif utilisé est le Wenner avec un espacement de 6m (fig.9c). Le terrain est constitué de deux couches dont la première est une formation d'argiles ($35 \Omega.m$) de 9m d'épaisseur et la deuxième est une formation de sable résistant ($600 \Omega.m$) .

Le modèle obtenu après inversion des données confirme l'existence du décrochement. Notons que sur le graphe de variation des résistivités, l'apparition d'une nette fluctuation sur presque toutes les courbes (4.5m, 11 m, 14 m) à l'exception de la courbe faite à 24m où l'effet disparaît. L'inversion est réalisée avec une correction topographique.

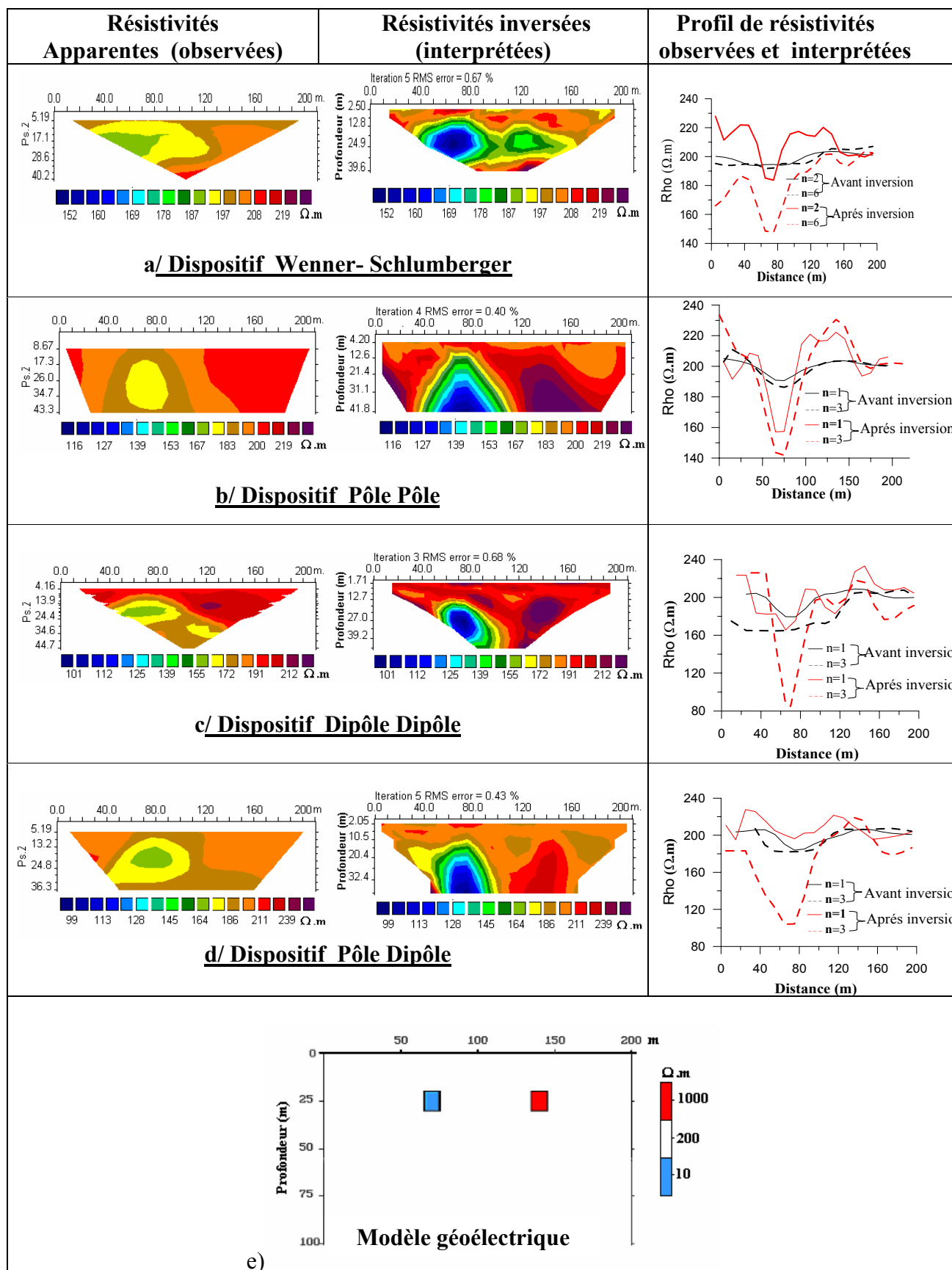


Figure III.7 : Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique observée et interprétées obtenues à partir d'un modèle de deux corps l'un résistant et l'autre conducteur avec diverses configurations d'électrodes et un graphe représentant la variation de résistivité en profondeur.

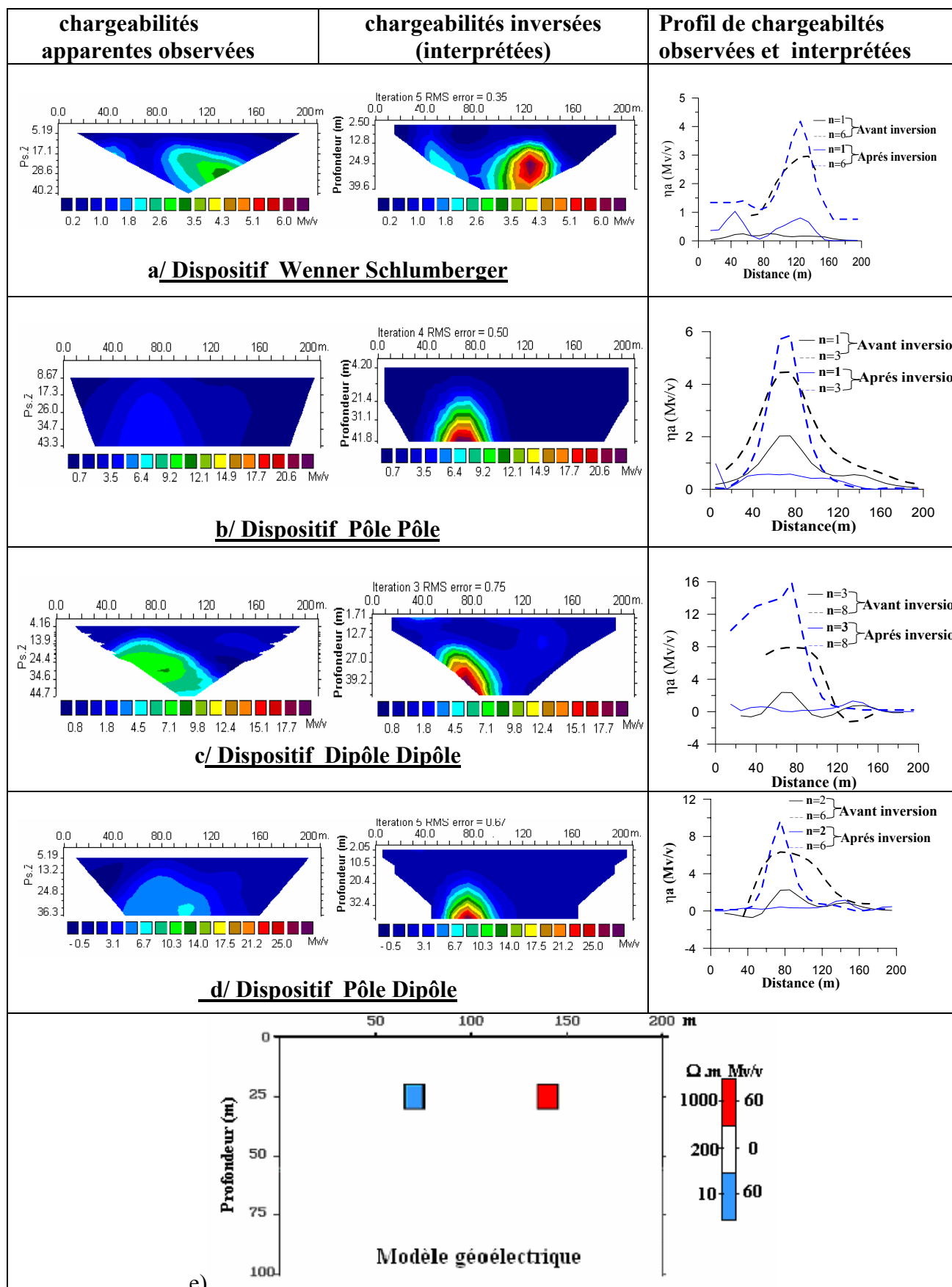


Figure III.8 : Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique observée interprétée, obtenues à partir d'un modèle composé de deux corps minéralisés avec diverses configurations d'électrodes et un graphe représentant la variation de résistivité en profondeur.

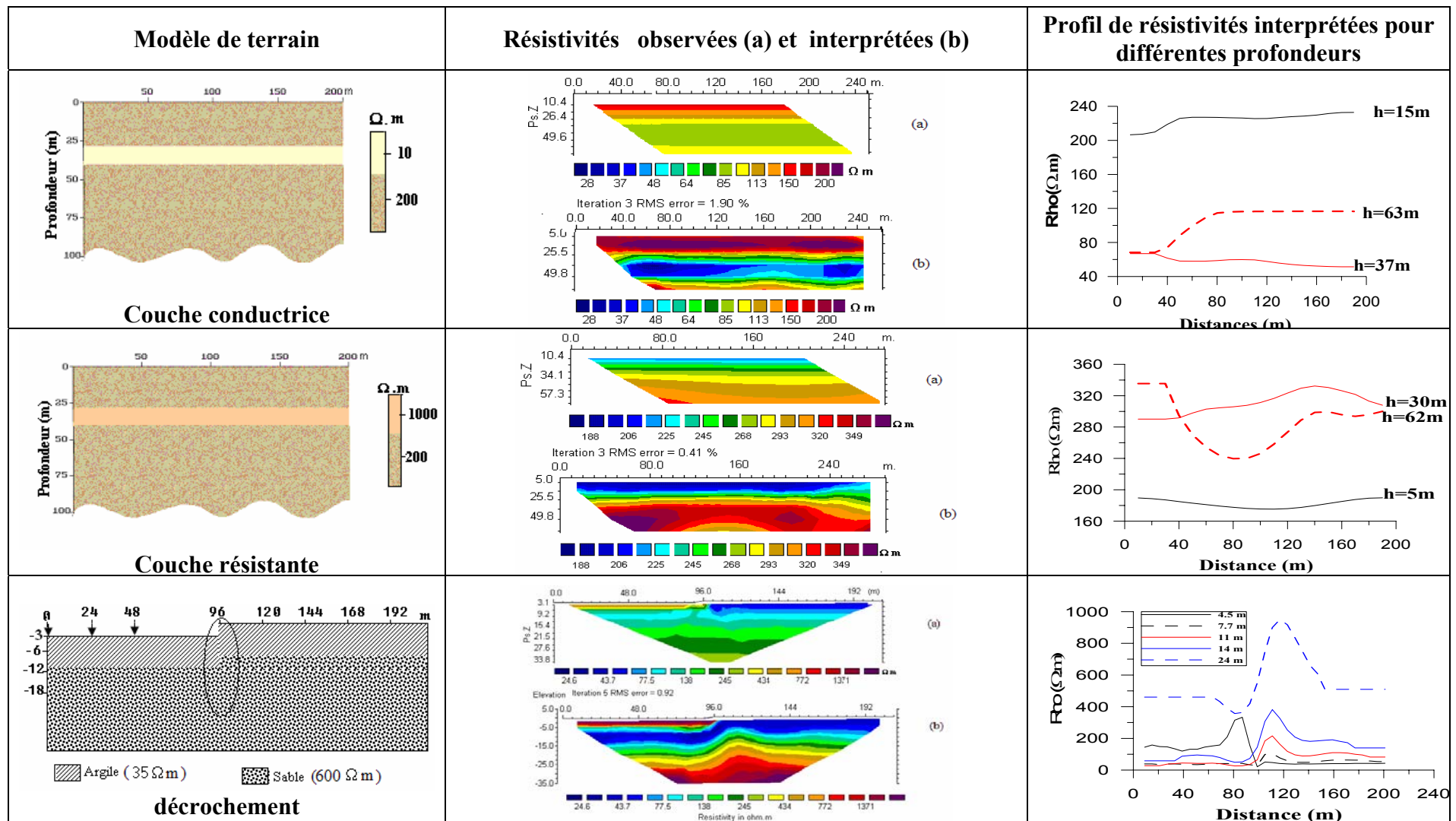


Figure III.9 : Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique observée et interprétée, obtenues à partir des modèles de terrain avec la configuration Wenner Schlumberger pour les deux premier cas et un Wenner pour le décrochement et un graphe représentant la variation de résistivités en profondeur.

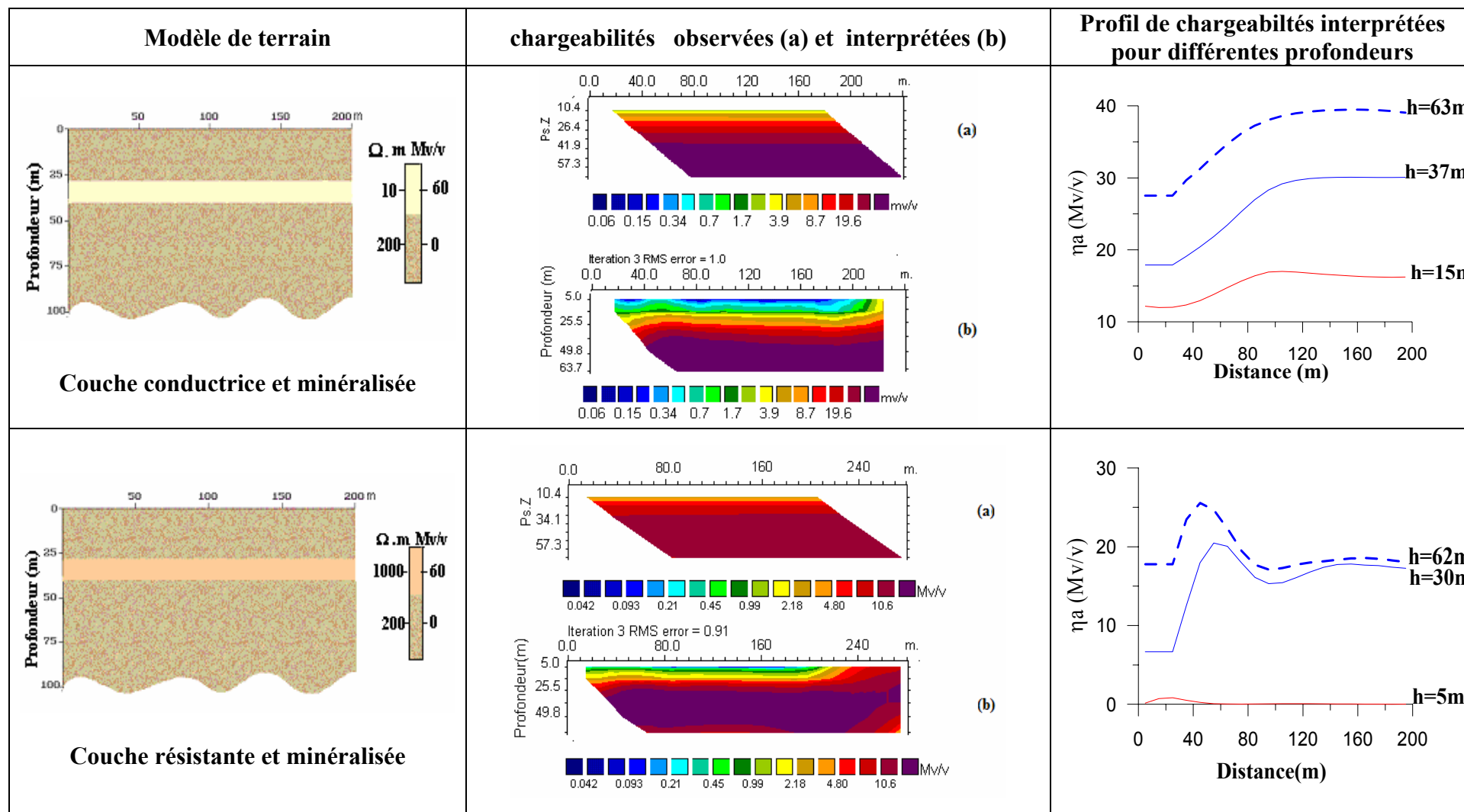


Figure III.10 : Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique observée et interprétée, obtenues à partir des modèles de deux couche, L'une résistante et l'autre conductrice et elles sont chargeable avec la configuration wenner Schlumberger et un graphe représentant la variation de chargeabilités en profondeur.

III .4.2.2 Résultats électromagnétiques

Les méthodes VLF et VLF-R avec l'émetteur (Rugby) de fréquence 16 Khz sont utilisées sur le même profil en combinaison avec les méthodes électriques pour identifier les structures de subsurface. Le choix des modèles est fait sur les trois premières cités précédemment (fig. II.2, II.3, II.4). Nous avons limité notre modélisation à des structures 2D à étudier sur ce profil.

✓ En mode VLF-EM. Les résultats obtenus (fig.III.11 à III.13) montrent la présence d'une anomalie centrale pour les premier et second modèles. Sa position est confirmée après application du filtre de Frazer sur les données calculées. Cependant L'amplitude de l'anomalie s'atténue en fonction de la profondeur du corps.

✓ En mode VLF-R, les profils de résistivité électrique apparente indiquent des valeurs de résistivité décroissante là où se positionne la structure conductrice affleurante ainsi que pour la seconde qui se trouve sous une couverture résistante. Le profil VLF-R n'a pas mis en évidence la structure résistante, à cause de la faible distance entre les deux structures (influence de la structure conductrice). Le déphasage entre les composantes horizontales électrique et magnétique reflète la nature des pour les trois modèles (chap.I)

III .4.2.3 Conclusion

Les mesures électriques ont été réalisées en utilisant des configurations d'électrodes différentes. Les résultats obtenus pour des données synthétiques nous révèlent que l'utilisation et l'inversion conjointe de plusieurs configurations améliore la résolution du modèle calculé.

- Le choix de la meilleure configuration dépend de la structure recherchée,
- Le choix de l'espacement des électrodes dépend des profondeurs de l'hétérogénéité recherchée. Par exemple, pour une hétérogénéité proche de la surface, il est nécessaire d'utiliser des petits écartements (Edward 1977).
- Le dipôle dipôle caractérisé par une bonne profondeur d'investigation et une sensibilité aux variations latérales de résistivité.
- La configuration wenner-Schlumberger a une forte sensibilité aux variations verticales de la résistivité.
- Les interprétations conjointes des différents dispositifs en prospections électrique et électromagnétique sont intéressantes pour déterminer l'extension de l'anomalie recherchée.
- Le profil VLF-EM a permis de confirmer la présence des structures conductrices.

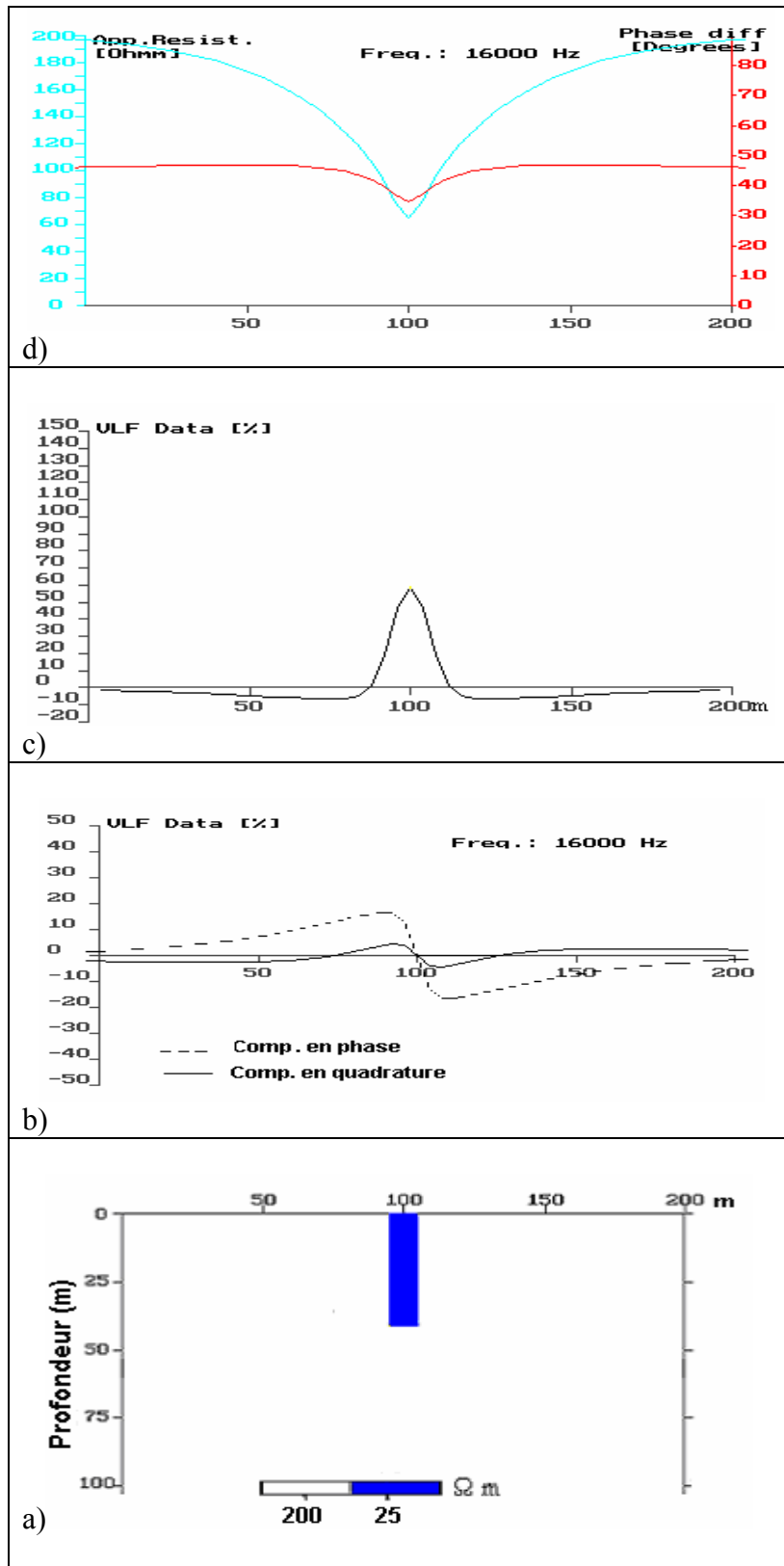


Figure III.11 : Interprétation 2D ; a) Modèle de dyke
 b) profil VLF , , c) réponse du modèle Après filtrage de Frazer
 d) profil VLF-R .

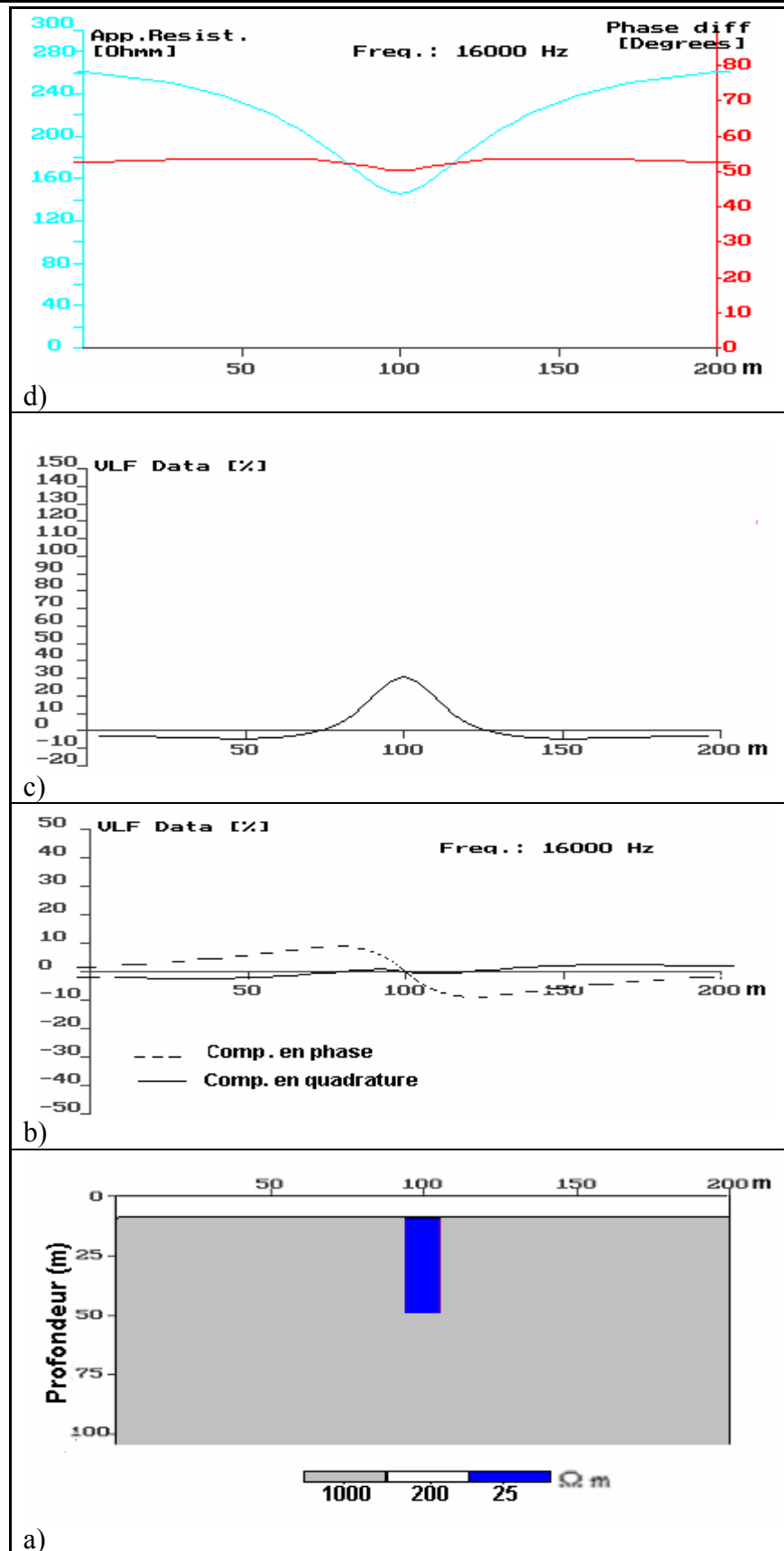


Figure III.12 : Interprétation 2D ; a) Modèle de dyke sous une couverture ; b) profil VLF ,c) réponse du modèle Après filtrage de Fraser , d) profil VLF-R,

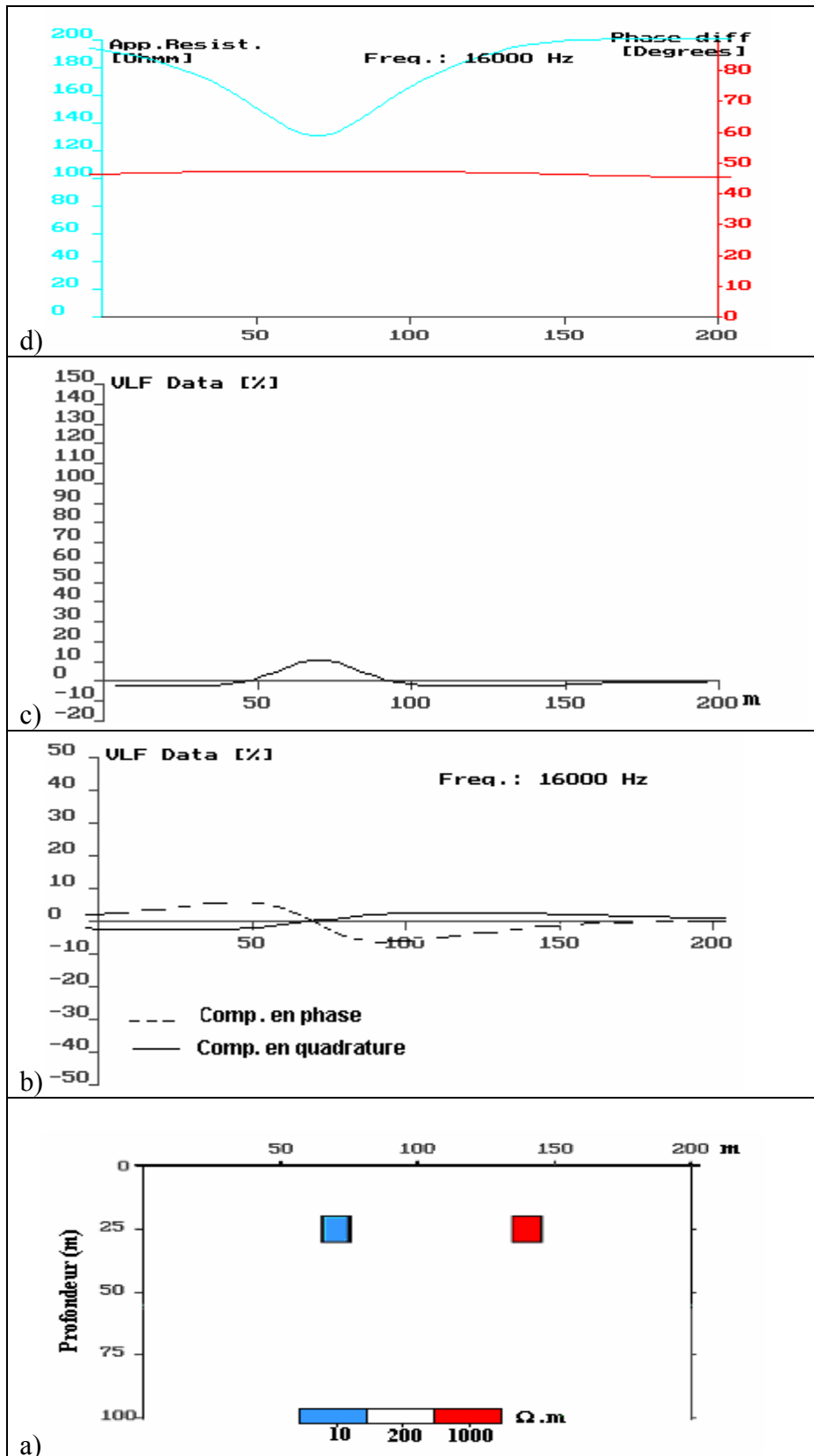


Figure III.13 : Interprétation 2D ; a) Modèle de deux corps
 b) profil VLF, c) réponse du modèle Après filtrage de Fraser ,
 d) profil VLF-R,

III .5 Application de l'indice DOI (Depth Of Investigation) à l'imagerie électrique 2D pour les sous-sols à forts contrastes de résistivité

III . 5.1 Introduction

Afin de vérifier la bonne résolution de notre image électrique, lors de l'application des méthodes d'imagerie électrique à l'étude des sous-sols présentant de forts contrastes de résistivité. Le concept de Depth of Investigation "Oldenburg et Li (1999)" a été utilisé. Les approches les plus traditionnelles calculent le signal maximum en profondeur (Roy & Apparao, 1971) ou la profondeur médiane d'investigation (Edwards, 1977) pour un terrain homogène. Lorsque le sous-sol présente de forts contrastes de résistivité, ces méthodes ne sont plus applicables. Le calcul de l'indice DOI consiste à évaluer la profondeur sous laquelle les données ne sont plus sensibles aux paramètres physiques du sous-sol (Oldenburg and Li, 1999). Dans ce travail, le calcul de cet indice est décrit et son utilisation est illustrée à l'aide d'un exemple synthétique et un cas réel.

Considérant deux inversions effectuées avec les modèles de référence m_{1r} et m_{2r} . Les modèles finaux correspondants sont notés respectivement m_1 et m_2 . On définit cet indice Par :

$$DOI(x, z) = \frac{|m_1(x, z) - m_2(x, z)|}{|m_{1r} - m_{2r}|} \quad \text{Avec } 0 \leq DOI \leq 1$$

Quand DOI est proche de zéro, les deux inversions produisent des résultats similaires (même valeur de résistivité) indépendamment de leur modèle de référence respectif. Par contre, quand DOI approche 1, l'inversion atteint la valeur du modèle de référence, ceci va particulièrement donner peu d'information sur cette région (le calcul des indices DOI est effectué a partir du logiciel RES2DINV).

III. 5. 2 Exemple d'application

III. 5. 2 .1 Cas synthétique

Une acquisition en dipôle-dipôle a été étudiée sur un modèle présentant une cavité (résistivité très élevée) dans un milieu encaissant plus conducteur ($100 \Omega.m$). La figure III.14 présente le modèle inversé avec des profondeurs étendues ainsi que le profil de l'indice DOI (calculés avec un jeu de données synthétiques) La résistivité de la cavité est bien plus élevée. L'augmentation rapide de l'indice DOI au milieu du profil indique que la profondeur d'investigation est plus faible à cet endroit (position de la cavité). Elle est plus importante sur la

gauche et la droite du profil où la résistivité est plus faible. Cet indice est surtout utilisé pour avoir une profondeur d'investigation maximale de la séquence de mesures. Cette séquence (visiblement en dipôle-dipôle) est assez riche en points. Pour cette disposition d'électrodes, ça ne sert à rien d'augmenter la valeur de « n » de manière excessive: il est faux de croire que cela augmentera encore la profondeur d'investigation. A partir de $n=6$ ou 8, on peut remarquer que le dispositif n'est sensible qu'à l'environnement immédiat de AB et MN et non pas aux structures profondes. Donc il faut faire varier la valeur de a (=distance AB et MN). Cela accroîtra la profondeur d'investigation du panneau électrique et permettra aussi une meilleure reconstruction de la cavité.

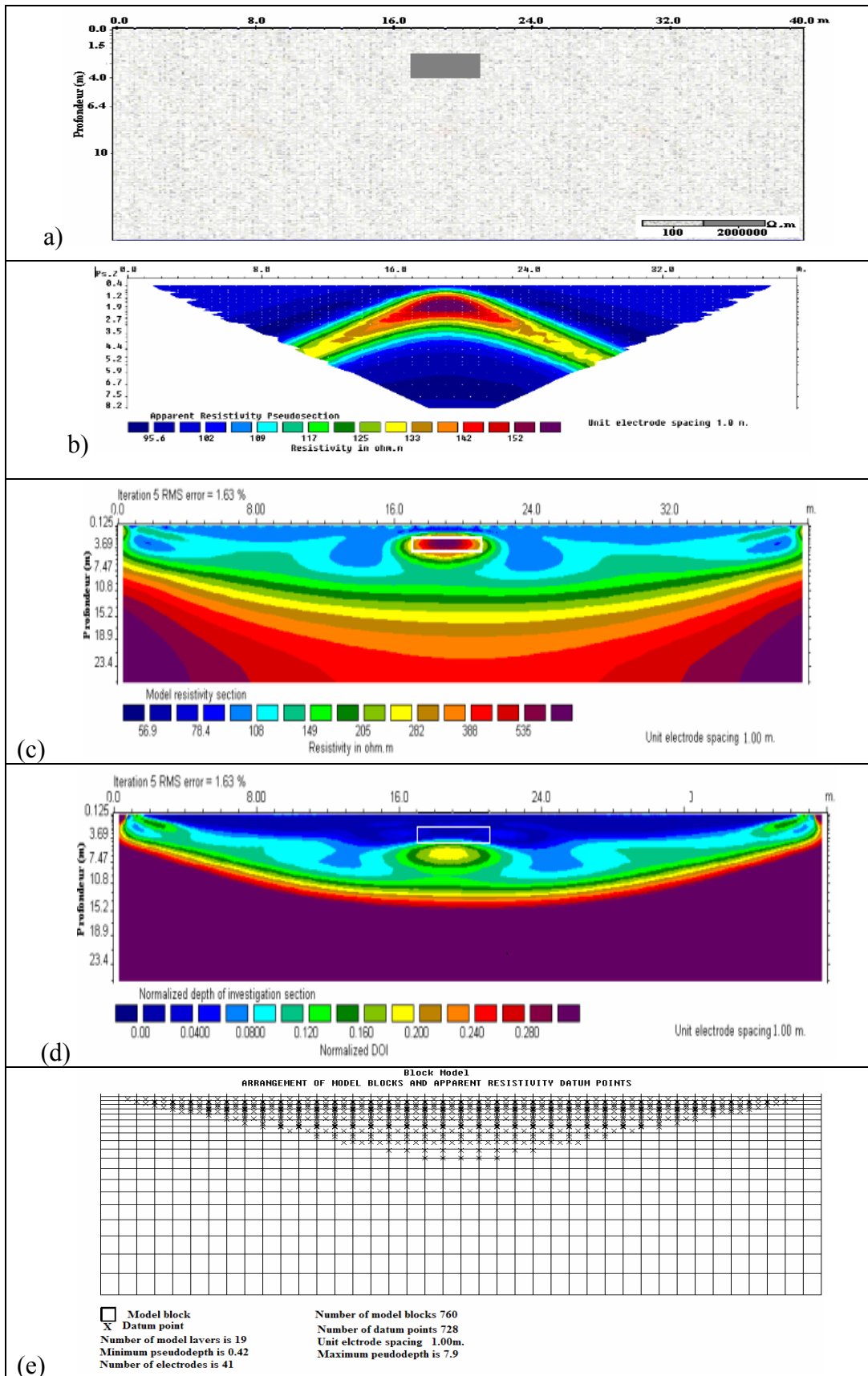


Figure III.14 : De haut en bas. a) Modèle de Cavité, b) pseudo section en résistivité apparente, c) modèle inversé avec un maillage étendu, d) coupe des valeurs de l'indice DOI et maillage étendu, e) Positions des points de mesure en résistivité apparente ( chelles non respectées)..

III. 5. 2 .2 Cas réel

La présence des cavités souterraines mal reconnues peut poser des problèmes de stabilité du sol pour les ouvrages (bâti). Cela nécessite une étude particulière du sous sol, qui permet de définir le type de fondations adaptées.

Aujourd'hui, les techniques disponibles appliquées pour la détection de ces cavités situées à des profondeurs de quelques dizaines de mètres, soulèvent une problématique particulièrement complexe et délicate d'un point de vue scientifique (vue précédemment). Néanmoins, certaines de ces techniques de reconnaissance géophysique ont été développées pour les adapter à la reconnaissance et à la caractérisation des cavités souterraines à condition d'en affiner les outils d'interprétation tels qu'ils sont mis en œuvre aujourd'hui. La méthode qui a fait l'objet d'une expérimentation sur site concerne la technique d'imagerie électrique

Cette méthode a été utilisée lors d'une campagne de mesures géophysiques dans une région « A » dans le cadre d'un projet de construction. Le but est de définir les problèmes de risques naturels (construction) liés à ces cavités. Les mesures ont été effectuées le long d'un profil de 60m de longueur. Une acquisition non automatique a été faite à l'aide d'un dispositif dipôle dipôle avec un espacement d'électrodes de 5m. L'indice DOI obtenu, lors de l'inversion du profil, ne dépasse pas 10 %. Ce qui montre la bonne résolution de l'image et par conséquent l'anomalie est bien réelle.

L'analyse de la pseudo section de résistivité (fig.III.15) a permis de détecter une formation de résistivité élevée entre les points -25 et -30. Le toit de cette formation est 1.5m, la profondeur ne dépasse pas les 6m. Ces résultats ont été confirmés après avoir effectué les fouilles à l'endroit de l'anomalie détectée ce qui montre que la méthode géophysique choisie est appropriée pour caractériser les phénomènes des cavités souterraines.

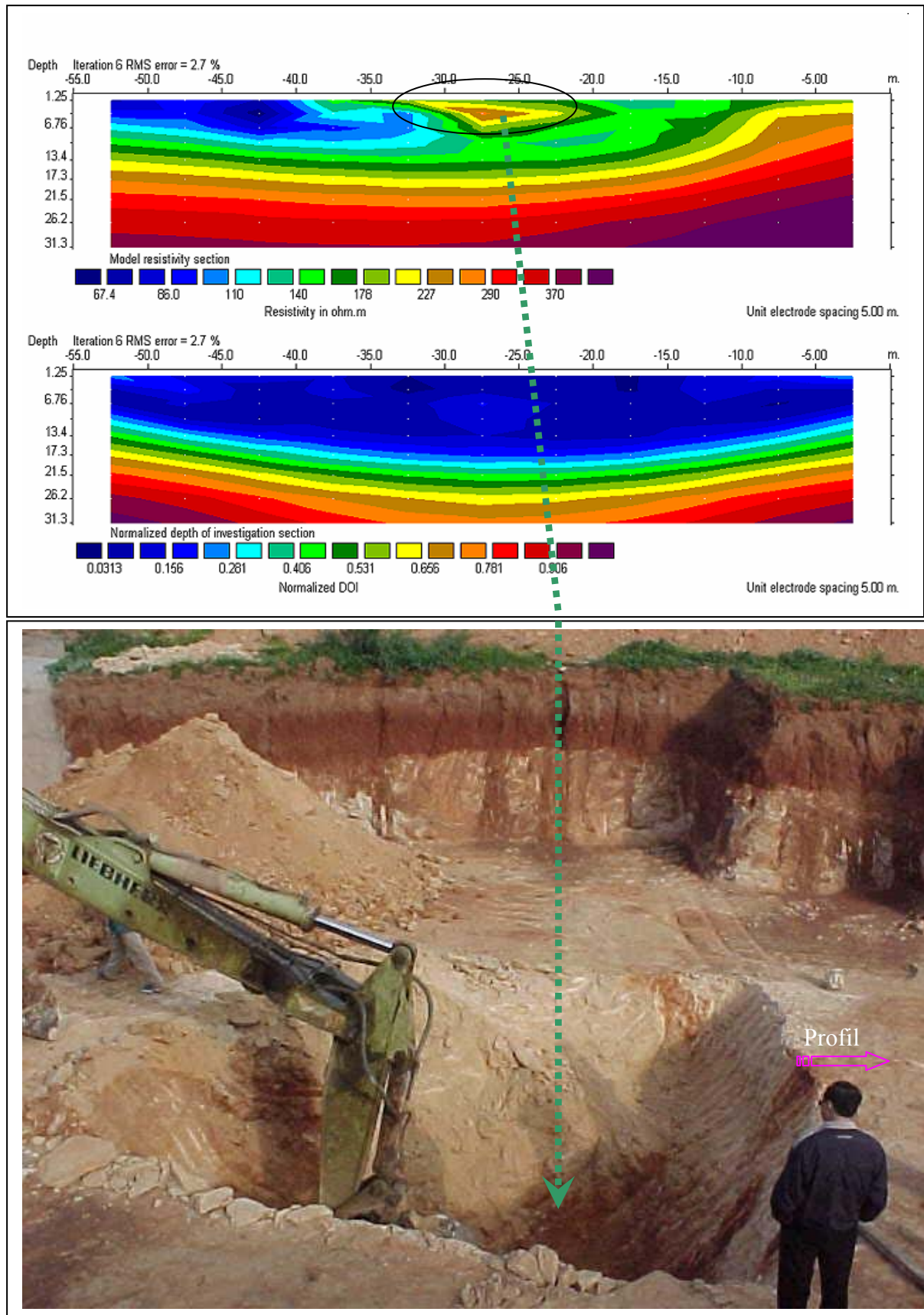


Figure III.15 : en haut ; coupe de résistivité interprétés et profil de l'indice DOI, en bas : image prise au moment de la fouille pour vérifier la nature de l'anomalie électrique.

Chapitre IV

Etude d'un Cas réel

Chapitre IV

Etude d'un cas réel

IV.1	Situation géographique.....	64
IV.2	Contexte géologique	65
IV.3	Objectif et méthodologie d'acquisition des travaux des données sur terrain.	66
IV.4	Exploitation des données.....	70
IV.5	Résultats et discussions.....	71
	IV.5.1 Résultats obtenus par la méthode électrique.....	71
	IV.5.2 Résultats obtenus par la méthode électromagnétique	73
	IV.5.3 Discussions des modèles.....	75
	IV.5.3.1 Profil électrique 2D N°1600 E.....	75
	IV.5.3.2 Profil électrique 2d n° 00.....	77
	IV.5.3.3 Profil 2d n° 800 w.....	80
	IV.5.4 Transformation des cartes de résistivité électrique.....	80
	en cartes VLF-EM (Interprétation quantitative)	
	IV.5.5 Conclusion.....	81

IV.1 Situation géographique

La présente étude concerne la partie Sud – Ouest de Bechar (Toumiat) qui se situe au Nord du faisceau de Daoura et s'étend sur une superficie de 2.5x1.2 Km. La région d'étude se trouve à 300 km au Sud - Ouest de Bechar et à 80 km de la ville de Tabelbala. Ses limites sont :

- Le grand erg occidental au Nord ;
- L'erg El Atchane et djebel Ben Tadjine au Sud ;

Le secteur d'étude est compris entre $3^{\circ} 50' 59.3''$ et $3^{\circ} 52' 41.6''$ de longitude Ouest et $29^{\circ}46' 23.2''$ et $29^{\circ}47' 58.7''$ de latitude Nord

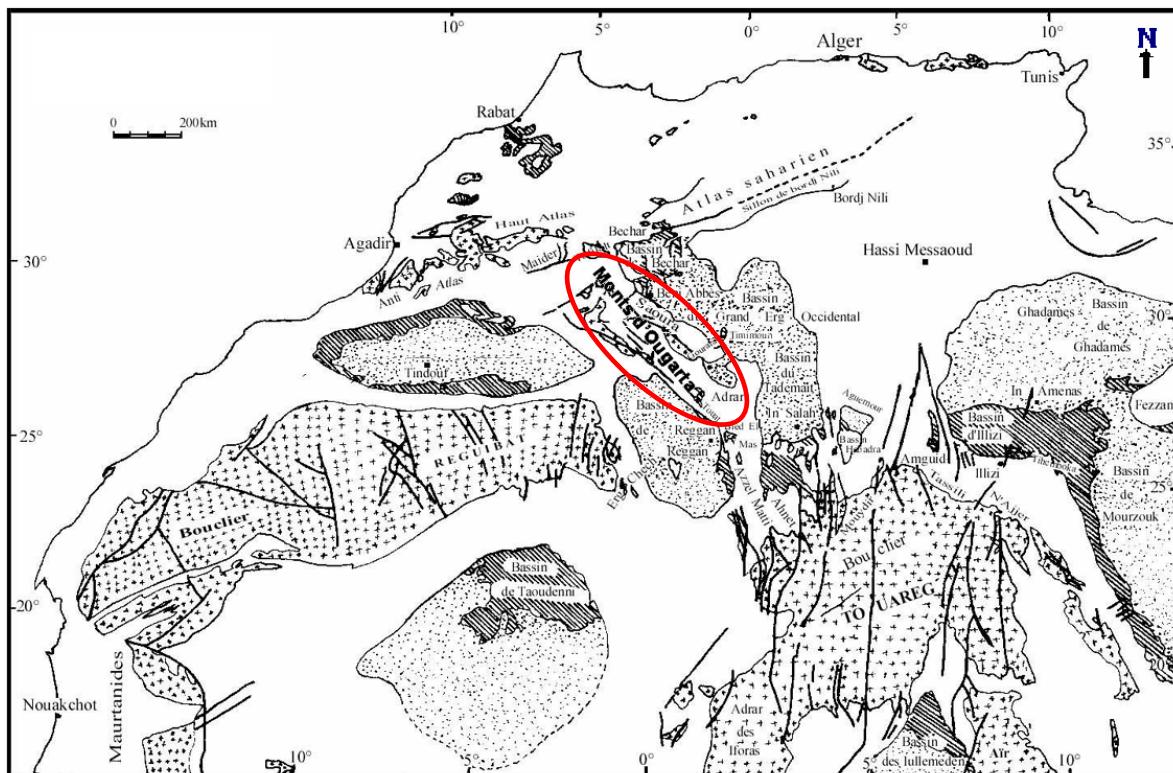


Figure IV.1 : Situation géographique des Monts d'Ougarta (M. Legrand-Blain, 1985).

IV. 2 Contexte géologique

Les chaînes d'Ougarta sont situées dans la partie Nord-Ouest du Sahara Algérienne. Elles sont formées par des terrains précombriens surmontés par une couverture paléozoïque plissée, ces chaînes correspondent à une vaste zone de reliefs allongés Nord Ouest- Sud Est.

Les études faites indiquent que les structures plissées et cassantes dans la région sont le résultat de deux tectogenèses : panfricaine et hercynienne. Les structures cassantes se manifestent sous formes de failles dans la région de Toumiat (secteur étudié) de direction NW-SE. Des filons se sont mis en place dans ces zones de faille et se sont encaissés dans les formations gréseuses du cambrien. Leurs longueurs peuvent atteindre les kilomètres et leurs pendages sont sub-verticaux

Un filon parmi les filons de Toumiat a fait l'objet de notre étude. La minéralisation à quartz et sulfures de celui-ci sont, essentiellement, à pyrite, chalcosite, galène (peu) des oxydes de Fer (hématite, limonite, oxyde de manganèse, bismuth et or (rapport ORGM). Le filon étudié est encaissé dans les terrains carbonifères. Les extrémités Est et Ouest du filon plongent sous la croûte silico-calcaire de la hamada du Néogène. Le filon est composé de deux types de quartz :

- Blanc rosâtre à blanc laiteux.
- Grisâtre à noirâtre sur la gangue du filon. Elle est représentée par la silice noirâtre riche en oxyde de manganèse et de Fer avec de rares cavités remplis de Barytine.

Pour ce qui est des épontes, elles sont composées de quartz blanc rosâtre à blanc laiteux minéralise sulfure et oxyde de fer, la malachite et chalcosine, très disséminés. Il est à noter que la gangue est parcourue par veinules de quartz blanc. Des creusements de tranchées et échantillonnage par saignées dans les niveaux sont porteurs de la minéralisation.

En 2001, la cartographie géologique et l'échantillonnage sur des tranchées ont été réalisés. Quelques veines épithermales encaissées dans la quartzite ont été ré échantillonnées par cannelure et les teneurs les plus significatives ont révélé plus de 3,9 g/t d'or (Au.)

Le traitement géochimique effectué sur le filon de quartz a mis en valeur plusieurs associations, a savoir : Cu, Ba, Ag, As, Cr, Ni, Mo, Bi, As et Co, Cu, Pb. La mise en évidence de ces associations s'explique par la superposition de plusieurs phases hydrothermales qui ont alimenté le filon de quartz. La présence de plusieurs types de minéralisations liés à l'hydrothermalisme et l'existence de dépôts meubles qui sont les critères essentiels pour l'orientation des travaux de recherche et de prospection.

Toutefois des affleurements du filon de quartz ont été observés en plusieurs endroits.

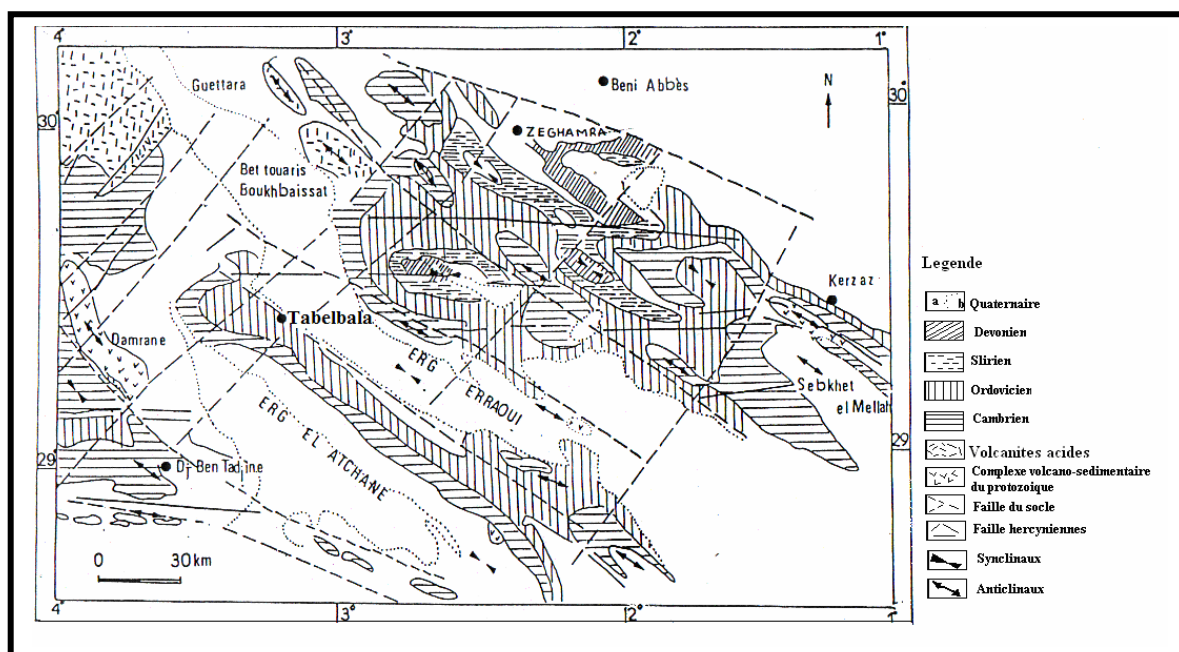


Figure IV.2 : Schéma géologique et structural Ougarta d'après les travaux de EREM (1976-1981) ; DONZEAU 1971 (Orgm ,2002).

IV. 3 Objectif et méthodologie d'acquisition des données sur terrain

L'objectif principal de cette étude est la détection des minéralisations à Au, Mo, Ni, Co, associées aux sulfures dans le faisceau de Daoura (chaîne d'Ougarta) par une investigation géophysique. Dans ce contexte, une cartographie géologique au 1/5 000 avait été complétée sur environ 3 km² en 2000 par l'O.R.G.M, de la ligne 1600 Est à -1500 Ouest. Des prélèvements d'échantillons ont pu être réalisés grâce aux nombreuses tranchées creusées dans la région (fig.IV.3). Sur ces échantillons ont été réalisées des analyses géochimiques et minéralogiques. Un levé de polarisation provoquée a gradient moyen (PP-GM) a été élaboré en 2002 de 2.5 km à l'échelle 1/10000 sur une maille de 100x20 m² (fig.IV.3). Pour cartographier le filon de quartz de direction N 60°, il a été tracé 22 profils d'une longueur de 400 m chacun. Les profils ont été matérialisés perpendiculairement au filon suspecté. Un levé du champ électromagnétique induit par des émetteurs radio avec les techniques VLF et VLF-R a été effectué sur quelques profils équidistant de 25m avec un pas de mesure de 10m, afin de confirmer la présence du filon de quartz en certain endroit. Deux profils ont également été cartographiés en détail par la tomographie électrique, la méthode de résistivité azimutale et par un profillement combiné (pôle-dipôle croisé) afin de vérifier l'existence et la direction de l'anomalie et de rechercher les zones de contact.

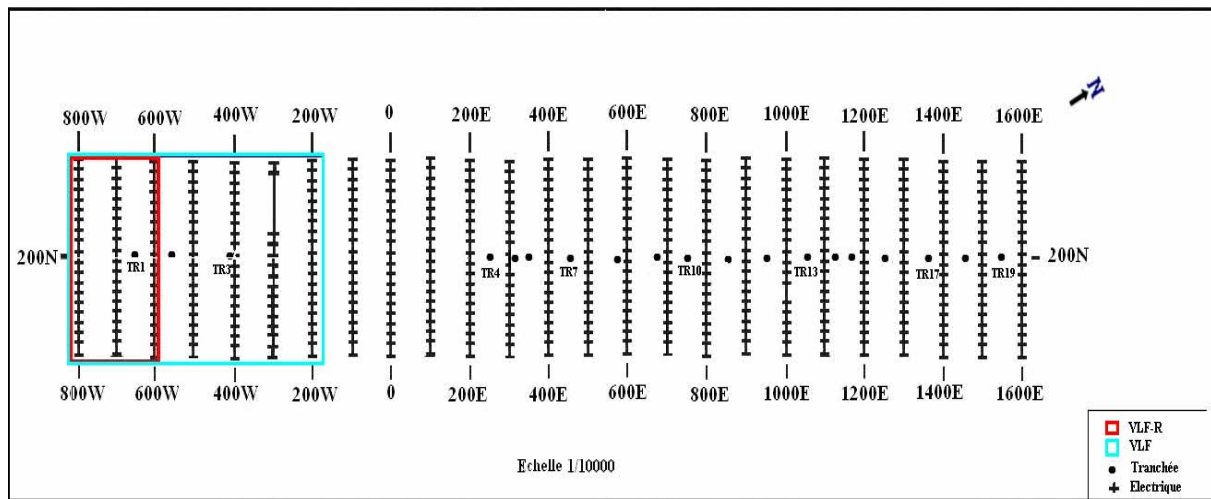


Figure IV.3 : plan de position des points de mesures

L'acquisition des données de la méthode de polarisation provoquée et d'imagerie électrique a été faite à l'aide de :

- Emetteur TSQ-3, produisant de très haute tension de 1500v (Fig.IV.4).
- Récepteur IPR- 10 (Fig.IV.4) permettant l'acquisition automatique des différences de potentiel et de la chargeabilité.
- Un groupe électrogène source de tension de 400 Hz.
- Deux électrodes impolarisables et des câbles permettant les liaisons entre ces diverses composantes.
- Un groupe d'électrodes en acier est utilisé pour l'émission, permettant le contact entre les électrodes et le sol

Les mesures électriques ont été réalisées à la surface du sol, selon la configuration rectangulaire (planchette) avec $MN=20m$. Deux profils ont été choisis pour mener une étude détaillée. Il s'agit du Profil 00 et profil 1600. La technique utilisée lors des mesures est transitoire (technique pulsée). Le minutage sélectionné pour l'émetteur TSQ-3 est le même pour le récepteur IPR-10A ($T = 04$ secondes). Ce qui augmente la rapidité de mise en œuvre. De plus, l'intensité du courant peut être conservée constante très facilement pour chaque rectangle. La ligne émettrice AB est de 1200m. Nous avons réalisé le levé sur le tiers de AB. Pour chaque point d'observation, deux mesures sont enregistrées ; ρ_a et η_a .

La méthode de résistivité azimutale (circulaire) consiste en la mesure de la résistivité apparente pour différents azimuts autour d'une station choisie Si.

le profillement combine (pôle –dipôle croise) se compose de deux dispositifs croisés asymétriques AMN et BMN avec une électrode de courant c commune implantée à l'infini. les électrodes a et b sont disposées symétriquement par rapport au centre de la ligne de réception MN, laquelle est commune pour les deux dispositifs. pour chaque position du dispositif sur le profil, un paramètre est mesuré (ρ_a). le point de mesure est reporté au milieu de MN.

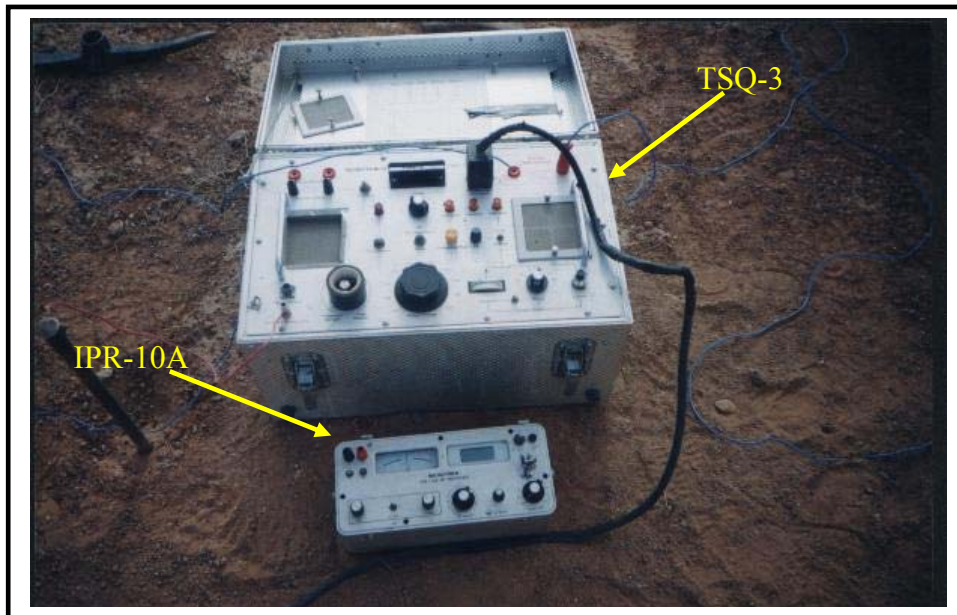


Figure IV.4 : Les instruments de la polarisation provoquée

Pour notre étude la longueur AO est égale à 110m

La prospection électromagnétique par les techniques VLF et VLF-R a été réalisée par les instruments EM16 et EM16R de Géonics (figure IV.5a et b) afin d'acquérir les données de résistivité et ceux de la composante réelle. Les résultats obtenus des profils sont alors comparés avec ceux de la méthode électrique. Cette prospection a été utilisée pour combler les carences des résultats de la chargeabilité PP-GM. La station choisie est celle de RUGBY (GBR) qui émet une fréquence de 16 khz. Durant le levé, l'orientation du capteur est dirigée vers le Nord (position de la station d'émission), pour capter le signal de la station émettrice. Les paramètres enregistrés sont :

- Composante Réelle en phase $R\%$ et en quadrature de phase $I\%$
- Résistivité ρ et déphasage φ .



Figure IV.5a : l'instrument électromagnétique : EM 16

On a procédé aux mesures sur des profils situés au SW de la zone d'étude sur une grille de 25x10m². La méthode VLF a été utilisée pour identifier la présence du filon (continuité) à cet endroit. Deux modes de mesure ont été utilisés : le mode résistivité (VLF-R, ou MT-VLF) qui permet d'enregistrer les variations de résistivité électrique apparente (Guérin *et al.*, 1994), et le mode inclinaison (VLF-EM) permettant l'identification des variations latérales (Fraser, 1969).

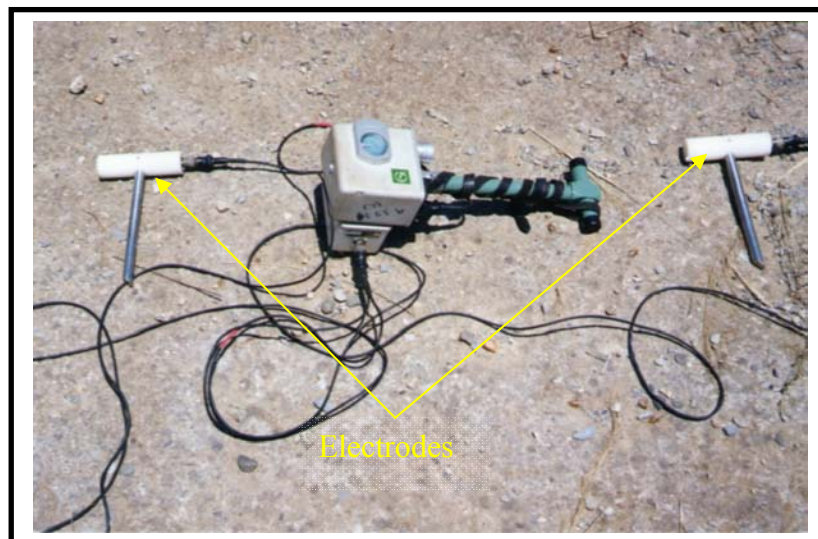


Figure IV.5b : l'instrument électromagnétique : EM16R

IV.4 Exploitation des données

Les démarches géophysiques employées consistent en premier lieu à cartographier l'évolution de la résistivité et de la chargeabilité. Ensuite, les données de la technique d'imagerie électrique (résistivité et chargeabilité apparentes) sont inversées en 2D au moyen du logiciel Res2dinv (Loke et Barker 1996- 2003). Comme le relief est relativement plat le long de la ligne d'électrode, l'inversion est réalisée sans correction topographique.

Les résultats de mesures obtenues avec la méthode de résistivité azimutale sont représentés dans un graphique polaire ($\rho_a=f(\alpha)$), (figure IV.7). A partir de ces résultats, on déduit la direction de la structure résistante recherchée par l'axe des moindres résistivités apparentes. L'axe de plus grande résistivité apparente est l'axe perpendiculaire à la direction de la structure. Avec cette méthode on peut également estimer son pendage. Le dispositif utilisé est asymétrique de type Schlumberger. L'électrode B est mise à l'infini, la distance entre l'électrode A et le centre des électrodes de réception MN est de 150 m pour la première Station (S190 du Profil 1600) et de 100 pour la seconde (S230 du Profil 00).

Les données du levé avec la configuration pôle dipôle croisé (profilé combiné) sont représentées sur un graphe Le point de mesure est reporté au centre des électrodes MN.

Les données électromagnétiques (phase) ont été traitées par le filtre de Fraser qui consiste à transformer les points d'intersections des courbes d'anomalies, avec l'axe des distances, en un maximum, pour mieux suivre l'extension de la structure et corrélérer les mesures géophysiques avec la réalité géologiques. Il fait à la fois une dérivation et un lissage, à partir de quatre mesures consécutives a, b, c, et d. On calcul la quantité $(a+b) - (c+d)$ qu'on affecte au milieu du segment BC. C'est seulement après ce stade qu'il est alors possible de procéder à l'interprétation de ces résultats.

IV.5 Résultats et discussions

IV.5.1- Résultats obtenus par la méthode électrique

▪ La carte de la figure (IV.6b) fait apparaître une anomalie en résistivité dans tout le secteur d'étude cerné par les stations 190 et 220. C'est une structure résistante allongée selon la direction NE-SW, dont l'intensité en résistivité varie entre 250 et 300 $\Omega.m$. Le reste du secteur se présente comme une plage d'isolignes d'intensité de 150 $\Omega.m$ (fig. IV.6b). On distingue aussi une anomalie dans la partie Est du profil 300W de direction perpendiculaire à la structure résistante. Sa résistivité est de l'ordre de 250 $\Omega.m$. Un décrochement est observé entre les profils 1000 E et 700 E de direction NS.

▪ Une belle anomalie en chargeabilité a été observée au-dessus de la structure identifiée. L'intensité en chargeabilité à cet endroit, atteint plus de 50mv/v. Elle est limitée en largeur par les stations 190 et 230. L'encaissant présente de faibles valeurs de chargeabilités de l'ordre de 10 mv/v. Ce qui représente peu d'intérêt dans notre cas (fig IV.6c). Étant donné le contexte géologique de Toumiat, la méthode assimile la structure anormale à un filon de quartz minéralisé disséminé (de résistivité $\sim 300 \Omega.m$ et de chargeabilité d'environ 60 mv/v).

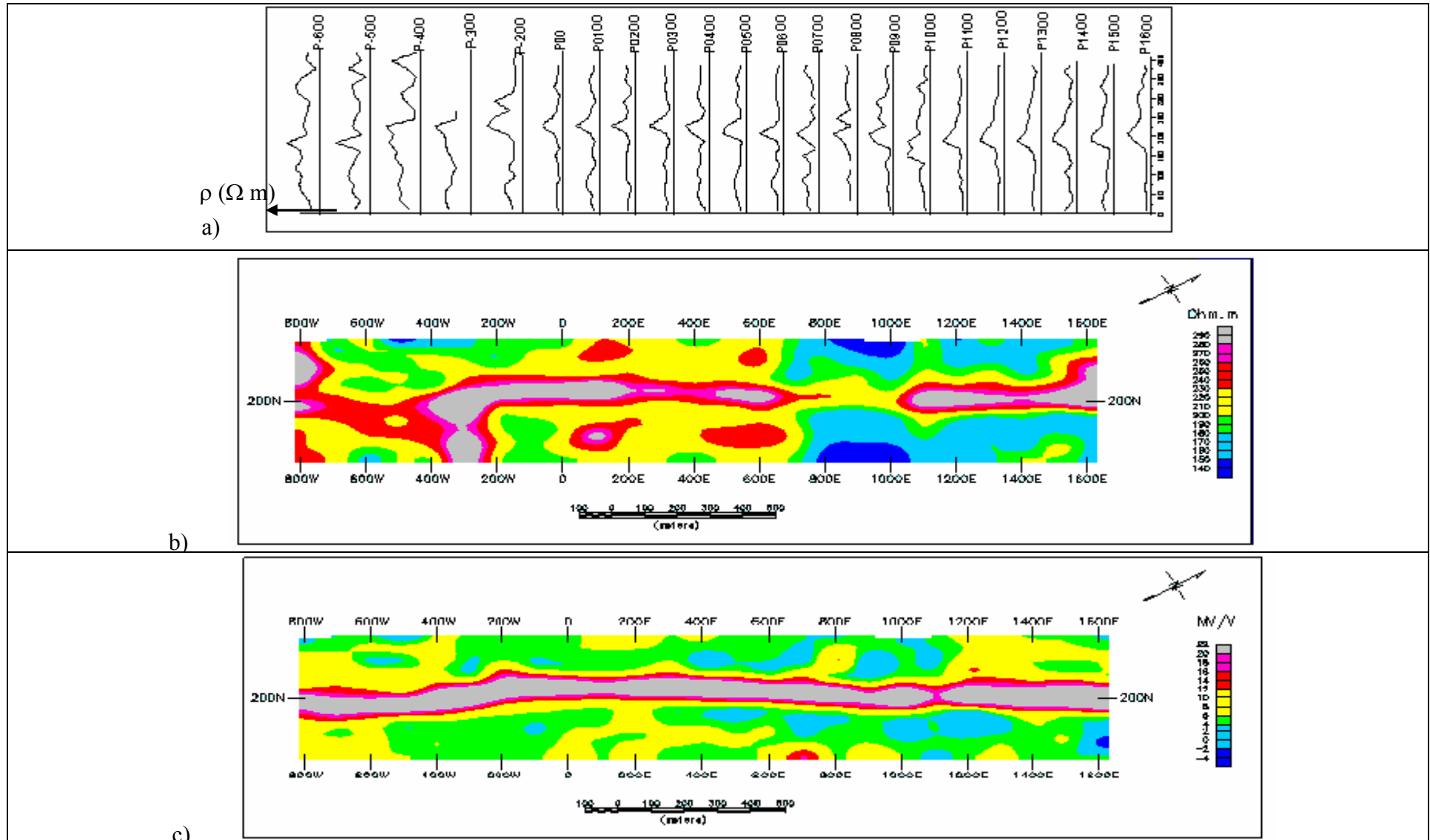


Figure IV.6 : a) Vue en perspective de 22 profils linéaires de résistivité équidistants de 100m ; b) Carte de résistivité apparente de Toumiat ; c) Carte de chargeabilité apparente

Les profils circulaires réalisés aux stations 190 du profil 1600 (douze azimuts séparées l' un de l'autre de 30°) et 230 du profil 00 (huit azimuts séparées l' un de l'autre de 45 °) montrent que les faibles valeurs de résistivités (fig IV.7a et b) apparentes correspondent à la direction Nord Ouest- Sud Est (Nord 60°). D'après le paradoxe d'anisotropie, cette direction est compatible avec l'allongement du filon.

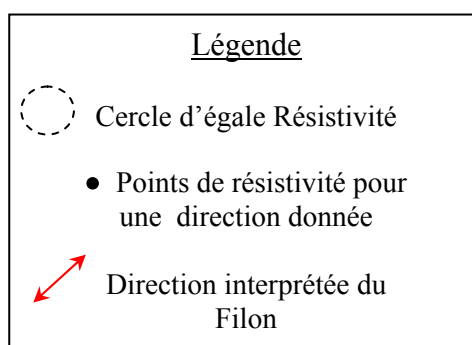
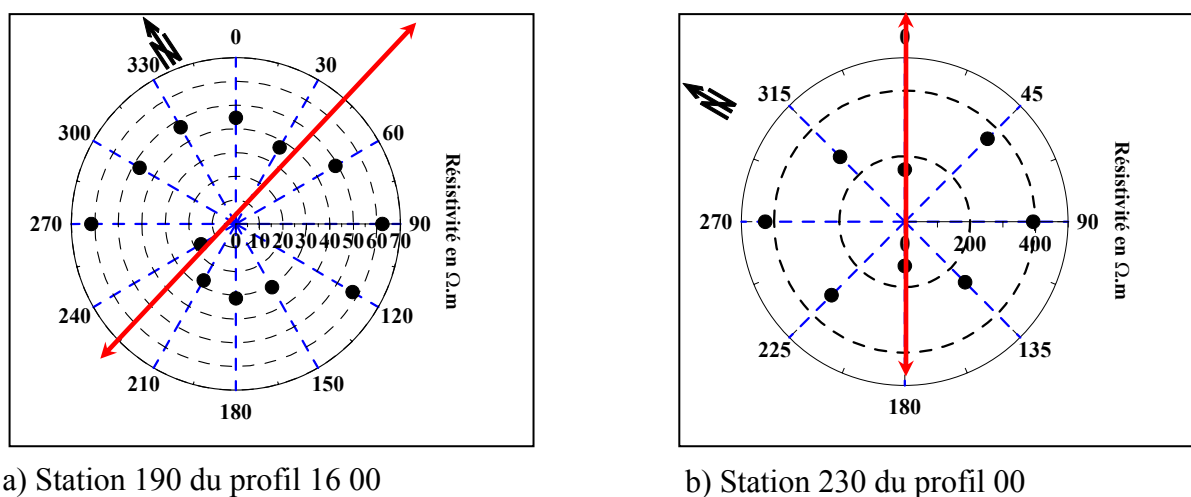


Figure IV.7: projection de résistivités apparentes Azimutales

IV.5.2 Résultats obtenus par la méthode électromagnétique

En mode VLF-EM, les résultats obtenus montrent la présence de la structure géologique identifiée. La carte de la composante en phase (Figure IV.8a) met en évidence une discontinuité, car il y a une minéralisation en sulfure au même emplacement.

En mode VLF-R, la carte de résistivité (Figure IV.8b) montre des résultats difficilement interprétables. Le déphasage entre les composantes horizontales électrique et magnétique présente des valeurs systématiquement supérieures à 50° (valeur que l'on obtient sur un terrain

hétérogène). Vu le peu de mesures effectuées avec cette technique (autorisation de la mission limitée et conditions climatiques ; vents fréquents dans cette région), il est difficile d'interpréter ces données.

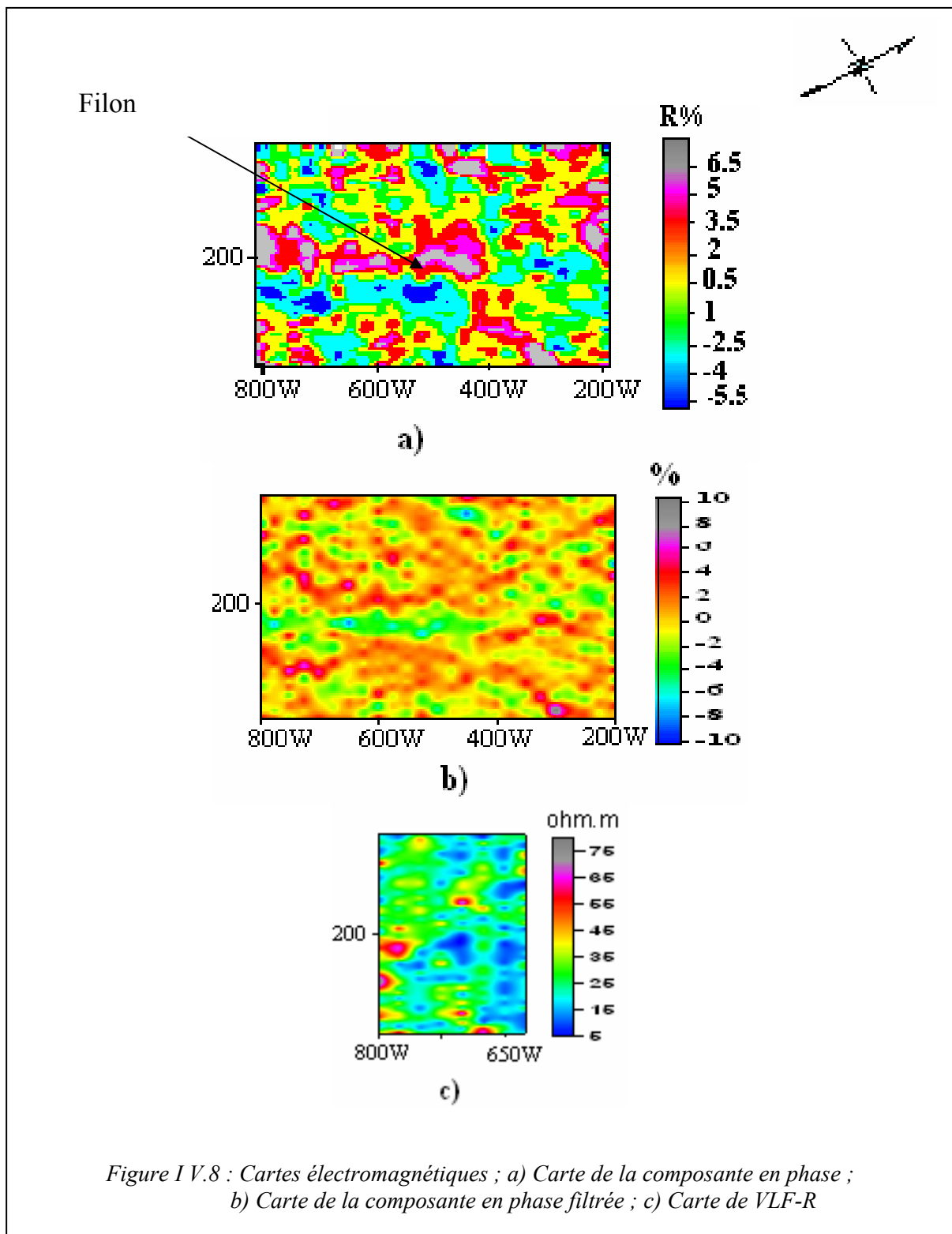


Figure IV.8 : Cartes électromagnétiques ; a) Carte de la composante en phase ;
b) Carte de la composante en phase filtrée ; c) Carte de VLF-R

IV.5.3 Discussions des modèles

IV.5.3.1 Profil électrique 2D N°1600 E.

Les levés réalisés sur ce profil au dessus de l'anomalie identifiée précédemment sont :

- La tomographie électrique avec un dispositif dipôle – dipôle, l'inter-électrode est de 20m. On a effectué des mesures simultanées de la résistivité et de la chargeabilité apparentes avec six niveaux d'acquisitions.
- Un levé avec la configuration pôle dipôle croisés (profilé combiné) où les électrodes émettrices AB et de réception MN sont sur une même ligne.

Les résultats de la tomographie électrique sont comparés avec les données du gradient moyen et du levé pôle- dipôle. La figure IV.9 présente les résultats de la tomographie électrique, pour une profondeur d'investigation de 25m

La pseudo coupe interprétée a mis en évidence deux compartiment : le premier conducteur de résistivité inférieure à 30 Ω .m, situé dans la partie Ouest du profil et le second de forte résistivité, localisé à l'Est. Aussi une structure résistante (150 Ω .m) a été décelée. Cette dernière plonge vers le SE. La coupe de polarisation provoquée fait apparaître une structure sub-verticale polarisable située au milieu du profil (station 190), dans un encaissant moins chargeable 30 Mv/v.

On observe sur les graphes tracés à partir des résistivités et des chargeabilités interprétées (inversées) à différentes profondeurs, l'existence de deux structures résistantes. La première se situe à l'aplomb du point 190m. Son amplitude est supérieure a 1000 Ω .m. La seconde qui se trouve entre les stations 270 et 320m est telle que sa résistivité est de l'ordre de 600 Ω .m. On constate, sur les profils de chargeabilité, que seule la première structure est minéralisée (forte réponse en PP). La structure sub-verticale (500 Ω .m) s'identifie probablement au quartz placé dans un ensemble résistant (200 Ω .m) et correspondant à l'ensemble grès/argiles/dolomie/anhydrite. D'après la tranchée N°19.

Notons que sur ce profil, on a tracé des graphes de résistivités et de chargeabilités apparentes obtenues par les dispositifs gradient moyen et pôle-dipôle. Ce dernier confirme bien les résultats de la tomographie électrique et met en évidence une zone de contact a l'aplomb de la station 190. En outre, une structure a été observée plus loin, avec un pendage vers le Sud Est du profil.

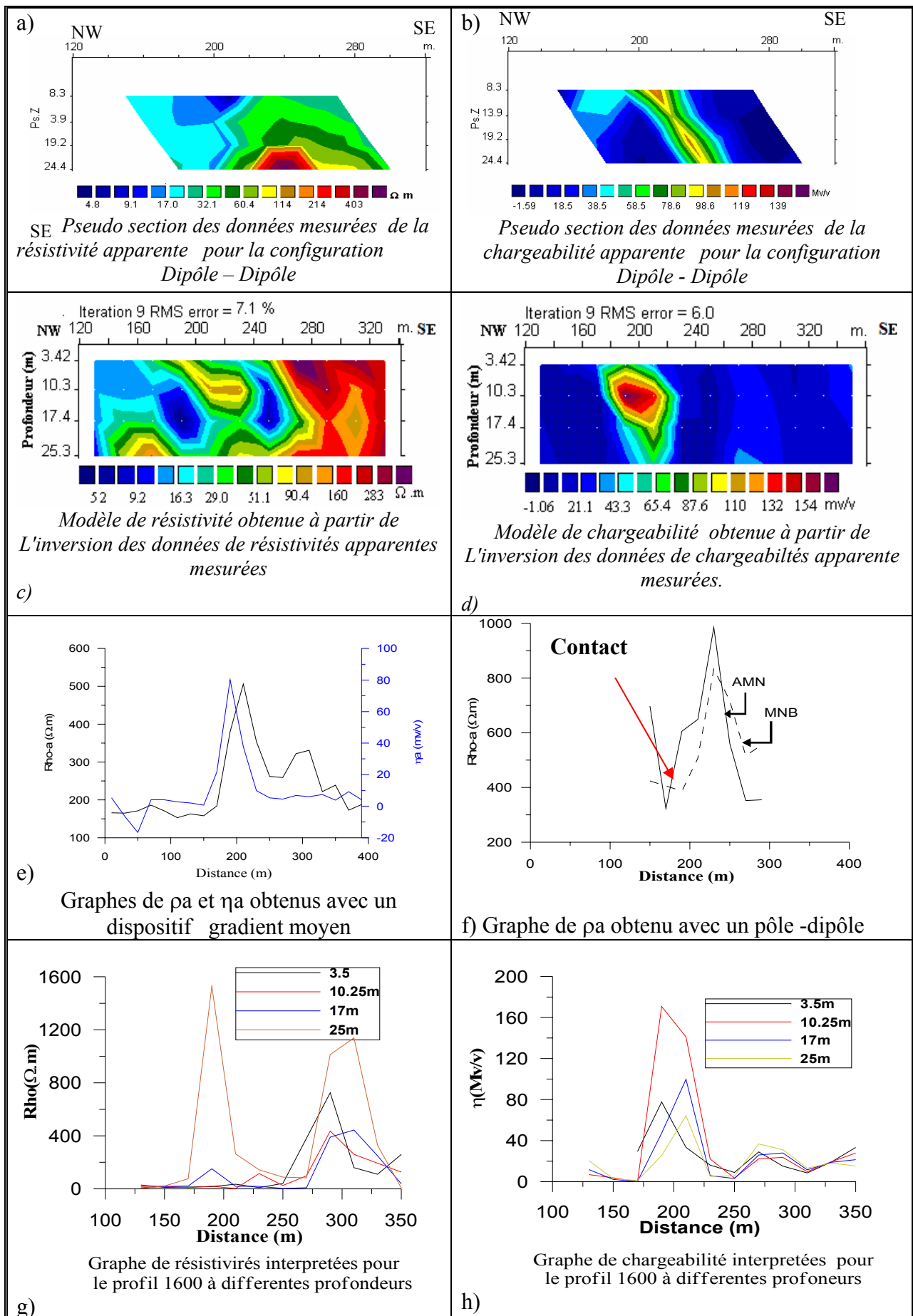


Figure IV.9 : Interprétation 2D du profil 1600 E

IV.5.3.2 Profil électrique 2D N° 00.

Les levés réalisés sur ce profil sont :

- La tomographie électrique avec la même configuration d'électrodes que celle du profil 1600 E. Les mesures ont été effectuées avec quatre niveaux d'acquisitions.
- Un levé de pole- dipôle croisé

L'interprétation des profils de résistivité (fig.9) montre l'apparition nette d'une structure relativement résistante ($> 300 \Omega.m$) de direction NE, dans un terrain encaissant moins résistant ($150 \Omega.m$). Le passage de la zone minéralisée est marqué par l'augmentation des deux paramètres résistivité et chargeabilité ($300\Omega.m$ et $60 Mv/v$). Sur la base des modèles obtenus après inversion des données de résistivités et de chargeabilités et des graphes, on a pu déceler quelques anomalies en résistivité dont l'amplitude augmente en profondeur.

Nous observons aussi une réponse PP qui se concrétise au mieux par le dispositif gradient moyen. Ces constatations affirment l'existence d'une minéralisation entre les stations 200-250m. La profondeur d'investigation (d'après Edward 1977) est nettement plus grande que celles des mesures précédentes ($n=6$, $AB= 20m$, $MN=20m$). Le graphe du pôle- dipôle croisé met en évidence une zone de contact à l'aplomb de la station 180 et une structure subverticale résistante. La faible densité de mesures et le choix d'interélectrode, rendent l'interprétation difficile.

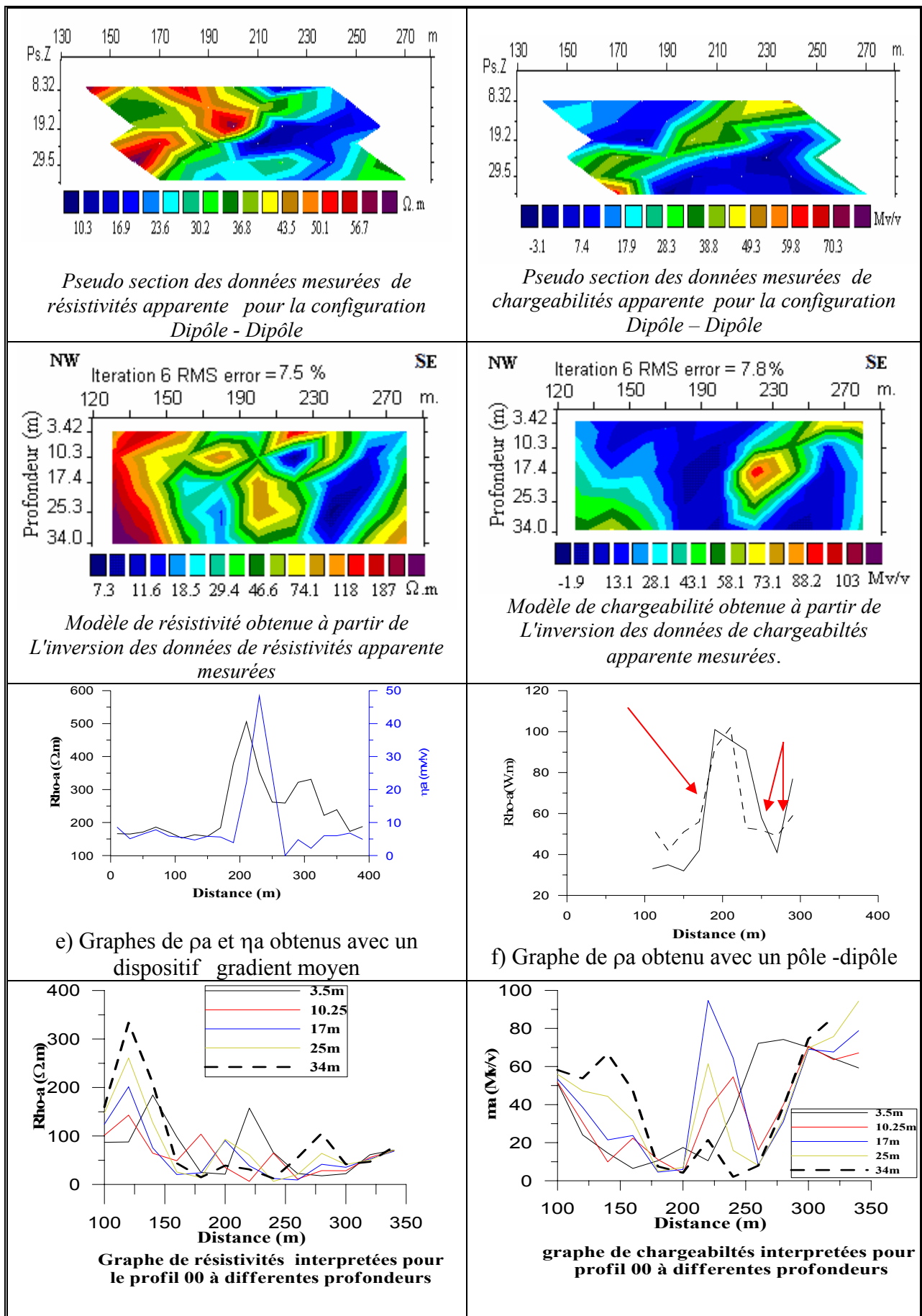


Figure IV.10 Interprétation 2D du profil 00

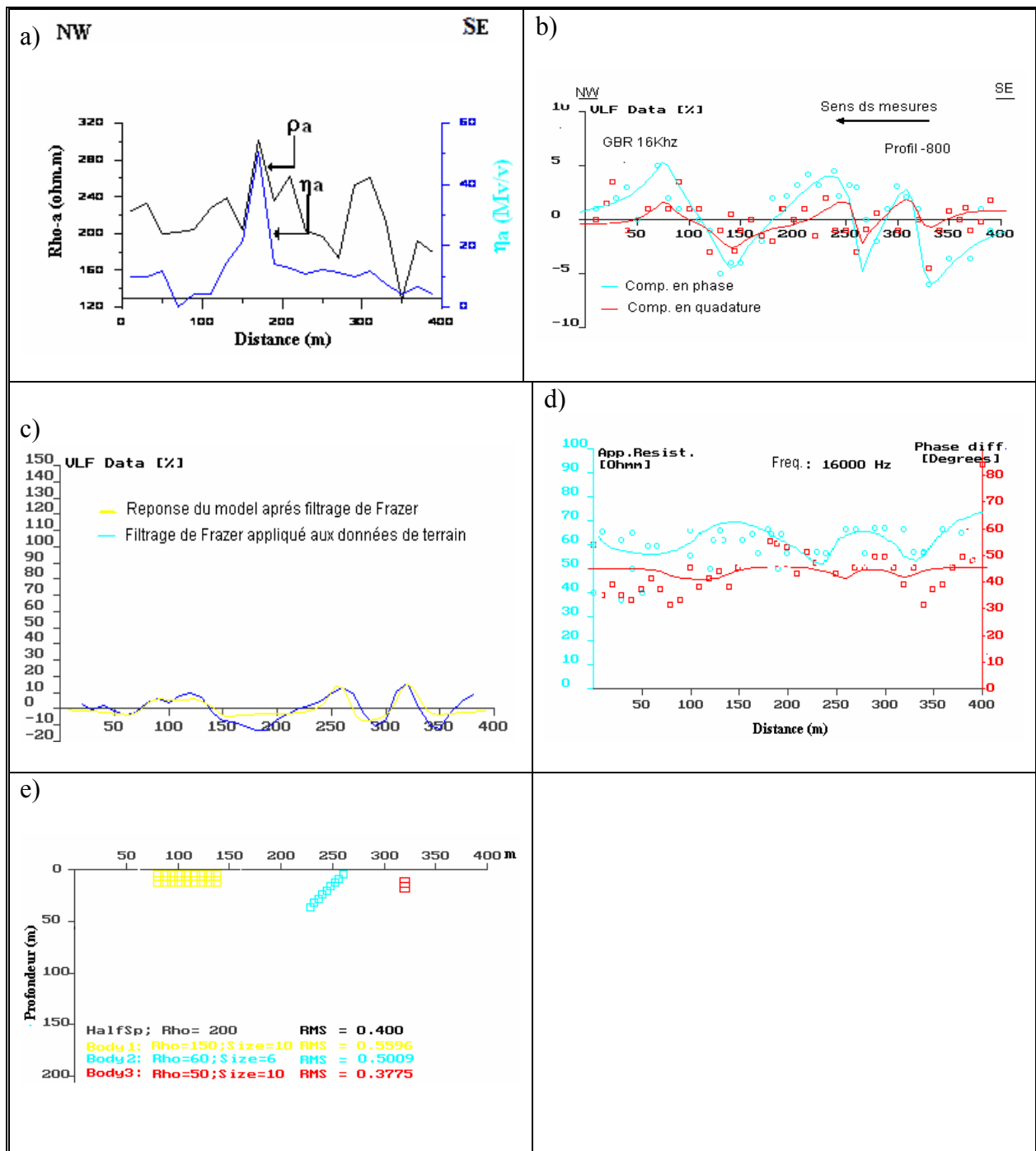


Figure IV.11 Interprétation 2D du profil 800W a) graphe de résistivité et de chargeabilité ; b) Profil EM16. c) graphe des données de la composante réelle filtré ; d) Profil EM16R e) Modèle réalisé suivant le profil 800W à partir données électriques et électromagnétiques.

IV.5.3.3 Profil 2D N° 800 W

L'analyse combinée des deux méthodes électrique, avec le dispositif gradient moyen AB = 1200m, MN=20m, et électromagnétique, avec les techniques VLF et VLF-R est réalisé sur ce profil

Le profil électrique montre des valeurs de la résistivité apparente, allant de 120 Ω .m à environ 300 Ω .m. Cette variation est aussi observée sur le profil VLF-R effectué au même endroit. Le profil de chargeabilité décèle une forte réponse PP entre les stations 150 et 190m. Le modèle proposé à partir des données électromagnétiques et électriques est représenté sur la figure (Fig.V.11e). Le filon principal d'épaisseur variable est localisé probablement entre les stations 200 et 250. La forte réponse PP est probablement associée aux sulfures (TR-1). Un conglomérat composé de galets arrondis et argileux est localisé dans la partie Nord Ouest. Il est moins résistant que l'encaissant.

IV. 5.4 Transformation des cartes de résistivité électrique en cartes VLF-EM

Pour une interprétation 3D, nous avons utilisé les données électriques de cette campagne. Nous illustrons seulement les résultats des transformations sur les zones 200W à 100E et 1200 E à 1400 E. Après avoir filtré les données brutes par un filtre non linéaire pour le rejet de bruit, on a appliqué le filtre de dérivé à la pseudo – VLF (fig.IV.12a2 et b2). Ce filon qui est constitué de blocs (fig. IV.12), a une largeur d'environ 10m. L'estimation de la profondeur du filon est variable. Elle est inférieure à 2m pour la plus part des zones étudiées.

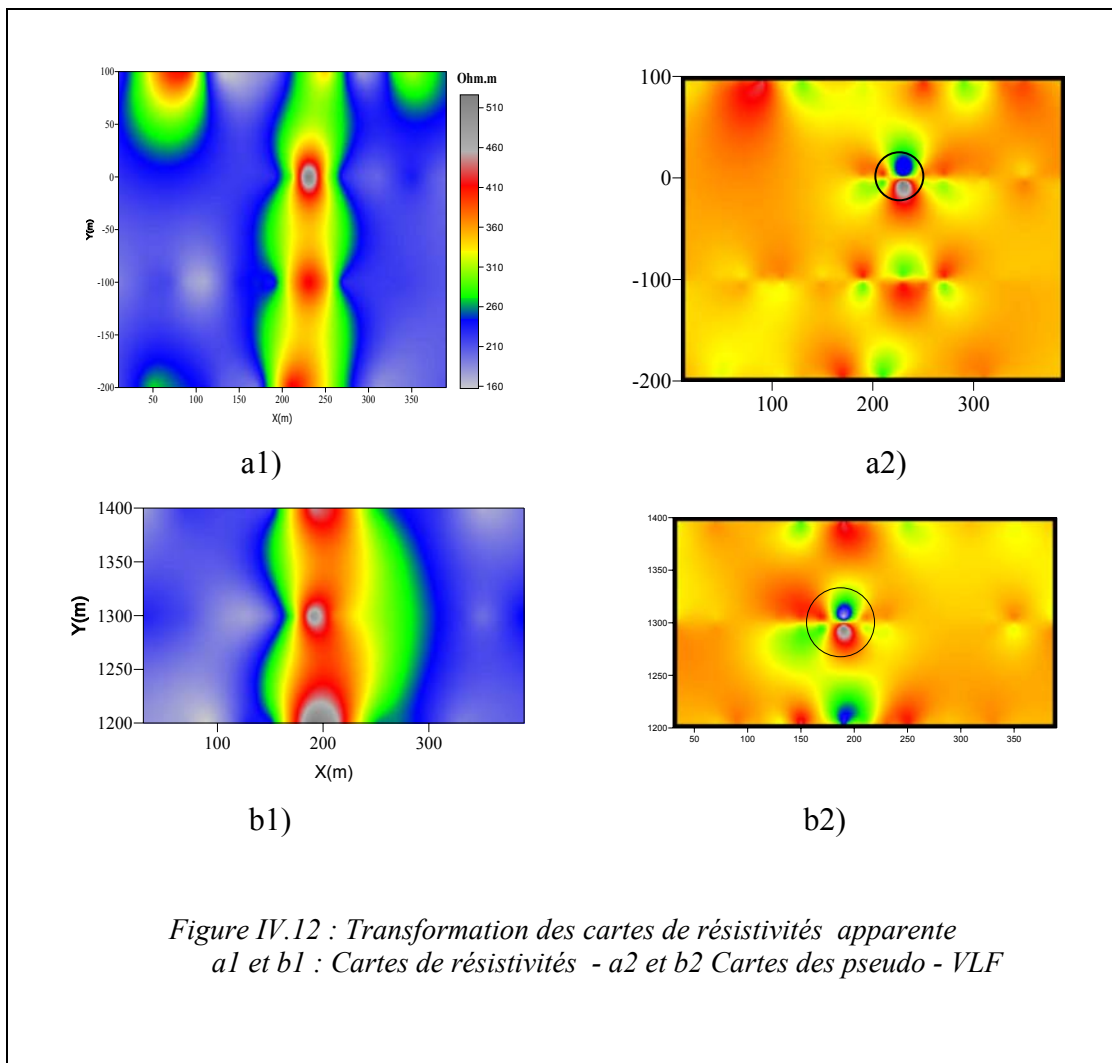


Figure IV.12 : Transformation des cartes de résistivités apparente
 a1 et b1 : Cartes de résistivités - a2 et b2 Cartes des pseudo - VLF

IV.5.5 Conclusion

Les deux paramètres, mesurés simultanément, nous permettent sur la base des différences et des corrélations entre la PP GM et les autres techniques électriques, à savoir l'imagerie électrique et le pôle – dipôle croisé (profilé combiné), de préciser et de reconnaître le filon minéralisé. L'interprétation par modélisation et l'inversion peuvent apporter une solution au problème.

La méthode de résistivité azimutale du site minéralisé de Toumiat, La direction du filon est Nord 60°, il a la même direction que la série des filons existant dans la région.

Au cours de cette mission, en plus des méthodes électriques, nous avons utilisé la méthode électromagnétique. Les résultats obtenus à l'aide de cette dernière sont intéressants. Néanmoins, les mesures n'ont pas pu se dérouler comme prévu, à cause des conditions climatiques, notamment le vent fréquent dans la région et le temps limité pour cette mission (3 jours). Ceci a rendu l'interprétation difficile.

Conclusion Générale

En prospection de sub- surface, le problème le plus fréquent est de localiser les structures du sous sol, de préciser la géométrie de celles-ci et de caractériser le type de roche qui les composent. Ces dernières années les besoins en reconnaissance de ces structures proche de la surface du sol s'accroissent de jour en jour ; notamment dans les domaines d'archéologie, de l'environnement, du minier, etc... Les méthodes électriques, en combinaison avec celles d'électromagnétisme, développées lors de cette étude, ont été un moyen adéquat pour la détection et l'identification de ces structures de subsurface. Ces dernières, de différentes formes, peuvent être minéralisées ou non.

Les méthodes électriques de résistivité et celle de polarisation provoquée ont été développées et mises en œuvre simultanément, car le couplage de celles-ci permet de délimiter plus précisément les formations étudiées. Effectivement, les anomalies obtenues par l'utilisation de ces deux méthodes de résistivité et de polarisation provoquée correspondent aux mêmes limites des structures.

Par ailleurs, il faut signaler que l'introduction du filtre dérivée, en prospection électrique, permet la transformation d'une carte de résistivité en une carte de VLF-EM ou pseudo-VLF. Ceci a permis d'améliorer l'interprétation des données électriques. C'est ainsi que les cartes transformées de résistivités en VLF-EM ont permis de confirmer la géométrie des structures étudiées.

L'interprétation électrique réalisée, se divise en deux méthodes. La première est appelée méthode directe (modélisation). Dans celle-ci, on détermine la réponse, en l'occurrence la résistivité ou la chargeabilité, d'un modèle typique tel qu'un dyke, un filon ou une faille. Si l'on connaît les réponses de ces corps et si on les compare aux mesures réelles, on peut estimer une structure sous-jacente. Cette méthode s'avère longue et inadéquate pour des structures complexes, sachant que celles-ci, sont les plus répondues dans la nature. L'autre méthode, dite indirecte (inversion), consiste à trouver, par optimisation, un modèle de paramètres physiques

dont la réponse calculée va correspondre aux observations (valeurs mesurées). L'optimisation se fait, généralement, en minimisant l'écart entre les données calculées et les données réelles. Les méthodes électriques, ainsi développées dans cette étude, s'appuient sur l'utilisation des algorithmes d'inversion de Loke et Barker,(1995).

C'est ainsi que l'analyse des images (résistivité électrique, chargeabilité), résultat de l'inversion des données synthétiques, nous a permis de différencier et d'identifier les structures prospectées. L'inversion conjointe, appliquée à plusieurs configurations, a amélioré, significativement, la résolution du modèle calculé par rapport au modèle vrai. Les différents cas traités dans le chapitre III, montrent l'intérêt des résultats obtenus pour identifier, essentiellement, un corps conducteur enfoui dans un encaissant de résistivité élevée et inversement .

La campagne géophysique, menée dans la chaîne d'Ougarta, à but d'exploration minière, permet de conclure que les objectifs définis sont atteints. Il s'agit notamment d'évaluer les minéralisations sulfurées, mises en place dans le Paléozoïque inférieur. C'est ainsi qu'il apparaît, clairement, que les méthodes électriques (résistivité) utilisées lors de cette campagne géophysique sur terrain ont permis de cartographier le filon de quartz présent dans la région de Toumiat. Les limites identifiées pour cette structure résistante coïncident avec les mesures de chargeabilité à cet endroit. Pour les deux panneaux électriques réalisés, la tomographie électrique a permis de délimiter la géométrie de la structure allongée (épaisseur et profondeur). On retient alors à travers cette étude que la méthode de polarisation provoquée permet de faire la distinction entre les zones minéralisées et celles stériles. C'est ainsi qu'on a constaté une nette anomalie en chargeabilité sur tout le filon. Notons que la cartographie, par les méthodes électromagnétiques, a permis de confirmer la présence du filon et des sulfures au Sud Ouest de la zone d'étude (réponse VLF) alors que dans cette zone la méthode électrique de résistivité n'a pas été concluante

Notons que les structures cassantes, observées en géologie, se manifestent sous forme de failles orientées NW-SE. Celles-ci sont identifiées sous forme de filons minéralisés, par les résultats d'électrique et d'électromagnétique. Ces filons de quelques kilomètres de longueur et de pendages sub-verticaux se sont mis en place les zones de failles et se sont encaissés dans les formations gréseuses du cambrien.

Après traitement des données, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus au cours de cette campagne (2002) et afin d'accéder à de meilleures images structurales, on suggère :

- D'augmenter et de prolonger le profil 00 dans sa partie Est, car une forte réponse PP a été constatée à cet endroit sur terrain et confirmée également par les tranchées réalisées.
- De poursuivre et d'étendre la prospection, par les techniques VLF et VLF-R, sur tout le secteur, notamment, pour les profils 600 E à 1000 E afin de confirmer le décrochement constaté entre ces deux profils.
- De diminuer le pas de mesure sur les profils d'imagerie électrique afin de mieux délimiter le filon.
 - Faire une étude de détail avec d'autres profils situés au Sud Ouest (exemple profil 500W).
 - Faire un levé magnétique.

Enfin la concordance des résultats d'électrique et d'électromagnétique doit être pris en compte, désormais, pour l'identification et l'évaluation des structures géologiques de subsurface recherchées. Ces méthodes demeurent indispensables et efficace en prospection de subsurface.

Références Bibliographiques

- **Abbes, K**, 2001, Transformation des données électromagnétiques de sub-surface, Thèse de magister USTHB (Alger).
- **Baker H. A., Djeddi M., Hamoudi M., Khaldaoui F. & Benhammam k.** Geophysics As A Tool For Delineating Cavities In Proposed Residential Site – A Case Study. “66th EAGE Conférence 2004
- **Baker H.A, and J.O. Myers**, 1979: VLF-EM model studies and some simple quantitative applications to field results, *Geoexploration*, 17, pp 55-63.
- **Barthes, V.**, 1977, Modélisation tridimensionnelle des problèmes de la prospection Électrique en milieu non tabulaire, Thèse de doctorat d’université de Languedoc.
- **Bertin, J**, 1968, some aspect of induced polarization (time domain) . *geophysical prospecting* vol . 44, N°4, 401-426.
- **Barker, R.D.**, 1989, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54(8): 1031-1037.
- **Barker, R.D.** (1992). A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break*, 10(2): 53-62.
- **Bhattacharya, B.B.; Biswas, D.** (1992). IP response for a 2D horizontal cylinder. *Geophysical Prospecting*, 40: 651-670.
- **Bourenane H., King D., Le Parco R., Isambert M., & Tabbagh A., 1998**, Three-dimensional analysis of soils and surface materials by electrical resistivity survey. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, pp. 5-23
- **Chaussier, J. B.**, 1981, *Manual du prospecteur minier*. vol , n°2 , BRGM.
- **Djadia, L.**, 2001, Etude des caractéristiques de la wz par les méthodes électriques et électromagnétiques, thèse de magister USTHB (Alger).
- **D' amours, I** ,1998; Modélisation et interprétation de tomographie de résistivité et de polarisation provoquée entre trous de forage (MSc.A). Université de Montréal.
- **Das, U. C. and D. P. Ghosh.** 1974. The determination of filter coefficients for the computation of standard curves for dipole resistivity sounding over layered earth by linear digital filtering. *Geophys. Prosp.* v. 2, no. 4, pp. 765-780.
- **DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S.**, 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- **Djeddi, M.**, 1999, Nouvelles méthodes d’interprétation 3d des données électromagnétiques. Thèse de doctorat d’ état, USTHB (Alger).

- **Djeddi M., Baker, H.A., & Tabbagh, A.**, 1998. Interpretation of VLF-EM anomalies of 3d structures by using linear filtering techniques. *Annali di geofisica*, vol. 41, N°2 , 151-163.
- **Edsen N.A. ET Niessen J.**, 1997. The calculation routine of VLFMOD. *Geoph. Prosp.*, 34, P. 1099-1110.
- **Edwards L.S.**, 1977: A modified pseudo section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036
- **Fraser D.C.**, 1969. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, vol 34 , n°6, pp 958-967.
- **Fraseri, A, Fasher, N**, 2000, Finite element modelling of IP anomalous effect from bodies of any shape located in rugged relief area. *Journal of the Balkan geophysical society*. Vol. 3, No 1.
- **Asperikova, E, & Morrisson H. F**, 2001. Mapping of induced polarization using natural fields. *Geophysics*, 66, 137, PP. 137-147.
- **Ghosh, D. P.**. 1971a. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophys. Prosp.* v. 19, pp. 192-217.
- **Ghosh, D. P.**. 1971b. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geophys. Prosp.* v. 19, no. 4, pp. 769-775.
- **Geonics**, Manuel d'opération EM16 ET EM16R.
- **Griffiths, D.H.**, and **Barker, R.D.**, 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology: *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211–226.
- **Guerin, R.**, and **Benderitier, Y.**, Shallow karsts exploration using MT-VLF and DC resistivity methods. *Geophysical prospecting* vol.43 , N°5 , 623-634.
- **Guerin, R., Tabbagh, A** and **Andrieux, P.**, 1994. Field and/or resistivity mapping in MT-VLF and implications for data processing. *Geophysics*, vol 59 , n°11, 1695-1712.
- **Hagrey S.A. & Michaelsen J.**, 1999. Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at bokhorst , germany, *geophysics*, , 64, pp. 746-753
- **Guptasarma, D.**, 1984,. True and apparent spectra of buried polarizable targets. *Geophysics*, vol.49 , n°2, 171-176.
- **Hohmann, W.G.**, 1975, Three dimensional induced polarization and electromagnetic modelling. *geophysics*, vol.40 , n°2, 309-324.
- **Khaldaoui, F. et Saidi, N.**, 1991. Application des sondages électriques à la localisation du contact eaux douces /eaux salées « hôtel Hilton » ,mémoire. ing (usthb)
- **Koefoed, O.**, 1979, *Geosounding principles*, 1 (resistivity sounding measurements). Elsevier, Amsterdam, 276.

- **Komarov, V. A.** , 1972. Electrical prospecting for induced polarization method. publisher by njedra, (in Russian).
- **Legrand – Blain M. 1985.** Dynamique brachiopodes carbonifères sur la plate forme carbonatée du Sahara algérienne paleoenvironnement, paleobiogeographie, évolution. Thèse de doctorat. Université de bordeaux, 320p
- **Li, Y. and Oldenburg, D. W.**, 2000. 3D inversion of induced polarization data, geophysics, 65,1931-1945.
- **Loke, M. H., and Barker, R. D.**, 1995, last- squares deconvolution of apparent resistivity pseudo sections. geophysics, vol. 60 , n°6, 1682-1690.
- **Loke, M. H.**, 1995-2001. Electrical imaging for environmental and engineering studies. a practical guide to 2-d and 3-d surveys
- **Mcneill, J. D. and LABSON, V.**, 1991, Geological mapping using VLF Radio Fields. In Ward SH, Ed., Electromagnetic methods in applied geophysics – Investigations in Geophysics, Volume 3: Soc. of Expl. Geophysics.
- **Mehenni, Y.**, 1995. Cartographie de résistivité électrique en géophysique de subsurface. these de doctorat d'Université pierre marie curie – paris VI. N°9, 1327-1341.
- **Menke, W.**, 1989: Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic Press Inc. London, pp. 260.
- **Michot D.** 2003. Intérêt de la géophysique de susurface et de télédétection multi spectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intra parcellaire. Thèse de doctorat (Paris 6).
- **Ogilvy, R.D., Meldrum, P.I., and Chambers, J.E.**, 1999, Imaging of industrial waste deposits and buried quarry geometry by 3D resistivity tomography: European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, **3**, 103–113.
- **Olayinka, A. I., Yaramanci, U.**1999. Use of 2D geoelectrical imaging at a waste dump site with high resistivity contrast. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 3, 221 – 244
- **Oldenberg, D. W.**, and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data: Geophysics, 59, 1327-1341.
- **Oldenberg, D. W.**, and Li, Y , 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. Geophysics, vol. 64, N°2, p. 403-416.
- **O'Neill, D. J.** 1975. Improved linear coefficients for application in apparent resistivity computations. Bull. Austral. Soc. Explor. Geophys. v. 6, no. 4, pp. 104-109.
- **ORGM**, 2002, Prospection des minéralisations a AU, MO, NI, CO, dans le faisceau de daoura (chaîne d'ougarta) rapport interne
- **Panissaud C., Michot D., Benderittier , Y & Tabbagh, 2001.** On the effectiveness of 2d electrical inversion results: an agricultural case study, geophysical propecting , 49, pp. 570-576

- **Paterson, N. R., and Ronka, V.**, 1971, Five years of surveying with the with the VLF-EM method. *Geoexploration* 9, 7-26.
- **Roy , A & Apparo, A**, 1971, Depth of investigation in direct current methods . *geophysics*, vol. 36. N° 5 .
- **Roy, A., Poddar, Y. M.**, 1981, A simple derivation of siegel's time domain induced polarization formula. *geophysical prospecting* vol.29, 432-437.
- **Sasaki, Y.**, 1992: Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical prospecting*, vol 40, 453_463.
- **Scintrex**, manuel d'opération TSQ3 et IPR-10A
- **Scintrex, ltd** , VLF interprEtation manual.
- **Scott, C.J., and West, G.F**, 1969, Induced polarization of synthetic, high- resistivity rocks containing dissimnad sulfides . *geophysics*, vol.34, n°1, 87-100.
- **Siegel, H. O.**, 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization: *Geophysics*, vol 24, 547-565.
- **Stefanescu, S., Schlumberger, C., Schlumberger, M.**, 1930. sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a` couches horizontales, homogenes et isotropes. *journal de physique et du radium*,7, 132–140.
- **Tabbagh A, Tabbagh J., Dabas M.** 1994. 3-D inversion in subsurface electrical surveying - I. Theory. *Geophys. J. Int.* 119, 975-990.
- **Tarantola A., 1987** Inverse problem theory, Elsevier, New York.
- **Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E.**, 1990, *Applied Geophysics*, 2^a ed., Cambridge University Press.
- **Tournier .D**, 1977. Résultats d'études théoriques et expérimentales concernant les phénomènes de polarisation provoquée dans le cadre d'application géophysiques. Thèse de doctorat (Paris).
- **Ward SH**, Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics – Investigations in Geophysics*, Vol 3. Soc. of Expl. Geophysics.
- **Wright, J. L.**, 1988. VLF interpretation manual. EDA Instruments, Toronto, Ontario, Canada.
- **Zohdy, A.R., Eaton, G.P., and Mabey, D.R.**, Application of surface geophysics to ground- water investigations. Book2, Collection of environmental data, USGS Publications.

Liste des notations et abréviations

B :	Densité de flux magnétique B (Webber/m ²)
D :	Densité de flux électrique (Coulomb/m ²)
E :	Champ électrique (Volt/m)
FE :	Effet de fréquence
j :	densité de courant
J :	Matrice jacobienne des dérivées partielles
H :	Champ magnétique (Ampère/m)
I :	Intensité du courant
V :	Potentiel
V' :	Voltage secondaire
η :	Chargeabilité
ηa :	Chargeabilité apparente
Φ :	Fonction sensibilité
ρ :	Résistivité
ρa :	Résistivité apparente
ρa2:	Résistivité apparente mesurée en hautes fréquences
σ :	Conductivité électrique (Siemens/m)
σi :	Conductivité d'une cellule
σ' :	Conductivité en présence d'un voltage secondaire
ε :	Permittivité électrique (Faraday/m)
ε _r :	Permittivité relative du milieu (sans unité)
ε ₀ :	Permittivité diélectrique dans le vide
μ :	Perméabilité magnétique (Henry/m)
μ _r :	Perméabilité relative du milieu (sans unité)
μ ₀ :	Perméabilité magnétique dans le vide
ORGM	Office National de Recherche Géologique et Minière

Liste des figures

Figure I.1 :	Stratification du sous-sol.....	5
Figure I.2A :	Représentation d'une acquisition en traîné (Profilage) avec un dispositif Wenner.	9
Figure I.2B :	Les dispositifs électriques utilisés.....	10
Figure I.3 :	Représentation des différentes configurations d'électrodes avec les différents niveaux d'acquisition	12
Figure I.4 :	Phénomène PP –Domaine temps	14
Figure I.5 :	Schémas de la polarisation de l'élément de volume.....	14
Figure I.6 :	Principe de la méthode VLF.....	19
Figure I.7 :	Ellipse de polarisation.....	22
Figure II.1 :	Présentation des paramètres du modèle.....	24
Figure II.2 :	Paramètres du modèle théorique correspondant a un demi-espace comportant une structure conductrice affleurante.	25
Figure II.3 :	Modèle théorique représentant une structure Conductrice sous une Couverture résistante.	26
Figure II.4 :	Modèle d'un demi-espace comportant deux structures, l'une résistante de forme cubique, et l'autre conductrice de forme L	26
Figure II.5 :	Résultats obtenus a partir de la modélisation 3D d'un dyke	29
Figure II.6:	Résultats obtenus à partir de la modélisation 3D d'un dyke à la profondeur de 10m.	30
Figure II.7 :	Résultats obtenus à partir de la modélisation 3D de deux corps.....	31
Figure II.8 :	Carte de : a) résistivité pour une structure conductrice ; b) Pseudo-VLF.	34
Figure II.9 :	X- dérivée de la pseudo –VLF et coupe suivant X=90 et Y= 25.....	34
Figure II.10	Y-dérivée de la pseudo-VLF et coupe à X =90.....	35
Figure II.11	Abaque (estimation de la profondeur).....	35

Figure III.1:	Définition des problèmes direct et inverse.....	38
Figure III.2	Diagramme schématique d'un modèle (dyke) ainsi que l'arrangement des blocs employés par le programme d'inversion	41
Figure III.3	Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique calculées et interprétée obtenues a partir d'un model de dyke affleurant	44
Figure III.4:	Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilités électrique calculées et interprétée obtenues a partir d'un model de dyke chargeable, affleurant.	45
Figure III.5 :	Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique calculées et interprétée obtenues à partir d'un model de dyke sous une couverture résistante	46
Figure III.6 :	Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique calculées d'un model de dyke chargeable sous une couverture peu chargeable	47
Figure III.7 :	Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique calculées interprétée, obtenues à partir d'un model de deux corps l'un résistant et l'autre conducteur.	50
Figure III.8 :	Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique calculées interprétée, obtenues à partir d'un model de deux corps l'un résistant et l'autre conducteur.	51
Figure III.9 :	Présente les variations latérales et verticales de la résistivité électrique calculées et interprétée, obtenues à partir des modèles de terrain.	52
Figure III.10 :	Présente les variations latérales et verticales de la chargeabilité électrique. Calculées et interprétée, obtenues à partir des modèles de terrain.	53
Figure III.11 :	Interprétation 2D ; a) profil VLF-R, b) réponse du Model Après filtrage de Frazer , c) profil VLF , d) Modèle de dyke	55
Figure III.12 :	Interprétation 2D ; a) profil VLF-R, b) réponse du model après filtrage de Frazer ,c) profil VLF , d) Modèle de dyke sous une couverture.	56
Figure III.13 :	Interprétation 2D ; a) profil VLF-R, b) réponse du model Après filtrage de Frazer , c) profil VLF , d) Modèle de deux corps	57
Figure III.14 :	a) pseudo section en résistivité apparente, b) Modèle de Cavité, c) modèle inversé avec un maillage étendu, d) coupe des valeurs de l'indice DOI et maillage étendu, e) Positions des points de mesure en résistivité apparente	60

Figure III.15 :	Coupe de résistivités interprétées et profil de l'indice DOI, et image pris...62 lors du creusage pour vérifier la nature de l'anomalie électrique	62
Figure IV.1 :	Situation géographique de la région d'étude.....64	64
Figure IV.2 :	Schémas géologique et structural Ougarta (d'après les travaux.....66 de EREM (1976-1981) ; DONZEAU 1971).	66
Figure IV.3 :	Plan de position des points de mesures.....67	67
Figure IV.4 :	Les instruments de la polarisation provoquée.....68	68
Figure IV.5a :	Les instruments électromagnétiques : VLF.....69	69
Figure IV.5b :	Les instruments électromagnétiques : VLF-R.....69	69
Figure IV.6 :	a) Vue en perspective de 22 profils linéaires de résistivité.....72 équidistants de 100m ; b) Carte de résistivité apparente de Toumiat ; c) Carte de chargeabilité apparente	72
Figure IV.7 :	Projection de résistivités apparentes Azimutales 73 a) pour la station 190 du profil 1600 b) pour la station 230 du profil 00	73
Figure IV.8 :	Cartes électromagnétiques ; a) Carte de la composante en phase ;.....74 b) Carte de la composante en phase filtrée ; c) Carte de VLF-R	74
Figure IV.9 :	Interprétation 2D du profil 1600.....76	76
Figure IV.10 :	Interprétation 2D du profil 00.....78	78
Figure IV.11 :	Interprétation 2D a) graphe de résistivité et de chargeabilité ;.....79 b) Profil EM16 c) graphe des données de la composante réelle filtré d) Profil EM16R e) Modèle réalisé suivant le profil 800W	79
Figure IV.12 :	Transformation des cartes de résistivités apparente81 a1 et b1 : Cartes de résistivités - a2 et b2 Cartes des pseudo - VLF	81

Liste des Tableaux

Tableau I.1:	Caractéristiques des différentes configurations d'après Loke 2001.....13	13
Tableau I.2	liste des émetteurs les plus disponibles au monde.....20	20