UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE
DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ EN SURFACE

ERENSIN PIERRE SANGALA
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)
SEPTEMBRE 1996

© Erensin Pierre Sangala, 1996.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26511-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE
DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ EN SURFACE

présenté par: SANGALA Erensin Pierre
en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M.TANGUAY Marc, Ph.D., président
M.CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche
M.SPITZER Klaus, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Tous mes remerciements au professeur Michel. Chouteau, mon directeur de recherche, pour ses multitudes et importants conseils scientifiques à la réalisation des différents stades de ce projet. Il a su judicieusement me diriger et m'encourager autant dans les recherches que dans la rédaction de ce mémoire avec une patience inébranlable. Je tiens à lui dire également un grand merci pour le support financier qu'il m'a offert et sans lequel il aurait été plus difficile de mener à bout ce travail.

Je remercie les membres du jury M. Marc G. Tanguay et M. Klaus Spitzer qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à remercier M. Keyvan Safai-Naraghi pour sa contribution considérable quant à l'élaboration des programmes qui ont été développés dans le cadre de cette étude.

Je suis très reconnaissant à M. Iván Marroquín pour avoir partagé avec lui des réflexions de travail.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à tous ceux et celles (l'équipe du laboratoire de géophysique) qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce projet et pour la bonne atmosphère qu'ils y ont fait régner.

Enfin mes remerciements à mon épouse qui a fait preuve de patience et de compréhension et m'a soutenu moralement lors de la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

Une technique d'imagerie géophysique 2-D et 3-D basée sur les principes de rétroprojection a été développée pour les données de résistivité électrique acquises avec la configuration pôle-pôle à la surface du sol. La technique 2-D est appliquée sur un profil de mesures, tandis que la technique 3-D est effectuée sur une grille régulière de mesures de type E-SCAN.

La technique a été appliquée sur des données synthétiques et réelles de terrain. Les résistivités apparentes calculées, à partir des potentiels mesurés en pôle-pôle, peuvent être retroprojetées pour obtenir l'image des structures 2-D ou 3-D.

L'efficacité de la technique à produire des images des structures de résistivité a été discutée en considérant des modèles synthétiques simples 2-D et 3D. Des tests sur l'effet des divers paramètres (longueur du dispositif, écartement des électrodes, profondeur et taille du corps, nombre d'électrodes, discrétisation de la grille, contraste de résistivité) pouvant influencer la qualité des images reconstruites ont été réalisés. L'analyse des résultats obtenus pour des modèles synthétiques a révélé que la technique donne une reconstruction acceptable des structures de résistivité envisagées. Il en ressort cependant que l'image des corps peu profonds est mieux reconstruite que celle des corps plus en profondeur. Les résultats des tests concernant l'effet des paramètres du modèle sur la qualité des images reconstruites ont permis de mettre l'accent sur le choix optimum de ceux-ci, faute de quoi des images erronées pourraient se produire.

Ces tests ont montré qu'on obtient une meilleure restitution lorsque les résistivités du corps et de son milieu sont suffisamment contrastées. Les corps dont la profondeur est plus élevée et les dimensions sont moins grandes que l'espacement entre les électrodes produisent une restitution médiocre des images. Pour des corps de tailles différentes, mais faisant intervenir le même nombre d'électrodes, la restitution de l'image sera fonction de l'écartement d'électrodes utilisé. Elle est meilleure dans le cas où la distribution des électrodes assure une couverture adéquate par rapport à la taille de la structure en question.

L'utilisation du même nombre d'électrodes pour un corps donné, mais avec des espacements différents entre les électrodes a conduit aux conclusions suivantes: pour des espacements d'électrodes trop grands ou trop petits par rapport à la taille de l'hétérogénéité, les images obtenues avaient été mal restituées. Un choix convenable de l'espacement entre les électrodes produit une bonne restitution de l'image de la structure. Les exemples sur des modèles synthétiques ont montré que le maillage de la grille joue un rôle non négligeable en ce qui concerne la restitution des images. En fait, dans la partie centrale du modèle, les noeuds doivent être peu espacés pour assurer une bonne résolution, sinon l'image obtenue suite à la rétroprojection ne serait pas bien restituée ou ne ressortirait pas de façon distincte. La résolution est sujette à la discrétisation en cellules du modèle 2-D ou 3-D pour la reconstruction. En effet des cellules de dimensions plus petites peuvent en principe produire des images plus détaillées, mais le processus de la rétroprojection pourrait donner des images trompeuses lorsque la taille des cellules est très petite. Shima (1992) a en effet fait la lumière sur cette question en suggérant que la taille de la cellule devrait être limitée à des dimensions pas plus petites que la moitié de l'espacement entre les électrodes. Il admet cependant que cette limitation entraîne une résolution minimum pour ce type d'imagerie, qu'est la rétroprojection. Dans le cas de cette étude, la taille de la cellule ne doit pas être plus petite que le tiers de l'espacement entre les électrodes. Le nombre d'électrodes utilisé joue également un rôle non négligeable dans la résolution des images produites. Ainsi, pour un corps et un espacement d'électrode donnés, on obtient une meilleure résolution dans le cas où le nombre d'électrodes est suffisamment élevé pour assurer une bonne couverture du sous-sol à investiguer. Ce nombre est en relation avec la Lx (longueur du profil) et h (profondeur du corps).

Les résultats de l'application de la technique de rétroprojection (3-D) sur des données réelles sont également présentés et corrèlent bien avec la géologie du site où les mesures ont été prises.

En général, les résultats obtenus par reconstruction sur des données synthétiques et réelles font ressortir la géométrie de la distribution de résistivité du modèle d'essai ou de la

structure du lieu des mesures. Les contrastes de résistivité de l'image sont cependant beaucoup moins accentués que ceux du modèle initial ou de la structure. La technique d'imagerie est tout à fait efficace, un ensemble de données consistant à 420 mesures de potentiel en surface peut être converti en image 2-D de 2500 cellules en 5 minutes sur un **PC 486** dans le cas 2-D. En ce qui concerne le cas 3-D, la conversion en image 3-D de 4913 cellules pour 600 valeurs de potentiel en surface se fait en 20 minutes sur un **PC 486** et 5 minutes sur une station de travail **Sun SPARCStation 5**.

ABSTRACT

2-D and 3-D geophysical imaging techniques, based on backprojection technique, have been developped for electrical resistivity data collected at the Earth's surface using pole-pole configuration. The 2-D technique is applied on profile measurements, whereas the 3-D one is carried out on regular grid measurements of the E-SCAN type.

The imaging technique has been tested on both synthetic and real data. The calculated apparent resistivities from measured pole-pole potential data can be backprojected to obtain the image of 2-D and 3-D structures.

To illustrate the accuracy of the technique to produce an image of resistivity heterogeneities, simple 2-D and 3-D synthetic models are discussed. Tests on the effect of various parameters (spread length, electrode spacing, depth and size of the body, number of electrodes, grid discretization, resistivity contrast) that can influence the quality of the reconstructed image have been achieved. Test results on the effect of model parameters on the quality of the reconstructed images allowed us to emphasize the optimum choice of the model parameters. It results from these analyses that near-surface structures are better reconstructed than those located deeper. It has also been shown that one gets a best restitution of the image when the resistivites of the body and its background are relatively well contrasted. Bodies whose depths are greater and sizes are less than the electrode spacing, yield a poor restitution of the image. For bodies with different sizes, but involving the same number of electrodes, the restitution will be a function of the electrode spacing used. Good restitution is obtained in the case where the grid of electrodes gives an adequate cover compared to the size of the considered structure. Using the same number of electrodes for a given body, but applying different electrode spacings, leads to the following conclusion: for too large or too small electrode spacings compared to the size of the body, the

reconstructed images have poor restitution. However, an optimum choice of the spacing gives a reasonable restitution of the image. Synthetic model examples have shown that the grid discretization is important for having good resolution. Thereby, in the central part of the grid, the nodes must be finely spaced to provide a maximum resolution, otherwise, the reconstructed image will not be well accentuated. The restitution of the image depends also on the discretization in cells of the 2-D or 3-D model for the reconstruction. In fact, cells with small sizes theoretically give more detailed image, but the backprojection process can give misleading images when the cell sizes are very small. Shima (1992), has suggested that the size of the cells may be limited to dimensions not less than half of the electrode spacing. He agrees however, with the fact that this limitation gives minimum restitution for imaging techniques based on backprojection. For this study, the cell size must not be less than one third of the electrode spacing. The number of electrodes involved is also important with regard to the restitution of images. This number is related to Lx (profile length) and h (depth of the body). For a given body and electrode spacing, best restitution is obtained in the case when the electrode spacing is sufficiently large to cover adequately the part of the ground to be investigated. Results for the 3-D technique, applied to real data, are presented; they give a good correlation with the geology of the survey site.

In general, the geometry of the recovered resistivity distribution matches that of the trial model quite well; however the resistivity contrasts are much less than those of the initial models. The imaging technique is quite efficient: a data set consisting of 600 surface potential measurements can be converted into a 3-D image of 4913 cells in 20 minutes on a **PC 486** and 5 minutes on a work station **Sun SPARCStation 5**. For the case of 2-D, a data set consisting of 420 surface potential measurements can be converted into a 2-D image of 2500 cells in 5 minutes on a **PC 486**.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS....iv
RÉSUMÉ....v
ABSTRACT....viii
TABLE DES MATIÈRES....x
LISTE DES FIGURES....xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE....1

CHAPITRE 1- MÉTHODE DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

1.1 Introduction....4
1.2 Théorie des desures de résistivité....4
1.3 divers dispositifs de mesure....8
1.3.1 Le profilage électrique....8
1.3.2 Le sondage électrique....9
1.3.3 Mise en oeuvre de quelques profilages....9
1.3.4 Mise en oeuvre de quelques sondages électriques....11
1.3.5 Électrodes à l'infini....13

CHAPITRE 2 - BASES THÉORIQUES DE L'IMAGERIE ÉLECTRIQUE

2.1 Revue de la documentation....15
2.2 Imagerie 2-D (Noël et Xu, 1991)....22
2.3 3-Développement de l'imagerie 2-D et 3-D en configuration pôle-pôle....29
2.3.1 Développement de l'imagerie 2-D....34
2.3.2 Développement de l'imagerie 3-D....37

CHAPITRE 3 - MODÉLISATION ET IMAGERIE PAR INVERSION APPROXIMATIVE 2-D ET 3-D

3.1 Introduction....42
3.2 Principales étapes des programmes de rétroprojection 2-D et 3-D....42
3.3 Distribution spatiale des coefficients de sensibilité G....44
3.4 Modélisation tomographique électrique 2-D et 3-D....52
3.4.1 Modélisation tomographique électrique 2-D....52
3.4.2 Modélisation tomographique électrique 3-D....54
3.5 Reconstruction d'image 2-D et 3-D avec des données synthétiques....56
3.5.1 Reconstruction d'image 2-D avec des données synthétiques....56
3.5.1.1 Définition du modèle 2-D pour la réconstruction d'image....56
3.5.1.2 Résultats des modèles....57
3.5.1.3 Influence des paramètres du modèle sur la reconstruction d'image....69
3.5.2 Reconstruction d'image 3-D avec des données synthétiques....85
3.5.2.1 Modèle synthétique pour générer des données de résistivité 3-D.85
3.5.2.2 Définition du modèle 3-D pour la reconstruction d'image....85
3.5.2.3a Corps conducteur dans un milieu encaissant résistant et homogène....86
3.5.2.3b Coefficients de sensibilité « atténués »....92
3.5.2.4 Corps résistant dans un milieu encaissant conducteur et homogène. 92
3.5.2.5 Deux corps conducteurs placé dans un milieu résistant....96
3.5.2.6 Tests de profondeur....98
3.5.2.7 Paramètres physiques et géométriques du modèle sur la reconstruc des images....100

3.5.2.8 Modèles simples: couches stratifiées.....116
3.5.3. Reconstruction 3-D avec des données réelles de terrain.....120
3.5.3.1 Site des mesures et contexte géologique et hydrologique.....120
3.5.3.2 Acquisition des données pôle-pôle.....120
3.5.3.3 Rétroprojection et interprétation des résultats.....123

CHAPITRE 4 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....130

RÉFÉRENCES.....135

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Fig. 1.1. Différence de potentiel entre MN pour un quadripôle quelconque.....7

Chapitre 2

Fig. 2.1. Méthode de rétroprojection utilisée pour générer les sections de resistivité.....24

Fig. 2.2. Modèle 2-D utilisé pour calculer les termes de sensibilité G.....25

Fig. 2.3. Variation normalisée du coefficient de sensibilité G dans le cas d'un dipôle-dipôle. On remarque que la distribution spatiale des valeurs maximums de sensibilité sont similaires à la ligne équipotentielle correspondante.....28

Fig. 2.4. Cellule sphérique placée dans le sol, à laquelle s'applique un champ électrique E_0 29

Fig. 2.5. Modèle 2-D utilisé pour calculer l'expression du coefficient de sensibilité.....34

Fig. 2.6. Modèle 3-D utilisé pour le calcul de l'expression des coefficients de sensibilité G.....37

Chapitre 3

Fig. 3.1. Vue en plan de la disposition des électrodes (ronds) et des cellules (carrés) pour calculer les coefficients de sensibilité G.....45

Fig. 3.2. Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x, y pour la section z=1 unité. Les points A, M de la figure 3.1, indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés.....48

Fig. 3.3. Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x, y pour la section z=5

unité. Les points A, M de la figure 3.1, indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés....49

Fig. 3.4. Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x, z pour la section y=1 unité. Les points A, M de la figure 3.1, indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés....50

Fig. 3.5. Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x, z pour la section z=5 unité. Les points A, M de la figure 3.1, indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés....51

Fig. 3.6. Disposition en ligne des électrodes pour le système de mesure en pôle-pôle (cas 2-D)....53

Fig. 3.7. Illustration d'une grille E-SCAN pour effectuer des mesures de résistivité apparente (pôle-pôle)....55

Fig. 3.8. Modèles de structures simples pour les tests de simulation....57

Fig. 3.9a. Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de 2 couches horizontales (option linéaire). La résistivité de la couche supérieure est de 10 ohm.m, celle de la couche inférieure est de 100 ohm.m....59

Fig. 3.9b. Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de 2 couches horizontales (option aire égale). La résistivité de la couche supérieure est de 10 ohm.m, celle de la couche inférieure est de 100 ohm.m....60

Fig. 3.10. Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de deux milieux ayant un contact vertical. La résistivité de chacun des milieux est définie à la figure 3.8b....61

Fig. 3.11. Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué d'un mur vertical ou dyke. La résistivité du dyke et de son milieu environnant sont définies à la figure 3.8c....63

Fig. 3.12. Reconstruction 2-D de la section de résistivité pour un modèle constitué d'un milieu (10 ohm.m) dans lequel se trouve une petite hétérogénéité superficielle de 100 ohm.m (figure 3.8d)....65

Fig. 3.13. Schéma illustratif des paramètres du modèle de simulation avec UBC dans le cas d'un corps se trouvant dans un milieu homogène.....66

Figure 3.14a Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m (option linéaire). La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question.....67

Figure 3.14b Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m (option log-linéaire). La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question.....68

Figure 3.14c Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m (option aire égale). La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question.....69

Fig. 3.15 Image 2-D mettant en évidence l,effet de la discrétisation de la grille pour obtenir les résultats des résistivités apparentes. On remarque une distorsion de l'image due à la couche superficielle.....70

Fig. 3.16 Image 2-D d'un modèle dans lequel le contraste de résistivité est rho1/rho2 =10/100; rho1 étant la résistivité du corps et rho2 celle de son milieu environnant.....72

Fig. 3.17 Image 2-D d'un modèle dans lequel le contraste de résistivité est rho1/rho2 =1000/100; rho1 étant la résistivité du corps et rho2 celle de son milieu environnant.....73

Fig. 3.18. Illustration de l'effet de l'espacement entre les électrodes: image 2-D pour L=1 unité.....75

Fig. 3.19. Illustration de l'effet de l'espacement entre les électrodes: image 2-D pour L=2 unités.....76

Fig. 3.20. Illustration de l'effet de la profondeur du corps par rapport à la séparation d'électrode: image 2-D pour la séparation d'électrode L=1 unité et la profondeur du corps est z=8 unités.....78

Fig. 3.21. Illustration de l'effet de la profondeur du corps par rapport à la séparation d'électrode: image 2-D pour la séparation d'électrode L=4 unité et la profondeur du

corps est z=8 unités.....79

Fig. 3.22. Illustration de l'effet de la longueur du dispositif de mesure: image 2-D pour un dispositif de mesure comprenant 11 électrodes.....81

Fig. 3.23. Illustration de l'effet de la longueur du dispositif de mesure: image 2-D pour un dispositif de mesure comprenant 21 électrodes.....82

Fig. 3.24. Illustration de l'effet de la longueur du dispositif de mesure par rapport à la profondeur du corps pour une configuration de 21 électrodes. Image 2-D pour un corps placé à z= 6 unités.....84

Fig. 3.25. Grille de mesure illustrant la position des électrodes (points noirs) et celle du corps (rectangle centrale). La partie centrale du domaine de la grille est finement discrétisée.....87

Fig. 3.26 Distribution de la résistivité apparente pour une électrode d'injection de courant No. 1 (a) et No. 2 (b).....88

Fig. 3.27. Images 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps conducteur (10 ohm.m) dans un milieu résistant (10 ohm.m) pour différentes tranches de z= 9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités. L'image produite pour la trache z=9 est caractérisée par des artéfacts dus à l'effet de la couche superficielle.....90

Fig. 3.28. Images 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps conducteur (10 ohm.m) dans un milieu résistant (10 ohm.m) pour différentes tranches de z= 9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités. L'image produite pour la trache z=9 est exempte d'artéfacts.....93

Fig. 3.29. Images 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps conducteur (10 ohm.m) dans un milieu résistant (10 ohm.m) pour différentes tranches de z= 9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités.....94

Fig. 3.30. Grille de mesure illustrant la position des électrodes (points noirs) et celle des corps. Les corps de taille 50x50x30 unités sont représentés par les carrés internes et ceux de taille 70x70x30 unités correspondent aux carrés externes.....97

Fig. 3.31. Images 3-D de deux corps conducteurs (10 ohm.m) placés dans un milieu

résistant (100 ohm.m). La taille des corps pour la figure a) est 50x50x30 unités, alorsque celle de la figure b) est fixée à 70x70x70 unités.....98

Fig. 3.32.Résultats des tests de profondeur. Un corps de résistivité (10 ohm.m) est plongé dans un milieu résistant de 100 ohm.m. Ce même corps est placé à des profondeurs différentes de z1=10, z2=20, z3=30 et z4=40 unités. À partir de z=40 unités de profondeur, le corps n'est pas détectable.....99

Fig. 3.33. Images 3-D mettant en évidence l'effet du contraste de résistivité. Le modèle utilisé pour ce test, consiste à un corps (de résistivité variable) placé dans un milieu environnant de 10 ohm.m. Les contrastes suivants ont été envisagés: rho1/rho2=10/100, 10/500, 10/2000 et 10/10000. Rho1 est la résistivité du milieu et rho2 celle du corps..101

Fig. 3.34. Images 3-D illustrant l'effet de la profondeur du corps par rapport à l'écartement des des électrodes. La figure (a) donne l'image pour un corps placé à z=30 unités et la figure (b) pour z=50 unités. L'écartement des électrodes dans les deux cas est de L=40 unités.....103

Fig. 3.35. Images 3-D mettant en évidence l'effet de la taille du corps par rapport à un écartement donné d'électrodes. Le modèle utilisé est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu de 100 ohm.m. La taille du corps est 110x110x30 unités (figure (a)) et 70x70x30 (figure (b)). L'écartement d'électrode dans les deux cas est L=40 unités.....105

Fig. 3.36. Images 3-D mettant en relief l'effet de l'espacement entre électrodes pour une taille donnée du corps. Le modèle envisagé est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu (100 ohm.m). La taille du corps est 70x70x30 unités. L'espacement entre électrodes est fixé respectivement à 40 et 30 unités dans le cas des figures (a) et (b).....107

Fig. 3.37. Images 3-D pour illustrer l'effet de la discrétisation de la grille de mesure pour obtenir les résistivités apparentes. Le modèle utilisé est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu résistant (100 ohm.m). des mailles de largeur 10 unités dans le cas de a) et 15 unités dans le cas de b) en x, y et z ont été utilisées.....109

Fig. 3.38. Images 3-D pour illustrer l'effet du nombre d'électrodes. Le modèle initial est d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu résistant (100 ohm.m). Le nombre d'électrode utilisé s,élève à 25 dans le cas de la figure (a) et à 9 dans le cas de la figure (b).....111

Fig. 3.39. Images 3-D illustrant des tests de bruit et la robustesse de l'algorithme. Le modèle initial est un corps (10 ohm.m) placé dans un milieu résistant (100 ohm.m). La figure (a) est l'image d'une configuration homogène de 25 électrodes, tandis que la figure (b) est celle d'une configuration non homogène constituée de 22 électrodes plantées à la surface. Les figures (c) et (d) montrent respectivement les images sans et avec bruit....113

Fig. 3.40. Images 3-D illustrant des tests de profondeur en utilisant des coefficients de sensibilité pondérés. Les images (a), (c), et (e) correspondent à des tests avec des coefficients de sensibilité non pondérés, tandis que les images (b), (d) et (f) sont celles obtenues avec des coefficients pondérés.....115

Figure 3.41 a) image d'un modèle à 2 couches de résistivité respective 10 et 100 ohm.m. b) image d'un modèle à 2 couches de résistivité respective 100 et 10 ohm.m. c) image d'un modèle à 3 couches de résistivité respective 1000, 100, et 10 ohm.m. d) image d'un modèle à 3 couches de résistivité respective 5000, 100 et 10 ohm.m.....117

Fig. 3.42. Localisation du site des mesures électriques pôle-pôle.....121

Fig. 3.43. Distribution des résistivités apparentes pour l'état normal (a, b) et perturbé (c, d), pour les électrodes de courant # 1 et # 13.....124

Fig. 3.44. Section verticale de la structure du sous-sol obtenue par retroprojection des données acquises sur le site de Lachenaie (état normal)pour y=8.5.....125

Fig. 3.45. Section verticale de la structure du sous-sol obtenue par retroprojection des données acquises sur le site de Lachenaie (état perturbé) pour y=8.5 m.....127

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La méthode de résistivité électrique a été utilisée depuis plusieurs décennies dans divers types de recherches géophysiques et géologiques. D'abord développées par les frères Schlumberger (1912-1913), ces méthodes ont été appliquées avec succès dans la résolution de multiples problèmes de génie (Maillet et Charrin, 1933), de morphologie (Lugeon et Oulianoff, 1939; E. Rothé et J.P. Rothé, 1952), d'environnement (Barker, 1990; Ross, Mackelprang et Wright, 1990), et de prospection d'eau (Lohnberg et Stern, 1932; Van Dam et Meulenkamp, 1967; Zhody, 1969; Gorhan, 1976; Hagmeyer et Stewart, 1990).

Pendant des années l'inversion des données de résistivité était limitée aux modèles 1-D, alors que dans beaucoup d'applications, comme en exploration minière et pour des études environnementales, des modèles 2-D ou 3-D seraient préférables. Puisque l'interprétation manuelle 1-D par comparaison avec les courbes théoriques prend beaucoup de temps, ainsi, les procédures interactives sur ordinateur sont plus fréquemment utilisées (Bouchard, Brodeur et Chouteau, 1992). Avec le développement des méthodes numériques et des ordinateurs à grande capacité, la modélisation par approximations successives a été largement utilisée pour interpréter des données de résistivité en terme de modèles 2-D. Les procédures automatisées basées sur la méthode des moindres-carrés pour l'interprétation 2-D ont été développées (Zhody, 1989; Tripp, Hohmann et Swift, 1984). Ces techniques demandent souvent un temps d'ordinateur considérable. Comme alternative, des techniques d'imagerie par une inversion approximative (Barker, 1992; Li et Oldenburg 1992; Shima et Hiromasa, 1993; Ellis et Oldenburg, 1994; Li et Oldenburg, 1994) pour l'interprétation des données de résistivité doivent être considérées compte tenu de leur rapidité et de la qualité des informations qui en découlent, qualité suffisante de la reconstruction. En effet depuis quelques années déjà, il y a un intérêt grandissant pour les techniques d'imagerie électriques du sous-sol. Cela est dû à la nécessité de fournir rapidement aux clients concernés des résultats utilisables immédiatement (cible de forage). De plus, l'avènement des instruments modernes de mesures à électrodes multiples, « intelligentes », a conduit au

développement des systèmes d'imagerie électriques qui produisent des sections électriques du sous-sol avec une plus grande exactitude qu'il ne soit possible avec les levés conventionnels de resistivité. Par ailleurs, les développements récents de systèmes pratiques de tomographie électrique pour le terrain (Griffiths et Turnbull, 1985; Dahlin, 1993) ainsi que des logiciels de traitement et d'inversion (Loke et Barker, 1994) placent cette technique géophysique dans une ère nouvelle. La technique d'imagerie électrique est d'autant plus attrayante et prometteuse qu'elle est applicable à de nombreux champs d'application tels que l'étude de zones à géologie complexe (Griffiths et Barker, 1993), en archéologie (Griffiths et Barker, 1994; Noël et Walker, 1990) dans l'investigation des zones peu profondes, etc.

Ce rapport concerne la reconstruction d'images du sous-sol pour un environnement 2D et 3-D à partir des mesures de résistivité électriques en surface. La méthode de reconstruction utilisée dans ce projet repose sur la rétroprojection des mesures de résistivité électrique proposé par Noël et Xu (1991) pour une configuration dipôle-dipôle. Dans notre étude, elle est développée pour des mesures pôle-pôle dans un environnement 2-D et 3-D. Les principales étapes du développement d'un programme basé sur la technique sont présentées. Une analyse des problèmes de résolution est faite en fonction de la longueur du dispositif utilisé, de l'écartement des électrodes, de la profondeur du corps, et du contraste de résistivité entre le corps et le milieu encaissant. Enfin, la technique est appliquée sur des données synthétiques puis réelles et les résultats obtenus sont exposés. Les diverses étapes de cette étude sont traitées à travers les chapitres qui suivent:

- **Le chapitre 1** concerne les relations fondamentales de la méthode de résistivité électrique et fait ressortir les avantages et les inconvénients de certaines configurations.
- **Le chapitre 2** donne un aperçu sur les problèmes de modélisation et d'inversion et présente les bases théoriques de la technique de reconstruction à l'aide du principe de rétroprojection en dégageant les problèmes qui y sont liés.
- **Le chapitre 3** expose les différentes étapes de l'élaboration d'un programme de rétroprojection pour l'inversion approximative en 2-D et 3-D. Des tests sur les effets

des divers paramètres du modèle de simulation ont été réalisés en vue d'analyser de façon qualitative leur influence sur la restitution des images reconstruites. Des données synthétiques et réelles sont par la suite traitées par le programme en question. Les résultats obtenus sont ensuite analysés.

- **Le chapitre 4** renferme les conclusions et les recommandations qui se dégagent de cette étude.

CHAPITRE 1
MÉTHODE DES RÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES

1.1. Introduction

Les méthodes électriques, fondées sur l'étude de la circulation du courant dans le sous-sol, comprennent de très nombreuses variantes. Dans ce chapitre, on se limitera de présenter la base théorique de celles qui font usage d'une source artificielle de courant (courant continu ou à très basse fréquence) injecté dans le sol pour développer une différence de potentiel reliée à à la résistivité du sol. Ces méthodes permettent de comprendre la structure du sous-sol grâce à l'étude des résistivités électriques des formations qui le composent et il est possible d'en tirer des informations qualitatives et quantitatives.

1.2. Théorie des mesures de résistivité

Les différents modes de mesure de la résistivité reposent sur l'injection dans le sous-sol d'un courant continu ou alternatif (basse fréquence) qui produit un champ électrique que l'on mesure en un ou plusieurs points.
L'application de la loi d'Ohm pour la propagation du courant continu dans un sol homogène et isotrope conduit aux équations suivantes:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{1.1}$$

où $\vec{J}$ est la densité de courant (A/m^2), $\vec{E}$ le champ électrique (V/m) et σ la conductivité du sol (S/m). Un champ électrique $\vec{E}$ dérive d'un potentiel scalaire V par la relation

$$\vec{E} = -\,\mathrm{grad}V \tag{1.2}$$

Selon la loi de la conservation de charge:

$$\mathrm{div}\vec{J} = 0 \tag{1.3}$$

En substituant les équations (1.1) et (1.2) dans (1.3) on obtient:

$$\mathrm{div}[\sigma(\mathrm{grad}V)] = 0 \tag{1.4}$$

L'équation (1.4) dérive en fait de l'équation de Poisson définie comme suit:

$$div\left[\sigma(x,y,z)gradV(x,y,z)\right] = \frac{\partial q}{\partial t}\delta(x_s)\delta(y_s)\delta(z_s) \tag{1.5}$$

où $\partial q/\partial t$ est la dérivé par rapport au temps de la densité de charges électriques, δ est la fonction delta de Dirac et (x_s , y_s , z_s) indiquent la position de la source. Le second membre de cette équation est la fonction source qui est exprimée par la fonction delta de Dirac qui indique le caractère ponctuel de la source de courant. La distribution des potentiels dans un demi-espace excité par un courant continu suit donc l'équation de Poisson.

Pour σ constant donné, on peut déduire de (1.4) l'équation de Laplace suivante:

$$\mathrm{div\ grad}V = \nabla^2 V = 0 \tag{1.6}$$

Deux conditions aux limites doivent être appliquées à n'importe quel interface entre deux milieux de conductivité différente; à savoir, le potentiel et la densité de courant normal sont continus.

Dans le contexte géoélectrique, on est ramené en général à resoudre l'équation (1.5) de Poisson. Soit une source ponctuelle émettant un courant I au sein d'un espace infini homogène et isotrope. En résolvant l'équation (1.6) de Laplace dans le cas d'un système de coordonnées sphériques on obtient:

$$\frac{d}{dr}(r^2\frac{dV}{dr}) = 0 \tag{1.7}$$

où r est la distance entre la source de courant et le point de mesure du potentiel.
La résolution de l'équation (1.7) nous conduit à l'expression du potentiel provoqué par une source ponctuelle de courant:

$$\mathrm{V} = (\frac{I\rho}{4\pi})\frac{1}{r} \tag{1.8}$$

Le facteur ρ est défini comme la *résistivité* du matériau dans lequel sont situés la source et le récepteur. À l'inverse de la conductivité, **la résistivité** ($\Omega.m$) d'un corps est la résistance offerte au passage du courant par un cylindre de ce corps perpendiculairement à sa section, la longueur et la section étant égales à l'unité (Nely, 1989).
Lorsqu'on effectue les mesures sur le terrain, le courant se propage dans un espace semi-infini, le facteur 4π devient alors 2π (Meyer De Stadelhofen, 1991). L'équation (1.8) peut se récrire alors:

$$\mathrm{V} = (\frac{I\rho}{2\pi})\frac{1}{r} \tag{1.9}$$

Donc, à partir de I connu et V observé, on peut déduire la résistivité vraie du milieu homogène. Lorsque le terrain n'est pas électriquement homogène, les équipotentiels et les lignes de courant sont déformées, leur répartition «normale» est altérée. V et I sont toujours

mesurables. Le facteur obtenu n'est plus la résistivité vraie (ρ) caractéristique des formations traversées par le courant, mais une *résistivité apparente* ρ que l'on définit par:

$$\rho_a = 2\pi r(\frac{V}{I}) \tag{1.10}$$

La **résistivité apparente** (Ωm) est la valeur de la résistivité que devrait avoir un terrain homogène pour donner les mêmes mesures avec différents dispositifs. Cette valeur n'a pas de sens physique propre, puisqu'elle dépend de la géométrie du dispositif de mesure utilisé, combinée à la répartition des résistivités au sein du sous-sol hétérogène(Nely, 1989).
Pratiquement, sur le terrain on utilise deux électrodes d'émission du courant, A et B, ainsi que deux électrodes de mesure du potentiel, M et N, si bien qu'entre ces dernières on mesure la différence de potentiel V due à l'action conjuguée de A et de B (**fig.1.1**).

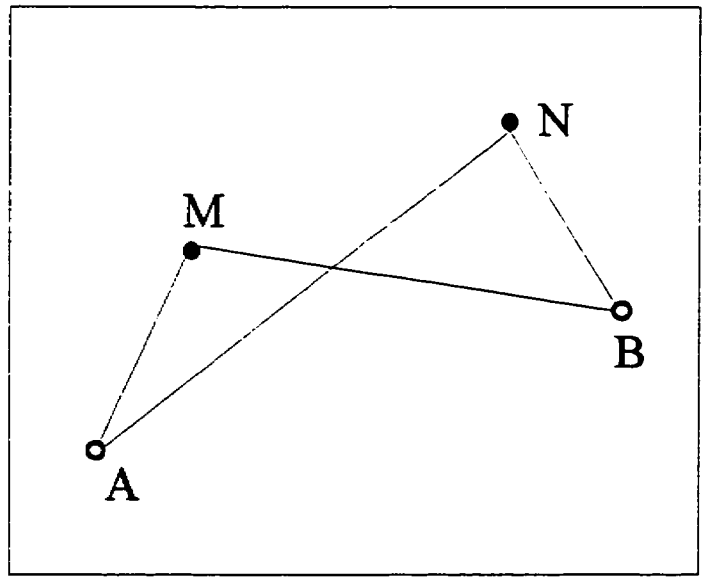


Figure 1.1. Différence de potentiel entre MN pour un quadripole quelconque

Dans le cas de la figure 1.1 l'expression du potentiel est donnée par:

$$\Delta V_{MN} = \rho_a \frac{I_{AB}}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \tag{1.11}$$

de l'équation (1.11) on obtient:

$$\rho_a = K\frac{\Delta V}{I} = \Delta V_{MN} \frac{1}{\frac{I_{AB}}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \tag{1.12}$$

K est le facteur géométrique de la configuration utilisée et est égal à:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)}$$

1.3. Divers dispositifs de mesures

Le dispositif quadripôle fondamental de la figure (1.1) peut donner naissance à quantité de variantes qu'on peut subdiviser en deux grandes catégories: les profilages et les sondages électriques.

1.3.1. Le profilage électrique

Il est conçu de façon à faire porter l'investigation sur une tranche du sous-sol d'épaisseur plus ou moins constante. En déplaçant sur le terrain un dispositif de profilage en ligne AMNB de dimensions fixes, on obtient facilement un profil des résistivités

apparentes et à l'aide de plusieurs profils, une carte des résistivités apparentes. Dans ce type de disposition les profils de résistivités apparentes changent avec la distance entre A et B. Il est donc extrêmement important de bien choisir la longueur du dispositif. En outre pour comprendre les résultats d'un profilage, il est indispensable de disposer d'un ensemble de mesures et d'une bonne connaissance du contexte géologique. Le profilage, sensible surtout aux variations latérales du sous-sol, fournit, pour de grandes étendues de terrain, des informations qualitatives.

1.3.2 Le sondage électrique

Un sondage électrique constitue une investigation en profondeur à la verticale d'un point donné. L'interprétation des sondages électriques permet d'obtenir l'épaisseur et la résistivité spécifique de chacune des couches à l'aplomb du centre de sondage pour la profondeur maximale atteinte par la configuration utilisée.

1.3.3. Mise en oeuvre de quelques profilages

Le dispositif de Schlumberger est composé d'un quadripôle AMNB aligné, avec MN égal ou inférieur au 1/5 de AB. Ce dispositif donne une efficacité maximum dans les conditions suivantes:

- disposer d'un résistivimètre léger à mesure rapide ayant diverses sensibilités pour la mesure de V et I.
- l'appareil doit être muni de correcteur manuel ou automatique pour annuler le potentiel dû à la polarisation des électrodes M et N.
- la source de courant doit être légère et permettre la sélection de tension variées entre 10 et 200 volts environ.

Le dispositif de Wenner (disposition en ligne avec AM=MN=NB) pose le même problème et apporte à peu de chose près les mêmes résultats que celui de Schlumberger.

Le dispositif dipôle-dipôle, lui aussi en ligne, où les deux parties (AB et MN) du dispositif se déplacent simultanément. Cet arrangement est particulièrement efficace pour la mise en évidence des filons et des fractures subverticales. Mais malheureusement il n'est pas très facile de l'utiliser en terrain accidenté ou lorsque la végétation est abondante.

Les dispositifs quadripôles asymétriques sont utilisés pour mettre en évidence des structures subverticales auxquelles ils sont plus sensibles que le quadripôle Schlumberger. La disposition en ligne de ceux-ci est telle que AM=5MN, MN=NB.

Les tripôles ou pôle-dipôles, parmi lesquels le plus fréquemment utilisé est constitué par le groupement AMN mobile, l'électrode B reste fixe «à l'infini» c'est à dire dans une position telle que sa contribution à ΔV est négligeable. Il est efficace pour localiser les structures subverticales.

Les dispositifs focalisés du type A^+ MN A^+ avec B^- à l'infini permettent de localiser les hétérogénéités de faibles dimensions proches de la surface. Le courant émis par les électrodes A se défocalise malheureusement très rapidement avec la profondeur.

Les dispositifs pôle-pôle.

Une attention particulière est accordée au dispositif pôle-pôle, car la technique de reconstruction par rétroprojection développée dans ce projet en fait usage.

Le système d'électrode pôle-pôle non focalisé a été largement utilisé en diagraphie de forage, où il est connu sous l'appelation de sonde « normal » ou « potentiel ». Les avantages de son application dans le profilage de résistivité pour l'exploration minière ont été décrits par Apparao et Roy (1971, 1973) et Jain, Kumar et Roy (1973). Ce système a été également utilisé pour des études de la profondeur d'investigation (Kumar 1977, Jain et Roddy 1977).

La configuration d'un système d'électrode pôle-pôle est telle que seulement deux électrodes, l'électrode de courant (A) et celle du potentiel (M), sont utilisées activement. L'électrode d'émission de courant (B) et celle de la mesure du potentiel (N) sont placés théoriquement à l'infini de manière que leur effet est négligeable dans les mesures. Généralement, l'erreur relative dans les mesures du potentiel ne dépasse pas 5 % si la distance entre les deux électrodes extrêmes (électrodes non actives B et N) est plus grande que dix fois la séparation de la souce et de l'électrode de potential active (Kumar 1974).
Le système pôle-pôle se distingue des configurations Wenner, Schlumberger et dipôle-dipôle par les deux avantages suivants:
- il permet d'atteindre une plus grande profondeur d'investigation (Roy et Apparao, 1971),
- le système produit une anomalie relativement plus grande pour des petits écartements d'électrode.
Des expériences de terrain avec le système pôle-pôle (Kumar 1977, Jain et Reddy, 1977) ont montré cependant, que les difficultés pratiques quant à la mise à l'infini d'une électrode de courant et de potentiel restreint les avantages ci-dessus pour des investigations peu profondes.
Compte tenu de la limitation ci-dessus et le manque de techniques d'interprétation appropriées, l'application du système de mesures pôle-pôle dans le sondage de profondeur a été retardée. Néanmoins, il demeure un outil efficace pour des investigations peu profondes.

1.3.4. Mise en oeuvre de quelques sondages électriques

Le sondage Schlumberger est composé d'un quadripôle AMNB, A et B s'écartent symétriquement de part et d'autre du centre O, MN reste autant que possible fixe. Des conditions similaires aux dispositifs de profilage Schlumberger s'appliquent également ici pour obtenir une efficacité maximum. Le principal problème avec un tel dispositif consiste

à conserver un ΔV suffisamment grand pour être mesuré. En effet au fur et à mesure que A et B s'éloignent ΔV diminue. Ce problème peut-être résolu de diverses façons:

- en augmentent la tension à la source de manière à augmenter I et ΔV,
- en arrosant les électrodes A et B, si nécessaire avec l'eau salée, de façon à accroître le courant I et la différence de potentiel ΔV,
- en agrandissant MN afin d'augmenter le ΔV mesuré.

Le sondage électrique inverse Schlumberger est conçu de façon à remplacer M et N par deux électrodes d'émission A et B qui resteront fixes. Ce dispositif s'avère très efficace dans les régions très sèches, mais ne peut pas être utilisé dans les régions hautement industrialisées car dans ces régions les électrodes M et N très fortement écartées seront trop influencées par les courants vagabonds qui parcourent le sol.

Le sondage en T (les doubles demi-Schlumberger) est est facile à exécuter, il suffit pour cela de disposer une électrode d'émission C fixe, sur la perpendiculaire au centre O de MN d'une configuration Schlumberger; OC doit être grand par rapport à OA et OB. Avec ce dispositif on mesure ΔV et I lorsque C et A sont connectés (B déconnecté) puis lorsque C et B sont connectés (A déconnecté). Par ailleurs le sondage progresse comme d'ordinaire. Ce dispositif permet d'obtenir deux sondages. Ceux-ci sont identiques si les terrains sont horizontalement homogènes. Des sondages CA et CB sensiblement différents signalent la présence d'hétérogénéités latérales importantes. Puisque M et N sont placés sur l'une des équipotentielles issues de C, cette électrode ne contribue en rien à ΔV mesuré, il faut donc doubler ΔV pour obtenir les résistivités apparentes qui en découlent. L'usage de ce dispositif se fait en général lorsqu'on soupçonne de fortes variations latérales.

1.3.5. Électrodes à l'infini

Une électrode est à l'infini si elle est placée suffisamment loin par rapport aux électrodes mobiles (la configuration active) pour que son effet soit négligeable dans la mesure.

Nous avons pu constater dans les paragraphes 1.3.3. et 1.3.4. que la mise en oeuvre de certains dispositifs de profilage et de sondage présente parfois des difficultés majeures ou que leur utilisation est limitée. De plus certaines de ces configurations demandent une mise en oeuvre très exigeante et l'interprétation des résultats qui en découlent est compliquée.

En pôle-dipôle par exemple, l'électrode à l'infini est placée à une distance d'au moins 10 fois la séparation entre le pôle et le dipôle. Par exemple si "a" est la séparation entre le dipôle et d=n*a est celle entre le pôle et le dipôle, alors pour n=4 et a=50 m l'électrode à l'infini sera placée à L = 10*4*50 = 2000 m.

L'installation de telles lignes de fil est parfois une tâche ardue qui n'est pas facile à accomplir. Les avantages des électrodes à l'infini sont néanmoins considérables. En voici ci-dessous quelques uns (SAGAX Géophysique, Mars 1992, recueil technique):

- plus le nombre d'électrodes actives est faible, plus le voltage mesuré est fort, d'où une meilleure précision des lectures enregistrées. Ainsi le signal pôle-pôle est supérieur au signal pôle-dipôle, ce dernier étant lui aussi supérieur au signal dipôle-dipôle.
- les électrodes à l'infini étant fixes pour une grande superficie d'investigation, le temps investi pour la préparation d'un excellent contact est rapidement récupéré.
- la résistance de contact des électrodes mobiles sera beaucoup moins critique avec le pôle-pôle qu'avec le dipôle-dipôle puisque la résistance de contact des électrodes à l'infini sera normalement négligeable.
- une meilleure profondeur d'investigation pour une même longueur de dispositif actif
- un nombre réduit d'hommes pour déplacer les électrodes.

- l'implantation d'une électrode de courant à l'infini assure l'injection d'un meilleur courant, d'un rapport signal/bruit supérieur et d'une meilleure profondeur d'investigation, le tout à un coût moindre.

Les premières applications des méthodes de résistivité électrique étaient essentiellement limitées aux sondages et aux profilages qui étaient restreintes de façon intrinsèque aux environnements 1-D et 2-D. Par exemple les configurations familières Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, etc., possèdent généralement des électrodes colinéaires et ne donnent pas suffisamment d'information pour une interprétation complète 3-D de la région investiguée. Des géométries d'électrode plus satisfaisantes pour des environnements 2-D en général et 3-D en particulier peuvent être élaborées en faisant mouvoir les électrodes de potentiel de façon différée par rapport aux électrodes de courant. En d'autres termes il s'agit des configurations multi-électrodes pôle-pôle (linéaire pour le cas de 2-D et une grille 2-D d'électrodes pour le cas de 3-D) dans lesquelles chaque électrode devient tour à tour électrode de courant et le potentiel est mesuré aux électrodes restantes. Cette technique se solde par la rapidité des mesures par rapport au dipôle-dipôle; en outre, elle permet de faire du profilage et du sondage en même temps. Les avantages énumérés ci-dessus justifient certainement l'adoption par de nombreux chercheurs (Das et Verma 1980, Stefanescu et Stefanescu 1986, Sakayama et Shima 1986, Li et Oldenburg 1992, Li et Oldenburg 1994) de la configuration pôle-pôle pour les mesures de résistivité en surface. Les programmes de reconstruction par rétroprojection dont il sera question dans les chapitres suivants, utilisent également la configuration multi-électrodes pôle-pôle pour les mesures de potentiel en raison des avantages cités plus haut.

CHAPITRE 2
BASES THÉORIQUES DE L'IMAGERIE ÉLECTRIQUE

2.1. Revue de la documentation

L'inversion géophysique peut être considérée comme une tentative d'ajuster la réponse d'un modèle du sous-sol à un ensemble fini d'observations réelles. Par souci de clarté, précisons tout d'abord ce qu'on entend par modèle, paramètres du modèle et la réponse du modèle. Le *modèle* consiste à un ensemble de relations qui représentent un concept mathématique particulier d'un processus observé. Ces équations dépendent à leur tour d'un certain nombre de *paramètres du modèle* que l'on désire estimer à partir des données réelles. *La réponse du modèle* consiste en des données obtenues pour une réalisation particulière du modèle. Le but de l'inversion est d'extraire les paramètres estimés du modèle advenant un ajustement de la réponse du modèle aux données observées.

L'interprétation des données de résistivité électrique était longtemps limitée à des modèles uni-dimensionnelles (1-D) en supposant des couches à stratification horizontale. Or, si le contexte géologique ne se prête pas à un modèle 1-D, cette méthode n'est pas appropriée. Avec le développement des méthodes numériques et des ordinateurs de grande capacité, les méthodes de modélisation par approximations successives ont été largement utilisées pour interpréter les données en termes de modèles de sol bi-dimensionnels (2-D). Mais ces méthodes demandent beaucoup de temps d'exécution et donnent peu d'information sur la résolution du modèle. Ils existent cependant des techniques pratiques de modélisation et d'inversion 2-D et 3-D qui permettent l'interprétation de structures plus réalistes, mais là aussi elles requièrent beaucoup de temps d'exécution et d'espace-mémoire nécessaires aux calculs numériques.

Les algorithmes de modélisation de la résistivité sont basés soit sur la méthode par équation intégrale (Dieter et al., 1969; Okabe, 1981; Das et Parasnis, 1987), soit sur la méthode par différences finies (Mufti, 1976; Dey et Morrison, 1979a et 1979b; Mundry, 1984; Lowry et al., 1989) et ou par éléments finis (Coggon, 1971; Pridmore et al., 1981). Chacune de ces méthodes possède des avantages et des inconvénients l'une par rapport à l'autre, mais sont caractérisées par un point commun: elles requièrent de longues étapes de calcul.

Dey et Morrison (1979) ont utilisé la méthode par différences finies pour analyser la distribution du potentiel due à une source ponctuelle de courant placée dans ou à la surface d'un demi-espace ayant une distribution arbitraire 2-D de la conductivité. Ils ont utilisé la même technique pour résoudre le problème en 3-D. L'adoption de la méthode par différences finies a été retenue à cause de la simplicité des formes d'approximation qui sont faciles à assujettir aux conditions aux frontières de Dirichlet, de Neumann ou mixtes. Dans le cas 3-D, l'équation de Poisson est discrétisée en volumes élémentaires sur une grille prismatique 3-D irrégulièrement espacée. Le potentiel à chacun des noeuds de la grille est évalué en utilisant une sur-relaxation successive, incomplète du gradient conjugué de Cholesky et les techniques de décomposition directe de matrice pour obtenir des solutions stables et fiables. La technique est estimée être beaucoup plus rapide, plus économique en terme de prix et occupe moins d'espace-mémoire que l'algorithme par éléments finis (Coggon, 1971).

Les recherches de *Zhang, Mackie and Madden (1996)* ont conduit au développement d'algorithmes de modélisation et d'inversion 3-D de la résistivité en se servant des techniques de relaxation du gradient conjugué. Une analogie de réseau-transmission (Madden et Swift, 1969; Swift, 1971) a été utilisée pour la modélisation du problème 3-D. La relaxation du gradient conjugué a été appliquée pour résoudre les deux problèmes: direct et inverse. Le but fondamental de leur recherche était de fournir un

programme compact 3-D fonctionnant rapidement et efficacement sur les ordinateurs modernes. Les essais du programme avec des données synthétiques ont montré que les structures pointues (comme les coins) d'un corps conducteur dans un milieu hôte résistant ne peuvent pas être résolues. Par contre, la localisation et la taille moyenne du corps conducteur peuvent être déterminées par l'inversion. Les tests avec des données réelles recueillies à Majove Generating Station à Laughlin (Neveda) ont donné des résultats comparables à ceux obtenus par Park et Van (1991), mais les résultats de Zhang et al. font cependant mieux ressortir les variations verticales et latérales de la partie investiguée du sous-sol.

De nombreux auteurs, Barker et Brown (1984), Barker et Seagar (1987), Santosa et Vogelius (1990), Noël et Xu (1991), Barker (1992), Griffiths et Barker (1993), Li et Oldenburg (1992 et 1994), Ellis et Oldenburg (1994) ont contribué à établir les bases fondamentales des techniques d'imagerie électrique en proposant des approches différentes. La quantité de méthodes utilisées et la diversité des fins poursuivies, rendent difficiles de faire une comparaison systématique des techniques des différents auteurs.

Barber et Brown (1984) ont examiné l'usage en médécine de configuration d'électrodes autour du corps et par la technique de rétroprojection ont réussi à produire des images approximatives de la section du corps. *Barber et Seagar* (1987) sont arrivés à connaître la structure interne d'un corps par l'utilisation d'électrodes entourant totalement ou partiellement ce corps.

Les travaux de *Santosa et Vogelius (1990)* sont axés sur la mise au point d'un algorithme concernant la tomographie d'impédance électrique qui est une technique d'imagerie permettant d'estimer la répartition des conductivités à l'intérieur d'un objet à partir des potentiels mesurés en surface, pour différentes géométries d'injection de courant. Les auteurs ont élaboré un algorithme de reconstruction 2-D (qui s'inspire de celui de D.C. Barber et B.H. Brown) appliqué à un problème inverse électrostatique linéarisé. Leur but

était en premier lieu de démontrer comment cet algorithme entre dans le cadre des transformations inverses généralisées de Radon; et en second lieu d'apporter une amélioration itérative à l'algorithme de Barber et Brown à partir de la méthode de conjugué résiduel. Il en ressort de leur étude que l'algorithme de la méthode du conjugué résiduel (CR) permet d'améliorer de manière significative la rétroprojection filtrée de Barber-Brown et que la performance du CR est meilleure que celle du gradient conjugué.

Les études de *Noël et Xu (1991)* décrivent une méthode dans laquelle des sections verticales de résistivité sont générées tomographiquement à partir des mesures sur une configuration linéaire d'électrodes équidistantes plantées à la surface du sous-sol. La section géophysique est ensuite construite par la technique de rétroprojection en utilisant les données de résistivité mesurées. Les inversions tomographiques obtenues avec la technique de Noël et Xu ont démontré que les mesures à l'aide d'électrodes fixes peuvent donner une approximation raisonnable de la section de résistivité particulièrement pour des structures qui sont moins profondes que la longueur du dispositif utilisé. La géométrie est bien restituée mais les résistivités obtenues sont moins contrastées que celles des modèles originaux. Mais avant d'utiliser cette technique de façon routinière, les auteurs recommandent de la tester suffisamment afin d'y apporter des améliorations. On pourrait par exemple analyser la relation qui existe entre la qualité d'image par rapport au nombre d'électrodes et l'espacement entre les électrodes, l'influence de la topographie de surface et le bruit des mesures. Un des désavantages de l'approche de Noël et Xu est l'utilisation de la configuration dipôle-dipôle qui donnerait de petites différences de potentiel pour de larges distances entre les deux dipôles. Cette méthode demeure néanmoins attractive et par conséquent il semble logique d'explorer ses avantages et limites pour le cas 2-D et d'étendre sa base au cas 3-D.

La recherche de *Barker (1992)* concerne le développement d'un algorithme pour l'inversion des données tomographiques électriques sous forme de pseudo-sections. Les

données de résistivités apparentes mesurées sont utilisées pour générer un modèle de départ pour un système itératif d'imagerie 2-D par différence finies. La technique produit des images électriques géologiquement interprétables surtout quand des données de qualité sont enregistrées. Il a été remarqué que l'application de la technique n'est pas appropriée pour les configurations pôle-dipôle qui produisent des pseudo-sections relativement complexes au-dessus des structures simples. Mais par ailleurs, de bons résultats ont été obtenus avec la configuration de Wenner. Les auteurs préconisent cependant que l'utilisation de la configuration pôle-pôle donnerait de meilleurs résultats.

Les travaux de *Dahlin, Johanson et Landin (1994)* reposent sur l'automatisation de l'acquisition, du traitement, de l'interprétation et de la présentation des données de résistivité électrique 2-D. À travers une méthode appelée « Continuous, Vertical, Electrical Sounding » (CVES), les auteurs exposent le fonctionnement de leur technique. Le système est composé d'une unité commutatrice à gaine de relais contrôlée par un ordinateur central, de câbles multi-mèches avec des sorties aux points d'électrode, d'un instrument de résistivité standard et d'un ordinateur portatif. Dans le cadre d'études géotechniques pour la planification d'infrastructure, des mesures de résistivité ont été faites à Gladokvarn et Otra Odarslov en Suède en utilisant la technique du CVES. Les résultats obtenus ont confirmé que le CVES est une technique capable de produire des résultats pour des fins utiles avec une haute productivité. Par ailleurs cette technique pourrait être appliquée dans la cartographie hydrogéologique et dans l'évaluation environnementale.

L'étude de *Griffiths et Barker (1993)* porte sur le développement d'une technique d'acquisition et d'inversion des données, contrôlée par ordinateur. Plusieurs types de configurations (telles que Wenner, dipôle-dipôle) ont été utilisées pour la collection des données. En ce qui concerne la résolution d'image, les auteurs ont trouvé que la configuration de Wenner donne plus de satisfaction. Cependant un certains nombre de considérations doit être pris sur le terrain afin d'enregistrer des données de qualité. Une de

ces considérations est la profondeur d'investigation qui est étroitement liée avec la séparation maximum des électrodes. Le système a été testé sur des modèles à des conditions variables pour déterminer sa capacité de détection et de résolution. Il en ressort que même si le contraste est considérable, la dimension de la structure doit être comparable avec sa profondeur pour qu'il produise un effet significatif sur les mesures de résistivité. Il a été suggéré que l'utilisation éventuelle des configurations focalisées pourrait améliorer la qualité de la résolution, et que la technique pourrait être étendue pour le cas 3-D.

Li et Oldenburg (1992) ont utilisé la technique du *E-SCAN* pour développer des algorithmes d'inversion. Cette technique consiste à planter des électrodes sur une grille prédéterminée dans une région donnée. Chaque électrode sert d'électrode de courant et les potentiels sont mesurés sur les électrodes restantes. Le grand nombre de potentiels mesurés et l'arrangement de la grille sur laquelle les données ont été prises, constituent la base de la mise au point d'algorithmes d'inversion. Deux algorithmes d'imagerie et d'inversion pour des modèles de conductivité 2-D ont été présentés. Dans le cas du problème 3-D, un algorithme qui décompose le problème inverse 3-D en une succession d'inversions 1-D dans le domaine du nombre d'onde a été développé. Ces différents algorithmes sont basés sur les approximations de Born pour les réponses du potentiel en mode DC et l'utilisation explicite des données acquises avec l'usage de la technique E-SCAN.

- Dans le cas des modèles 2-D, la première approche était de reproduire une image des bords des structures du sous-sol en utilisant les densités de charges accumulée. L'algorithme fonctionne avec satisfaction pour des modèles simples. Cependant, la combinaison du résultat final de plusieurs inversions indépendantes pose des difficultés.
- Dans le cas des modèles 3-D les essais avec des données synthétiques montrent que l'algorithme donne une inversion approximative pour des structures à grands contrastes de conductivité.

L'étude menée par *Li et Oldenburg (1994)* avait pour but de développer une méthode efficace pour l'inversion des données de potentiel acquises à la surface du sol. La réalisation d'un tel levé pourrait se faire par l'utilisation de la technique du E-SCAN dont le principe a été défini précédemment. Comme aboutissement à l'objectif visé, les auteurs ont présenté un algorithme itératif pour l'inversion 3-D (pôle-pôle) des données de résistivité électrique. Deux algorithmes, une pour la modélisation et l'autre pour l'inversion ont été développés pour atteindre le but visé:

- l'algorithme pour la modélisation utilisant la méthode des différences finies de Dey et Morrison (1979) a été élaboré pour créer un modèle initial. La géométrie de ce modèle primaire était définie selon le principe du levé des données E-SCAN.
- l'algorithme pour l'inversion est celui de l'inversion approximative 3-D développé par Li et Oldenburg (1992).

Des essais sur des données synthétiques et réelles ont révélé que l'algorithme développé donne une performance satisfaisante. L'inversion débute par un bon ajustement au modèle avec seulement 36 % de sur-ajustement, et une succession de modèles à normes minimums réduit progressivement le sur-ajustement à 12 %. Un tel ajustement n'est pas trop négligeable pour des données de terrain. Cependant la méthode est mieux adaptée pour générer un modèle de conductivité réduisant le sur-ajustement à un bas niveau. Le modèle résultant peut être utilisé ensuite comme modèle initial pour une inversion plus rigoureuse.

Les travaux d'*Ellis et Oldenburg (1994)* avaient pour objectif de résoudre un problème inverse de la résistivité électrique 3-D (pôle-pôle) en le ramenant à un problème d'optimisation de fonction-objective. Pour calculer le gradient de la fonction objective, la minimisation du gradient conjugué et l'équation adjointe furent utilisées. Deux hypothèses ont été posées:

- la modélisation de la résistivité électrique pourrait être considérée comme une projection d'un espace de modèles de conductivité sur un espace de données de potentiel;

- quant à l'inversion, elle constituerait un phénomène inverse de celui de la modélisation c'est à dire une projection d'un espace de données de potentiel sur un espace de modèles.

Les essais effectués à l'aide des données synthétiques et réelles ont prouvé que l'inversion par la méthode du gradient conjugué s'avère efficace. Ils ont également révélé qu'en plus de s'ajuster aux données, les modèles générés possèdent aussi une structure minimum.

On remarque à travers la revue de la documentation que peu de chercheurs ont tenté de faire ressortir le ou les liens existant entre la qualité des images (ou de l'inversion) et les différents paramètres tels que le nombre d'électrodes, l'espacement entre les électrodes, profondeur du corps, la complexité de la section de résistivité, etc. Or ces paramètres pourraient bien influencer la qualité des images et des inversions obtenues. Dans le paragraphe qui suit, les formulations de la technique proposée par Noël et Xu (1991) sera exposé plus en détail. Nous formulerons ensuite les bases théoriques de l'imagérie 2-D et 3-D appliquable à des mesures pôle-pôle. Puis nous essayerons d'établir le ou les liens qui existent entre la qualité d'image et les paramètres qui l'affectent. Enfin, un examen des images obtenues en fonction des paramètres permettra de dégager les performances et les limites de cette approche.

2.2. Imagerie 2-D (Noël et Xu, 1991)

Cette méthode est particulièrement développée dans ce paragraphe car elle est le point de départ des techniques d'imagerie 2-D et 3-D décrites dans ce mémoire.

La méthode d'imagerie proposée par les auteurs, utilise des données de résistivité apparente qui sont générées tomographiquement sur une configuration linéaire d'électrodes équidistantes plantées à la surface du sol. Les données ainsi obtenues sont par la suite rétroprojetées afin d'obtenir une image de la partie investiguée du sous-sol.

La configuration d'électrodes dipôle-dipôle a été adoptée par Noel et Xu pour les mesures de potentiel. Ils ont montré que pour un nombre de N électrodes plantées à la surface du sol, le nombre de cas possible pour le choix des paires d'électrodes d'injection de courant s'élève à N(N-1)/2. Ensuite, pour chacune de ces paires d'électrodes de courant, on obtient (N-2)(N-3)/2 positions pour la paire de potentiel en supposant qu'on exclut toute mesure de potentiel qui impliquerait une électrode de courant. Finalement, il y a N(N-1)(N-2)(N-3)/4 combinaisons possibles pour mesurer le potentiel pour lesquelles la moitié est réciproque. En tenant compte de la reciprocité, le nombre maximum des mesures indépendantes pour une configuration de N électrodes est $S_N = N(N-3)/2$. A titre d'exemple, le nombre possible de mesures indépendantes possible pour la configuration de Wenner est $S_w = 1$ pour N=4, $S_w = 7$ pour N=8, et $S_w = 10795$ pour N=256, etc. D'une façon générale:

$$Sw = \sum_{p=1}^{(N-1)/3} (N - 3p) \tag{2.1}$$

La technique de mesure utilisée par Noel et Xu est composée d'un résistivimètre relié aux électrodes par le biais d'un multiplexeur qui enregistre les valeurs de la résistivité apparente. Les potentiels V_m mesurés pour chaque injection de courant sont utilisés pour ajuster seulement les résistivités des cellules situées entre les équipotentiels (**figure 2.1**)

Soient V_m les potentiels mesurés aux électrodes de potentiel lorsqu'on injecte le courant à une électrode de courant. Notons par V_u le potentiel qui pourrait être mesuré aux mêmes points en supposant un milieu de résistivité uniforme ρ_u . Si le rapport V_m/V_u caractérise un changement de résistivité causé par une hétérogénéité localisée dans la zone affecté par le passage du courant électrique, alors on pourra écrire (Powell et al. 1987): $\rho_n/\rho_u = V_m/V_u$ où ρ_n est la nouvelle valeur de ρ_u après modification de la résistivité du sol. Par projection des potentiels pour toutes les positions d'électrodes de courant et de potentiel

à travers toutes les cellules dans l'espace image (x,z), une inversion approximative de la section de résistivité s'obtient alors par la somme pondérée:

$$\rho_{xz} = \frac{\rho_u}{W} \sum_{p=1}^{k} \left(\frac{V_m}{V_u}\right)_p W(x,z)_p \tag{2.2}$$

où k = N(N-3)/2, et où $W(x,z)_p$ est le coefficient (« le poids ») qui inclue le facteur de sensibilité G dépendant des positions relatives des cellules et des électrodes de courant et de potentiel. Le terme Q est la partie fractionnelle de la cellule qui se situe entre les surfaces équipotentielles. Le terme W est défini par l'expression suivante:

$$\mathrm{W}(x,y)_p = GQ \tag{2.3}$$

Q est estimé à l'aide d'un algorithme qui divise une cellule donnée en 256 rectangles et trouve ensuite le nombre de rectangles se situant entre les équipotentielles pour une configuration dipôle-dipôle. La **figure 2.1** illustre une phase de la reconstruction d'image pour une cellule (petit carré) située en dessous d'une configuration de 16 électrodes.

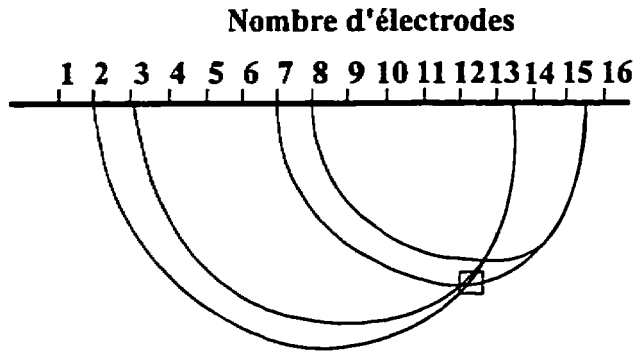


Figure 2.1. Méthode de rétroprojection utilisée pour générer les sections de resistivité. (D'après Noel et Xu, 1991)

Le potentiel V_m mesuré entre les électrodes 2 et 3 quand le courant est injecté entre 13 et 14 est comparé à celui issu d'un milieu homogène. La résistivité de la cellule est ajustée de façon à obtenir une nouvelle valeur ρ_n telle que $\rho_n / \rho_u = V_m/V_u$, où V_u et ρ_u sont le potentiel mesuré et la résistivité pour un milieu homogène. La procédure est répétée pour la mesure entre 7 et 8 quand le courant est injecté entre 15 et 16, ainsi de suite pour toutes les autres combinaisons qui intersectent la cellule. Le facteur de sensibilité G qui est fonction des positions relatives des électrodes de courant et de potentiel puis des cellules est considéré comme ayant une distribution acceptables si les critères suivants sont vérifiés:

- la propagation du courant et les cellules sont 2-D,
- la cellule est petite comparée à la profondeur où elle se trouve,
- le contraste de résistivité entre la cellule et son environnement doit être petit pour que le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule puisse être approximé par le champ appliqué (approximation de Born).

En considérant la géométrie de la **figure 2.2**, pour un courant unitaire en C, le potentiel

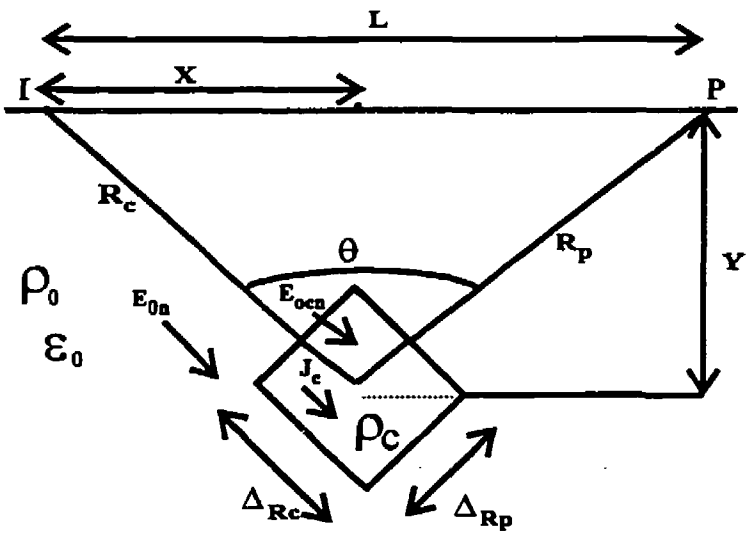


Figure 2.2. Modèle 2-D utilisé pour calculer les termes de sensibilité G.

(D'après Noel et Xu, 1991)

$U_c(p)$ en un point P dû à la présence de la cellule sera:

$$U_c(p) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma_1 \Delta r_p \Delta r_c(-\cos\theta)}{r_p^2} \tag{2.4}$$

où σ_1 est la densité de charge se produisant sur les côtés de la cellule qui sont orthogonaux au vecteur ρ_c. Pour obtenir la densité de charge σ_1, les conditions aux frontières suivantes doivent être considérées:

$$\sigma_1 = \varepsilon_0(E_{0n}-E_{cn}) \quad \text{et} \quad \frac{E_{0n}}{\rho_0} = \frac{E_{cn}}{\rho_c} = J_c \tag{2.5}$$

où E_{on} , E_{cn} et J_c sont les champs normaux et la densité de courant respectivement. De l'équation (2.5) on en déduit:

$$\sigma_1 = \varepsilon_0(\rho_0-\rho_c)J_c \tag{2.6}$$

L'équation (2.4) pourra alors s'écrire:

$$U_c(p) = \frac{(\rho_0 - \rho_c)J_c \Delta r_c \Delta r_p(-\cos\theta)}{2\pi r_p^2} \tag{2.7}$$

L'équation (2.7) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$U_c(P) = (\rho_0 - \rho_c)\Delta r_p \Delta r_c \vec{J}_c . \vec{J}_p \tag{2.8}$$

avec

$$\bar{J}_p = \frac{1}{2\pi r_p^2} \tag{2.9}$$

où $\bar{J}_p$ est la densité de courant (pour un courant unitaire) qui aurait pu être stimulée à la cellule si l'électrode P au lieu de C devenait l'électrode de courant. L'équation (2.8) peut se reformuler alors de la façon suivante:

$$U_c(p) = (\rho_o - \rho_c)G \tag{2.10}$$

où G est le coefficient de sensibilité et est proportionnel au produit scalaire des densités de courant qui se propagent à travers la cellule. Le coefficient G pourrait alors s'écrire comme suit:

$$G = K(j_{xp} j_{xc} + j_{yp} j_{yc}) \tag{2.11}$$

où K est l'aire de la cellule et j_{xp} , j_{xc} , j_{yp} , j_{yc} sont respectivement les composantes horizontales et verticales des densités de courant. Pour un courant unitaire on aura:

$$J_{xp} = \frac{(X-L)}{2\pi}\left[(L-X)^2 + Y^2\right]^{-3/2} \tag{2.12}$$

$$J_{xc} = \frac{X}{2\pi}(X^2 + Y^2)^{-3/2} \tag{2.13}$$

$$J_{yp} = \frac{Y}{2\pi}\left[(L-X)^2 + Y^2\right]^{-3/2} \tag{2.14}$$

$$J_{ye} = \frac{Y}{2\pi}(X^2 + Y^2)^{-3/2} \tag{2.15}$$

La **figure 2.3** donne la distribution des coefficients de sensibilité pour une des configurations d'électrodes (dipôle-dipôle) donnée.

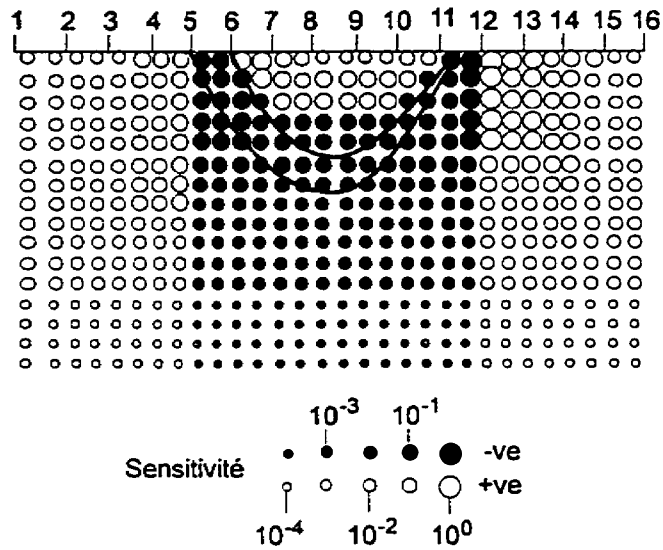


Figure 2.3. Variation normalisée des coefficients de sensibilité G dans le cas d'un dipôle-dipôle. On remarque que la distribution spatiale des valeurs maximums de sensibilité sont similaires à la ligne équipotentielle correspondondante. (D'après Noel et Xu, 1991)

2.3. Développement de l'imagerie 2-D et 3-D en configuration pôle-pôle.

Dans ce paragraphe on procédera au développement théorique de l'imagerie 2-D et 3-D qui constituent de base à l'élaboration des programmes de rétroprojection 2-D et 3-D. Comme point de départ nous analyserons ci-dessous, le potentiel dû à une cellule sphérique placée dans le sous-sol (**figure 2.4**).

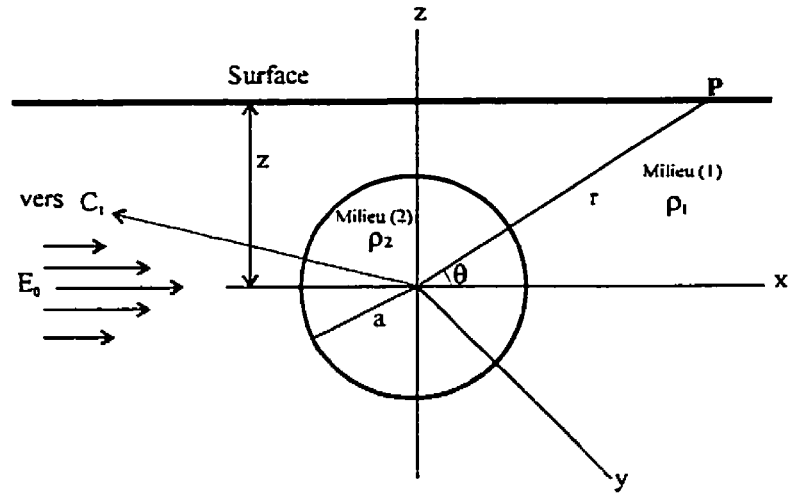


Figure 2.4: Cellule sphérique placée dans le sol, à laquelle on applique un champ électrique (D'après Telford, Geldart et Cheriff, 1993, 2-ème édition)

Le problème est de trouver des solutions à l'équation de Laplace pour des conditions aux limites particulières. Par simplicité on suppose que l'on applique à la sphère un champ uniforme E_0 parallèle à l'axe des x. Cela est équivaut à avoir l'électrode de courant à une distance considérable de la sphère. Par ailleurs, on suppose que le champ électrique tangentiel et la densité de courant normal à l'interface sont continus. Ce qui veut dire que

$E_{1y} = E_{2y}$ et $\sigma_1 E_{1r} = \sigma_2 E_{2r}$, où E_{1y} et E_{1r} pour le milieu 1 puis E_{2y} et E_{2r} pour le milieu 2. Des deux conditions précédentes il en découle que les potentiels $V_1 = V_2$ sont continus.
En utilisant des coordonnées sphériques et en appliquant les conditions aux limites précédentes, on peut resoudre l'équation de Laplace qui satisfait les relations du potentiel à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère. Ainsi pour r > a, le potentiel mesuré en un point P à la surface du sol (Telford, Geldart et Cheriff, 1993 2-ème édition) est égal à :

$$V_p = -E_0 r \cos\theta + \frac{E_0 a^3 \cos\gamma}{r^2} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \tag{2.16}$$

où E_0 est le champ électrique, ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les résistivités du milieu environnant et de la cellule sphérique. En supposant que E_0 est dû à une source ponctuelle de courant I située à une distance R de l'origine, on peut écrire:

$$E_0 = \frac{J}{\rho_1} = \frac{I}{2\pi R^2} \tag{2.17}$$

En substituant l'expression de E_0 dans l'équation (2.16) on aura:

$$V_p = -\frac{I\rho_1}{2\pi R^2} \left\{ 1 - \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{(\rho_1 + 2\rho_2)} \left(\frac{a}{r}\right)^3 \right\} r \cos\theta \tag{2.18}$$

Le potentiel normal mesuré en un point P à la surface du sol (s'il n'y avait pas de cellule de résistivité ρ_2) peut s'écrire alors:

$$V_n(P) = -E_o r \cos\theta \tag{2.19}$$

Le potentiel anormal, (dû à la présence de la cellule de résistivité ρ_2) peut s'exprimer comme suit:

$$V_a = \frac{E_0}{r^2} a^3 \cos\theta \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2}\right) \tag{2.20}$$

où le champ électrique Eo est dû à la source ponctuelle I, ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les résistivités du milieu environnant et de la cellule elle-même.

Notons que deux suppositions ont été faites, à savoir que le champ normal (externe) est uniforme et qu'il n' y a pas d'interaction entre la sphère et son image. Ces deux suppositions sont vraies que si la sphère se trouve à une distance considérable de la source de courant et de la surface. Si la distance entre le centre de la sphère et la surface est supérieure à 1.3*a, alors l'approximation est raisonnablement bonne.

- Si ρ_2 est un peu plus conducteur que ρ_1 ($\rho_2 < \rho_1$ et $\rho_2 = \rho_1 - \Delta\rho$; avec $\frac{\Delta\rho}{\rho_1} << 1$), et en remplaçant E_o par son expression on aura alors:

$$V_a = \frac{I}{2\pi R^2} \frac{a^3}{r^2} \cos\theta \frac{\Delta\rho}{3\rho_1 - 2\Delta\rho} \rho_1 \tag{2.21}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur de l'équation (2.21) par ρ_1 on obtient:

$$V_a = \frac{I}{2\pi R^2} \frac{v}{r^2} \cos\theta \frac{\Delta\rho}{3 - \frac{2\Delta\rho}{\rho_1}} \tag{2.22}$$

où v représente le volume de la cellule.

L'équation (2.21) peut s'écrire encore

$$V_a \approx \frac{I}{2\pi R^2}\frac{v}{3}\frac{1}{r^2}\cos\theta\Delta\rho \tag{2.23}$$

- Si ρ_2 est très conducteur par rapport à ρ_1 ($\rho_2 << \rho_1$), de l'équation (2.20), on a:

$$\frac{\rho_1(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 + 2\rho_2} \approx \rho_1 \approx \Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 \tag{2.24}$$

et alors l'expression de V_a peut s'écrire:

$$V_a = \frac{I}{2\pi R^2} v \frac{1}{r^2}\cos\theta\Delta\rho \tag{2.25}$$

En général, à un coefficient α près de l'ordre de 1/3 à 1 tel que $\rho_2 \cong \rho_1$ à $\rho_2 << \rho_1$, on a :

$$V_a = \alpha\frac{I}{2\pi R^2}\frac{v}{r^2}\cos\theta\Delta\rho \tag{2.26}$$

Si

$$J_R = \frac{I}{2\pi R^2}\hat{\bar{R}} \qquad \text{et} \quad J_r = \frac{\alpha}{r^2}\hat{\bar{r}} \tag{2.27}$$

où $\hat{\bar{R}}$, est le vecteur unitaire de direction R et $\hat{\bar{r}}$, le vecteur directeur de direction r, on peut alors écrire:

$$V_a = v\Delta\rho\vec{J}_R\vec{J}_r \tag{2.28}$$

On remarque que l'expression de l'équation (2.27) est très proche de celle de Noël et Xu qui a été exprimée comme suit:

$$U_c(P) = (\rho_0 - \rho_c)\Delta r_p \Delta r_c \vec{J}_c \vec{J}_p \tag{2.29}$$

L'expression du coefficient de sensibilité G peut alors se définir de la façon suivante:

$$G = V\vec{J}_R\vec{J}_r \tag{2.30}$$

Les composantes de $\vec{J}_R$ sont: J_{rx} , J_{ry} , J_{Rz} ; et celles de $\vec{J}_r$ sont: J_{rx} , J_{ry} , J_{rz}

avec

$$\vec{J}_R = J_{Rx}\vec{i} + J_{Ry}\vec{j} + J_{Rz}\vec{k},$$

$$\vec{J}_r = J_{rx}\vec{i} + J_{ry}\vec{j} + J_{rz}\vec{k},$$

et

$$\vec{J}_R\vec{J}_r = J_{Rx}J_{rx} + J_{Ry}J_{ry} + J_{Rz}J_{rz}$$

2.3.1 Développement de l'imagerie 2-D.

La géométrie du problème est donnée à la **figure 2.5** ci-dessous.

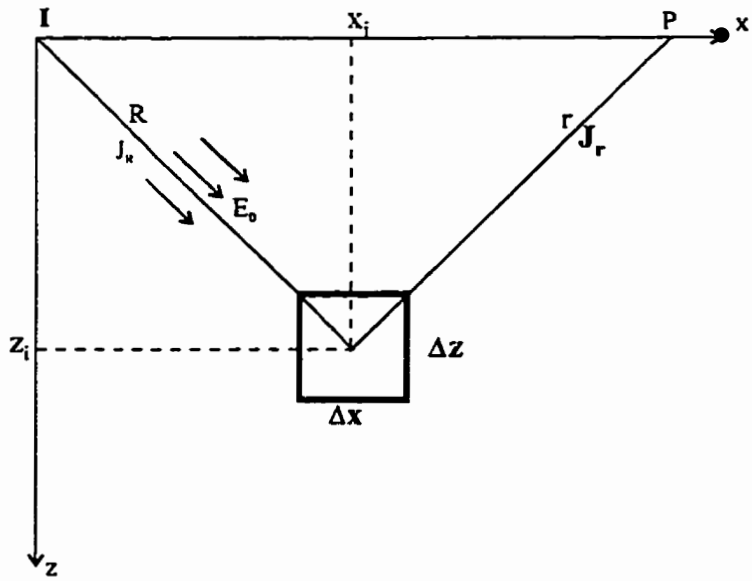


Figure 2.5: Modèle 2-D utilisé pour calculer l'expression du coefficient de sensibilité.

Dans l'expression de l'équation (2.28), V a été définit comme étant le volume de la cellule sphérique (corps tridimensionnel). En transcrivant cette équation dans le cas d'un environnement 2-D et en se servant des notations de la **figure 2.5**, on a:

$$V_a = S\Delta\rho\vec{J}_R\vec{J}_r \tag{2.31}$$

où $S=\Delta x\Delta y$, représente l'aire de la cellule. On peut définir le coefficient de sensibilité comme suit:

$$G = S\vec{J}_R \vec{J}_r \tag{2.32}$$

avec $\vec{J}_R = \vec{J}_{Rx}\vec{i} + \vec{J}_{Rz}\vec{j}$ et $\vec{J}_r = \vec{J}_{rx}\vec{i} + \vec{J}_{rz}\vec{j}$

En prenant en considération la géométrie de la figure 2.5, les composantes $\vec{J}_R$ et $\vec{J}_r$ peuvent être exprimées en fonction des composantes x_i et z_i de la cellule, ainsi on a:

$$J_{Rx} = J_R \frac{x_i}{R} \tag{2.33}$$

$$J_{Rz} = J_R \frac{z_i}{R} \tag{2.34}$$

où $J_R = \dfrac{I}{2\pi R^2}$ et $R = (x_i + z_i)^{1/2}$

En remplaçant J_R et R par leur expression et pour un courant unitaire I, on a:

$$J_{Rx} = \frac{x_i}{2\pi(x_i^2 + z_i^2)^{3/2}} \tag{2.35}$$

$$J_{Rz} = \frac{z_i}{2\pi(x_i^2 + z_i^2)^{3/2}} \tag{2.36}$$

De façon similaire au cas précédent, on peut exprimer les composantes de $\vec{J}_r$ par:

$$J_{rx} = \frac{x_p - x_i}{r} J_r \tag{2.37}$$

$$J_{rz} = \frac{-z_i}{r} J_r \tag{2.38}$$

où $J_r = \dfrac{I}{2\pi r^2}$ et $r = ((x_p - x_i)^2)^{1/2}$

En substituant J_r et r par leur expression et pour un courant unitaire I, on a:

$$J_{rx} = \frac{1}{2\pi} \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + z_i^2)^{3/2}} \tag{2.39}$$

$$J_{rz} = \frac{1}{2\pi} \frac{-z_i}{((x_p - x_i)^2 + z_i^2)^{3/2}} \tag{2.40}$$

Si le courant I est injecté en un point $P(x_s, z_s=0)$ différent de l'origine, on a:

$$J_{Rx} = \frac{x_i - x_s}{R} J_R \tag{2.41}$$

$$J_{Rz} = \frac{z_i}{R} J_R \tag{2.42}$$

avec $J_R = \dfrac{I}{2\pi R^2}$ où $R = ((x_i - x_s)^2 + z_i)^{1/2}$

Connaissant les différentes composantes des densités de courant, on peut finalement écrire G sous la forme:

$$G = K\,(J_{rx} \cdot J_{rx} + J_{rz} J_{rz})$$

où K = ΔxΔy, est l'aire du corps.

2.3.2 Développement de l'imagerie 3-D

La **figure 2.6** représente le modèle 3-D utilisé pour calculer l'expression du coefficient de sensibilité G.

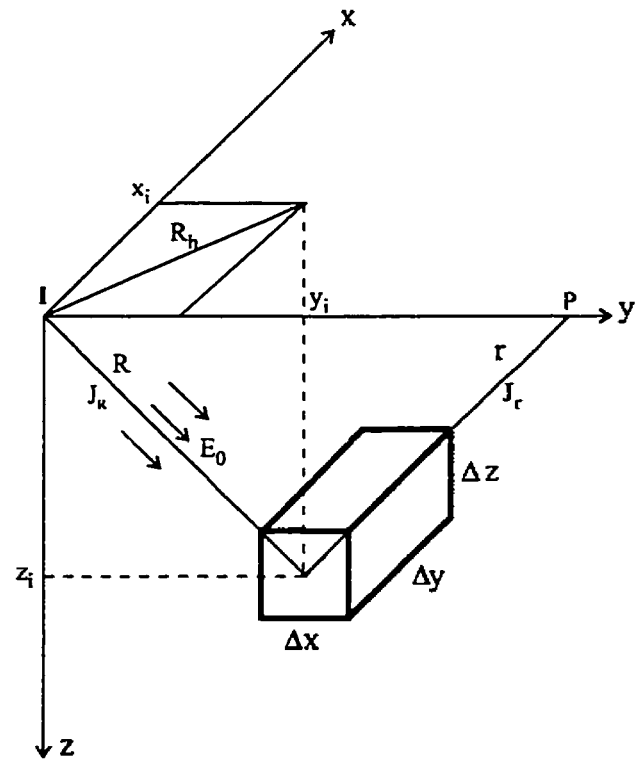


Figure 2.6: Modèle 3-D utilisé pour le calcul de l'expression des coefficients de sensibilité G.

Puisque l'équation (2.28) represente l'expression de G pour un corps tridimensionnel, on peut alors exprimer les composantes de $\bar{J}_R$ et $\bar{J}_r$ de cette équation en fonction des coordonnées x_i , y_i et z_i pour une cellule quelconque i, nous aurons:

$$J_{Rz} = J_R \frac{z_i}{R} = J_R \frac{z_i}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{1/2}} \tag{2.43}$$

$$J_{Rx} = J_{Rh} \frac{x_i}{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2}} \tag{2.44}$$

$$J_{Ry} = J_{Rh} \frac{y_i}{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2}} \tag{2.45}$$

avec

$$J_{Rh} = J_R \frac{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2}}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{1/2}}$$

où

$$J_R = \frac{I}{2\pi R^2} \tag{2.46}$$

et où

$$R^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$$

En remplaçant J_R et R^2 par leur expression et pour un courant unitaire I on aura finalement

$$J_{Rx} = \frac{x_i}{2\pi (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{3/2}} \tag{2.47}$$

$$J_{Ry} = \frac{y_i}{2\pi(x_i^{\,2} + y_i^{\,2} + z_i^{\,2})^{3/2}} \tag{2.48}$$

$$J_{Rz} = \frac{z_i}{2\pi(x_i^{\,2} + y_i^{\,2} + z_i^{\,2})^{3/2}} \tag{2.49}$$

De même pour les composantes de $\vec{J}_r$ nous aurons:

$$J_{rx} = J_r \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{1/2}} \tag{2.50}$$

$$J_{ry} = J_r \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{1/2}} \tag{2.51}$$

$$J_{rz} = J_r \frac{-z_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{1/2}} \tag{2.52}$$

où

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \tag{2.53}$$

et où

$$r^2 = \left[(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2}\right]^{1/2}$$

En remplaçant J_r et r^2 par leur expression et pour un courant unitaire I on a:

$$J_{rx} = \frac{1}{2\pi} \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{3/2}} \tag{2.54}$$

$$J_{ry} = \frac{1}{2\pi} \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{3/2}} \tag{2.55}$$

$$J_{rz} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{-z_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + z_i^{\,2})^{3/2}} \tag{2.56}$$

Si le courant I n'est pas injecté à l'origine des coordonnées (0, 0, 0) mais en un point quelconque P de coordonnées (x_s , y_s , z_s =0), les composantes de $\vec{J}_R$ s'expriment alors comme suit:

$$J_{Rx} = J_R \frac{(x_i - x_s)}{R} \tag{2.57}$$

$$J_{Ry} = J_R \frac{(y_i - y_s)}{R} \tag{2.58}$$

$$J_{Rz} = J_R \frac{z_i}{R} \tag{2.59}$$

$$\text{où} \quad J_R = \frac{I}{2\pi R^2} \quad \text{avec} \quad R^2 = (x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + z_i^{\,2} \tag{2.60}$$

Connaissant maintenant les différentes composantes de $\vec{J}_R$ et $\vec{J}_r$ l'expression du coefficient de sensibilité G peut s'écrire:

$$G = K\,(J_{Rx} J_{rx} + J_{Ry} J_{ry} + J_{Rz} J_{rz})$$

où $K = \Delta x \Delta y \Delta z$ représente le volume de la cellule, Δx, Δy et Δz sont les tailles de la cellule dans la direction x, y, et z, et J_{Rx} , J_{rx} , J_{Ry} , J_{ry} , J_{Rz} , J_{rz} sont les densités de courant dans les trois directions x, y et z.

Pour un courant unitaire $\vec{J}_R = \dfrac{1}{2\pi R^2}$ et $\vec{J}_r = \dfrac{1}{2\pi r^2}$ en supposant que $\vec{E} = \vec{E}_0$ est constant à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule (approximation de Born).

L'expression de G étant connue, on en arrive à la formulation ci-dessous (du type de l'équation (2.2) définit antérieurement):

$$\rho a(\varepsilon,\eta) = \sum_{all(x,y,z)} G\,(x,y,z,\varepsilon,\eta)\ \rho(x,y,z) \qquad (2.61)$$

où $\rho_{a(\varepsilon,\eta)}$ est la résistivité apparente calculée pour chaque potentiel mesurée lorsque l'électrode de courant est située à ε et celle du potentiel à η, $G(x,y,z,\varepsilon,\eta)$ est le coefficient de sensibilité qui est fonction des positions des cellules, des électrodes. ρ (x,y,z) est la résistivité à la position (x,y,z) dans le sol.

Sous forme discrète, on peut alors écrire l'équation (2.61) sous la forme suivante:

$$\rho_{alm} = \sum_{i,j,k} G\,(i,j,k,l,m)\ \rho_{ijk}\ , \qquad (2.62)$$

sous forme matricielle

$$[\rho_a]=[G][\rho] \qquad \rightarrow \qquad [G]^T\,[\rho_a] = [G]^T\,[G]\,[\rho] \qquad (2.63)$$

Une inversion approximative de l'équation (2.30) suite à la rétroprojection conduit à:

$$[D]\,[\rho] = [G]^T\,[\rho_a] \qquad (2.64)$$

où [D] consiste aux termes $D_{l,m} = \sum_{i,j,k} G(i,j,k,l,m)$.

CHAPITRE 3
MODÉLISATION ET IMAGERIE 2-D / 3-D

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les principales étapes pour l'élaboration de deux programmes (2-D et 3-D) de rétroprojection grâce auxquels une image des sections de résistivité pourraient être obtenues. Des données de résistivité apparente sont nécessaires pour réaliser l'inversion approximative à l'aide des programmes de rétroprojection. on aura alors recours dans un premier temps à des données de résistivité apparente qui seront générées synthétiquement à l'aide des programmes de modélisation 2-D et 3-D. Enfin, l'image des sections de résistivité obtenues sera visualisée par un logiciel de visualisation.

3.2 Étapes des programmes de rétroprojection 2-D et 3-D

Compte tenu de la similarité des deux programmes du point de vue structure, on se limitera de donner une description des principales étapes pour le cas 3-D. Il est clair que les étapes pour le cas 2-D s'obtiennent de la même façon que celles du cas 3-D, seule la couverture des mesures est une surface pour le cas 3-D et un profil pour le cas 2-D. Les deux programmes ont été élaborés en utilisant le langage de programmation Matlab.

Étape 1 : détermination des paramètres d'entrée du programme

Pour lancer le programme, l'utilisateur doit spécifier les paramètres suivants:

- le nombre d'électrodes dans chacune des directions des axes X et Y . Le nombre total d'électrodes sur le plan X, Y (surface du sol) s'obtient alors en faisant le produit des nombres d'électrodes dans les deux directions des axes X et Y.

- l'espacement (équidistant) entre les électrodes,
- les coordonnées de la première électrode,
- le nombre de cellules de résistivité dans chacune des directions X, Y, Z; Le nombre total des cellules est alors déterminé par le produit des nombres de cellules dans les trois directions des axes X, Y et Z
- les dimensions Δx, Δy, Δz des cellules (toutes identiques),
- les coordonnées du centre x_0, y_0 et z_0 de la première cellule.

Étape 2 : calcul des coordonnées des électrodes

Ayant défini le nombre total des électrodes à utiliser, l'espacement entre les électrodes et les coordonnées de la première électrode (dans l'étape 1), le programme calcule automatiquement les coordonnées de chacune des électrodes impliquées pour faire les mesures.

Étape 3 : calcul des coordonnées du centre des cellules

D'une façon similaire à l'étape précédente, une fois que l'utilisateur aura défini le nombre total des cellules, les dimensions Δx, Δy, Δz de la première cellule ainsi que les coordonnées du centre de la première cellule (dans l'étape 1), le programme calcule automatiquement les coordonnées du centre de toutes les cellules.

Étape 4 : calcul des coefficients de sensibilité G

Le calcul des coefficients de sensibilité nécessite celui de K et des densités de courant (voir bases théoriques des formulations 2-D et 3-D). Le facteur K est simplement le produit des dimensions Δx, Δy, Δz de la cellule; c'est à dire son volume. Les

coefficients de sensibilité sont des facteurs purement géométriques dépendant des positions relatives des électrodes et des cellules, donc de leurs coordonnées. Puisque les coordonnées de celles-ci sont connues, en se servant alors des expressions des densités de courant, le programme calcule les coefficients de sensibilité.

Étape 5 : calcul des résistivités rétroprojetées

Le calcul des résistivités rétroprojetées s'obtient à partir de l'équation (2.64) par:

$$\rho_{xyz} = \frac{1}{\sum W} \sum_{p=1}^{N-1} \rho_{a(p)} W(x,y,z)_p \tag{3.1}$$

où N est le nombre total des électrodes, W(x,y,z) est le coefficient « le poids » qui est égal au produit du coefficient de sensibilité G et du terme Q (voir chapitre 2) et $W = \sum_{p=1}^{N-1} W(x,y,z)_p$. La valeur de Q= 1 a été considérée pour les calculs de W(x,y,z). Ils ont été modifiés après en fonction de la profondeur. Les $\rho_a(p)$ représentent les résistivités apparentes mesurées ou générées synthétiquement pour une configuration (p) particulière d'électrode de courant et de potentiel. Pour exécuter l'étape 5, le programme a recours à des données de $\rho_a(p)$. Pour cette fin, plusieurs modèles ont permis de générer des données synthétiques de résistivité apparente.

3.3 Distribution spatiale des coefficients de sensibilité G

Les coefficients de sensibilité sont des facteurs déterminants pour le calcul des sections de résistivité rétroprojetées. Ils indiquent, pour une configuration donnée, la sensibilité de la réponse mesurée (V) à la résistivité d'une cellule déterminée. Le

coefficient de sensibilité représente donc la contribution de la cellule à la réponse observée. L'habileté du programme de rétroprojection à reconstruire une image convenable des structures du sous-sol dépendent en grande partie de la répartition de ces coefficients. Il est donc important de s'assurer que les valeurs calculées de G soient acceptables. Pour ces raisons, de nombreux tests ont été réalisés pour analyser la distribution des coefficients de sensibilité en fonction des coordonnées x_i , y_i , et z_i des cellules pour une paire donnée d'électrodes de courant et de potentiel).

Le modèle de la **figure 3.1** ci-dessous montre une vue en plan de la disposition des électrodes (les ronds) et des cellules (les carrés).

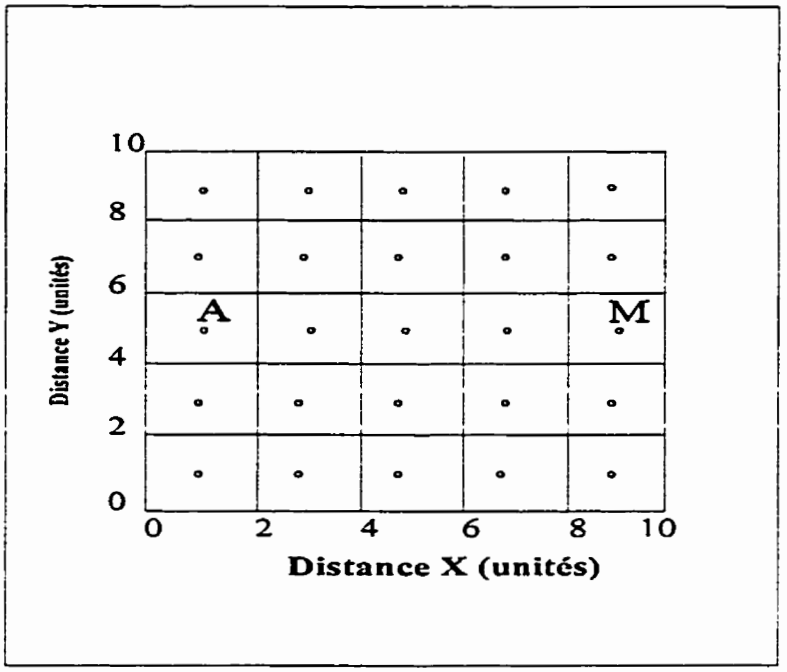


Figure 3.1. Vue en plan de la disposition des électrodes (ronds) et des cellules (carrés) pour calculer les coefficients de sensibilité G.

A et M indiquent l'emplacement de la paire d'électrodes pour laquelle les coefficients G ont été calculés. Les valeurs de G pour le modèle de la figure 3.1 sont obtenues en définissant dans le programme les paramètres suivants:

- le nombre d'électrodes dans la direction des axes X et Y s'élève à N= 5 respectivement. Le nombre total d'électrodes impliquées est alors N_T= 5*5=25. L'écartement entre les électrodes est L=2 unités.
- le nombre des cellules dans chacune des directions des axes X, Y et Z est égal à Ncell = 5. Le nombre total des cellules s'élève alors à $Ncell_T$ = 5*5*5 = 125. Des dimensions de $\Delta xc = \Delta yc = \Delta zc = 2$ unités ont été attribuées aux cellules. Les coordonnées du centre de la première cellule sont fixées à $x_0 = y_0 = z_0 = 1$.

Les valeurs obtenues de G sont ensuite représentées en fonction des coordonnées x_i , y_i , et z_i des cellules sous forme de contours à l'aide du logiciel GEOSOFT version 4.00.03. Il est important de mentionner que pour la représentation des cartes en couleur avec GEOSOFT, la distribution des zones de couleur peut être déterminée selon les options suivantes: linéaire, log-linéaire et aire égale. La classe linéaire correspond à une distribution linéaire en incréments uniformes des valeurs de la grilles. L'option log-linéaire prend d'abord le log(base 10) des données avant d'appliquer la classe linéaire. Pour la classe aire égale, la détermination des zones se fait statistiquement de manière à ce que chaque valeur de la grille puisse occuper une aire égale sur la carte. La distribution de couleur aire égale est calculée en supposant approximativement une distribution normale des données. Cette option fait ressortir les substilités et est recommandée (selon le manuel) pour la plupart des données, puis est d'usage plus courant. Nous tenons à souligner que dans nos représentations, nous avons utilisé soit l'option linéaire, soit l'option aire égale. Puisque l'option log-linéaire donne des résultats similaires à ceux de l'option linéaire, nous l'avons utilisé dans un seul cas en guise d'illustration pour comparaison. L'utilisation alternative des options linéaire et aire égale s'explique par le fait que certaines images sont mieux restituées avec l'une ou l'autre de ces options. En somme, tout est question de

ainsi l'utilisation de d'une option plutôt que d'une autre pourrait dépendre d'un individu à l'autre. Dans tous les cas, notre but est de présenter des images mettant en évidence la distribution des zones de fortes et de faibles variations des données. Une mention sera faite en dessous de chaque figure, pour préciser l'option utilisée pour la distribution des zones de couleur.

La **figure 3.2** représente la distribution de G dans le plan x,y, pour la section z=1 unité. Les valeurs les plus élevées de G se concentrent autour des positions des électrodes A et M. On constate une diminution progressive des valeurs de G au fur et à mesure qu'on s'écarte de A et M. On assiste ensuite à un changement de signe des iso-contours vers les zones plus éloignées par rapport à la position des électrodes A et M.

La **figure 3.3** montre les résultats pour la section z=5 unités qui est plus profonde que la précédente. Les iso-contours affichent des valeurs positivement plus faibles que celles de la section z=1 unité. On observe là aussi une diminution des G au fur et à mesure qu'on s'écarte de la position des électrodes fixes A et M puis un changement de signe de ceux-ci.
Ces deux exemples montrent que les valeurs de G sont plus élevées aux points d'injection de courant et de mesure de potentiel et qu'elles diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne latéralement de ceux-ci. On constate aussi que, plus la section considérée z_i se trouve en profondeur, plus G est faible.

La **figure 3.4** et **3.5** donnent la distribution de G dans le plan x, z pour les sections y=1 et y=5 unités. Pour la section y=1, de la surface vers les profondeurs plus élevées, les iso-contours passent des valeurs négatives à celles positives. Dans le cas de la section y=5 c'est un phénomëne opposé à celui de la section y=1 qui se produit. Dans tous les deux cas, les coefficients de sensibilité décroissent avec la profondeur.

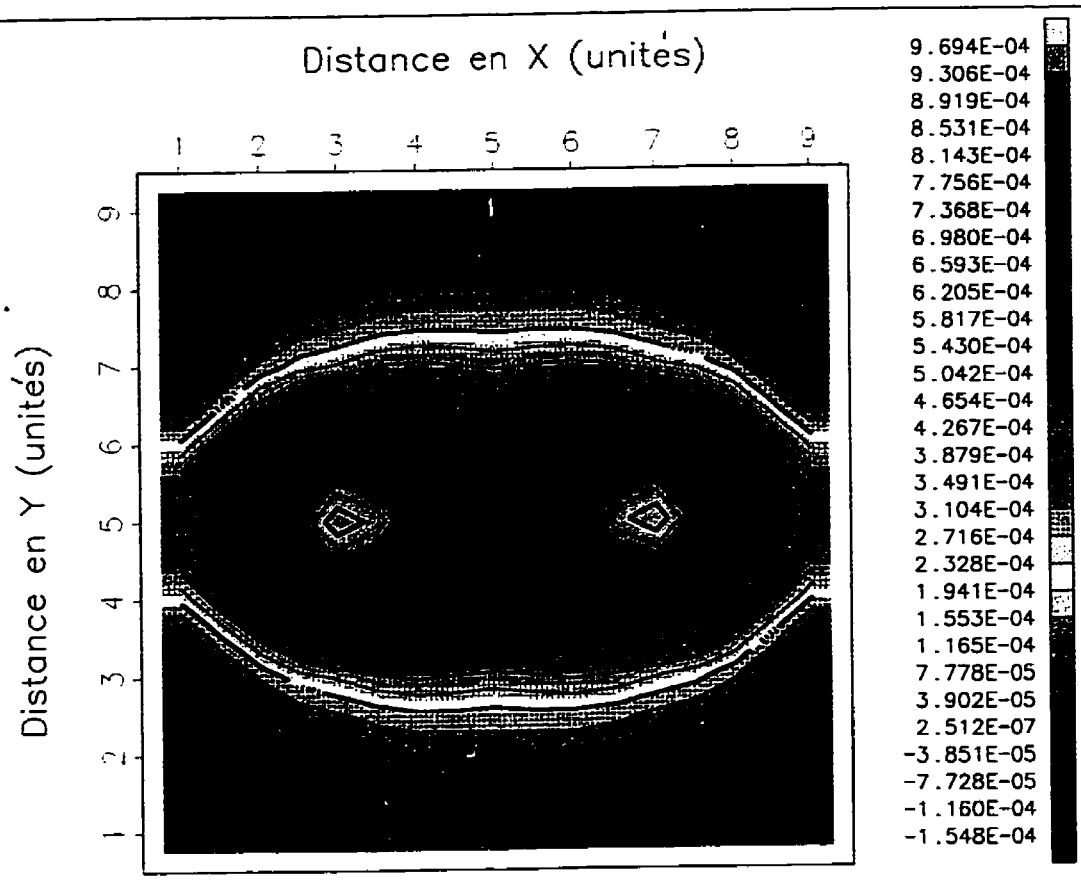


Figure 3.2: Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x,y pour la section z=1 unité. Les points A,M de la figure 3.1 indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés. (option linéaire)

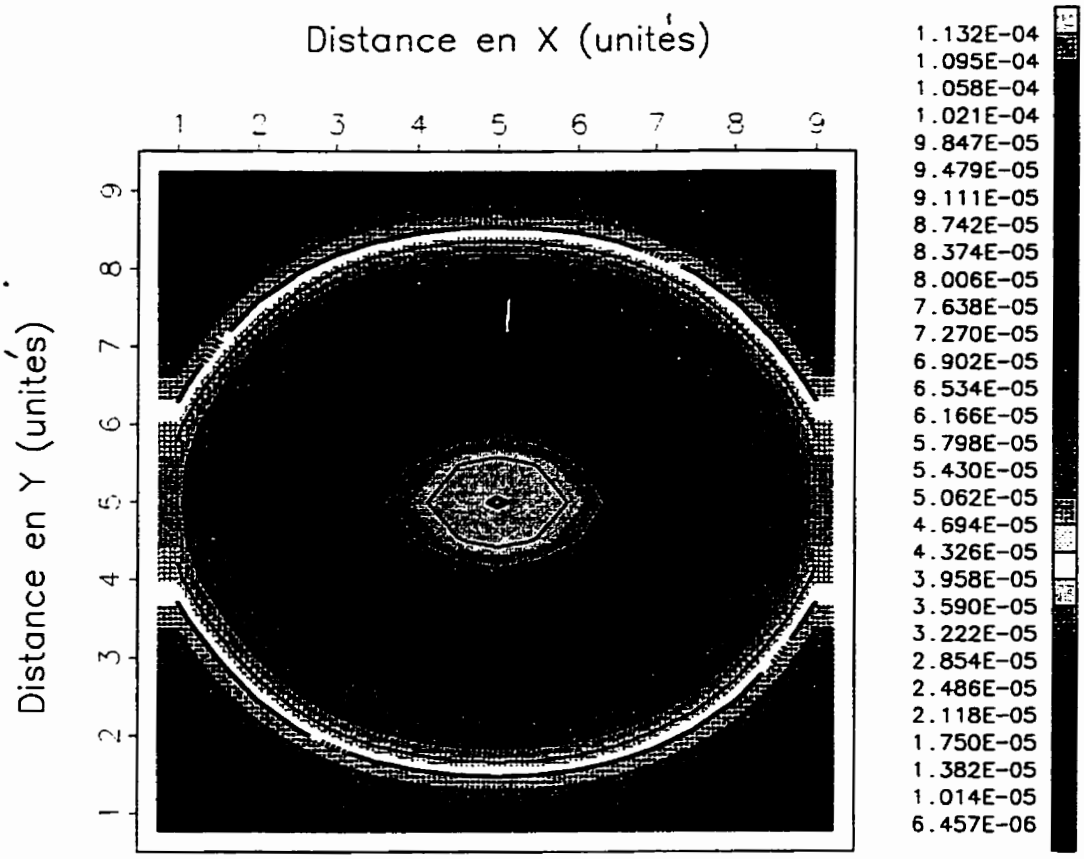


Figure 3.3: Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x,y pour la section z=5 unités. Les points A,M de la figure 3.1 indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients sont calculés. (option linéaire).

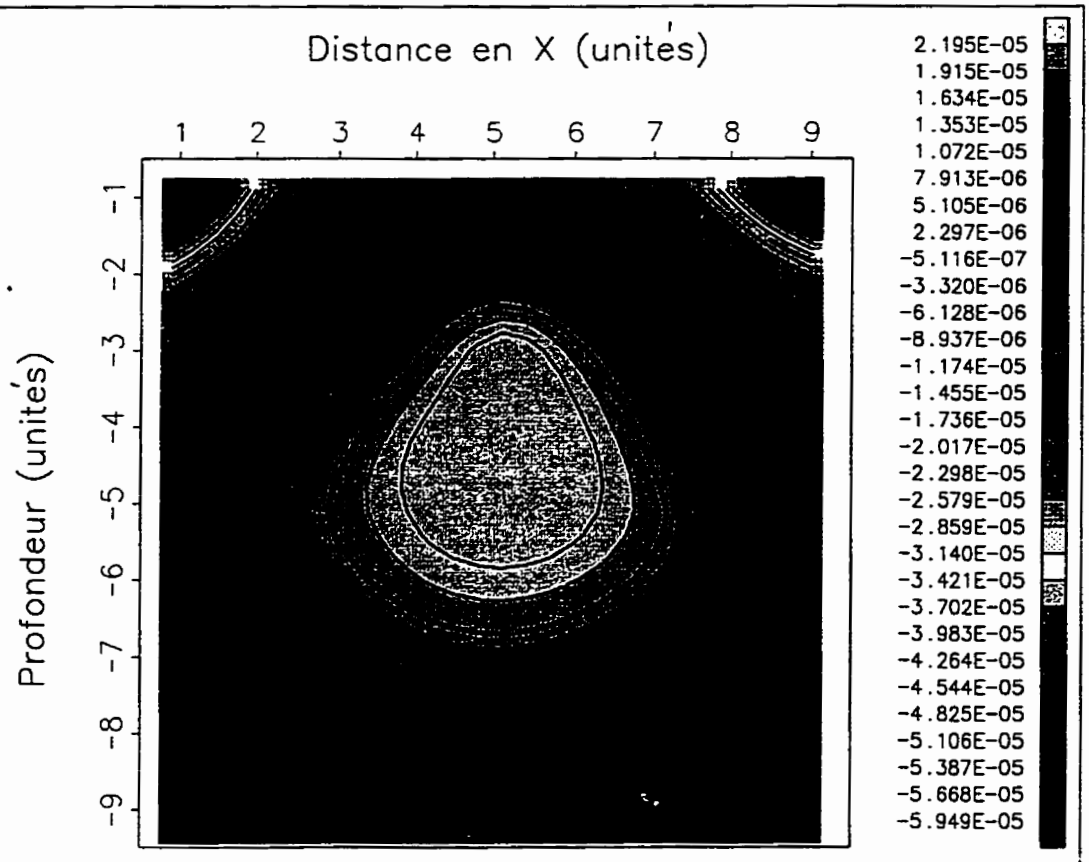


Figure 3.4: Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x,z, pour la section y = 1 unité. Les points A, M de la figure 3.1 indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés (option linéaire).

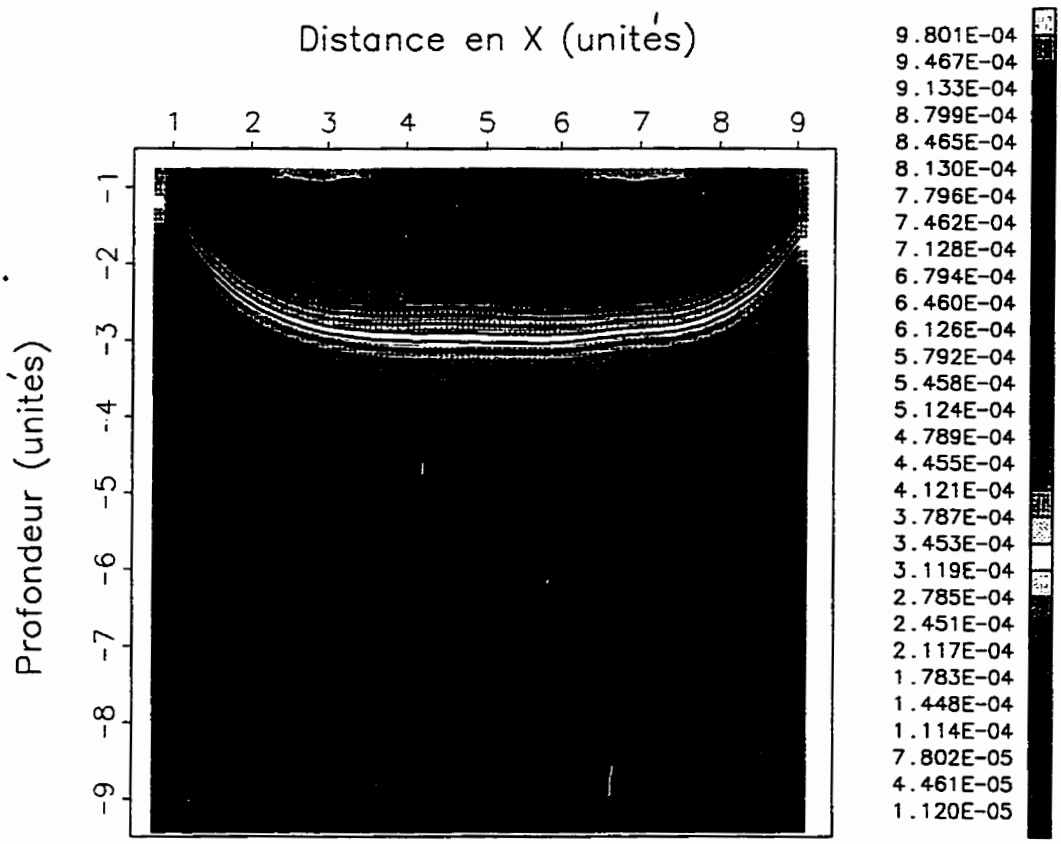


Figure 3.5: Distribution des coefficients de sensibilité dans le plan x,z, pour la section y = 5 unités. Les points A, M de la figure 3.1 indiquent l'emplacement des électrodes pour lesquelles ces coefficients ont été calculés (option linéaire).

Les résultats de l'analyse de la distribution spatiale des coefficients G sont prometteurs. On constate que pour tous les modèle utilisé, il y a une décroissance de G avec la profondeur pour les représentations dans le plan x, z et une décroissance latérale pour les graphiques dans le plan x, y. Dans le cas de la représentation dans le plan x, y, on s'aperçoit que les valeurs de G semblent moins dispersées pour les sections de z_i plus en profondeur. En ce qui concerne les graphiques dans le plan x, z, les valeurs de G apparaissent également moins sporadiques pour des sections y_i éloignées des deux électrodes fixes. Bien que la distribution des G dans le plan x, y semble être mieux assortie que celle dans le plan x, z, les résultats obtenus sont conformes à ceux auquels on pourrait s'attendre. On sait que les coefficients de sensibilité sont fonction des composantes horizontales et verticales des densités de courant. Or celles-ci ont une intensité maximale à proximité des électrodes de courant et de potentiel et diminuent d'intensité en profondeur et latéralement lorsqu'on s'écarte des positions d'électrodes de courant et de potentiel. Il est alors normal que les coefficients de sensibilité aient une distribution similaire à la propagation des densités de courant.

3.4 Modélisation tomographique électrique 2-D et 3-D

3.4.1 Modélisation tomographique électrique 2-D

Dans le but de créer des modèles synthétiques on a eu recours au programme de simulation UBC (University of British Columbia) qui est une version adaptée du programme RESIS2D1 développé par Dey et Morrison (1976). Ce programme de modélisation permet de calculer des résistivités apparentes pour une configuration donnée d'électrodes plantées en trous de forage. Le principe consiste en deux trous de forage où l'on effectue des mesures pôle-pôle en maintenant une source fixe dans le premier forage et les mesures de potentiel sont faites sur un récepteur qu'on déplace progressivement dans le

second forage. Cette technique appelée communément technique de balayage tomographique permet une « illumination » du corps sous différents angles. Les potentiels mesurés à chaque point permettent de calculer les valeurs des résistivités apparentes correspondantes. Dans la présente étude, il a fallu quelque peu modifier le programme de modélisation 2-D de UBC pour l'adapter à un système de mesure en surface utilisant la technique du E-SCAN décrite préalablement. La grille d'électrodes E-SCAN se substitue alors à une ligne d'électrodes pour le cas 2-D (**figure 3.6**) ci-dessous.

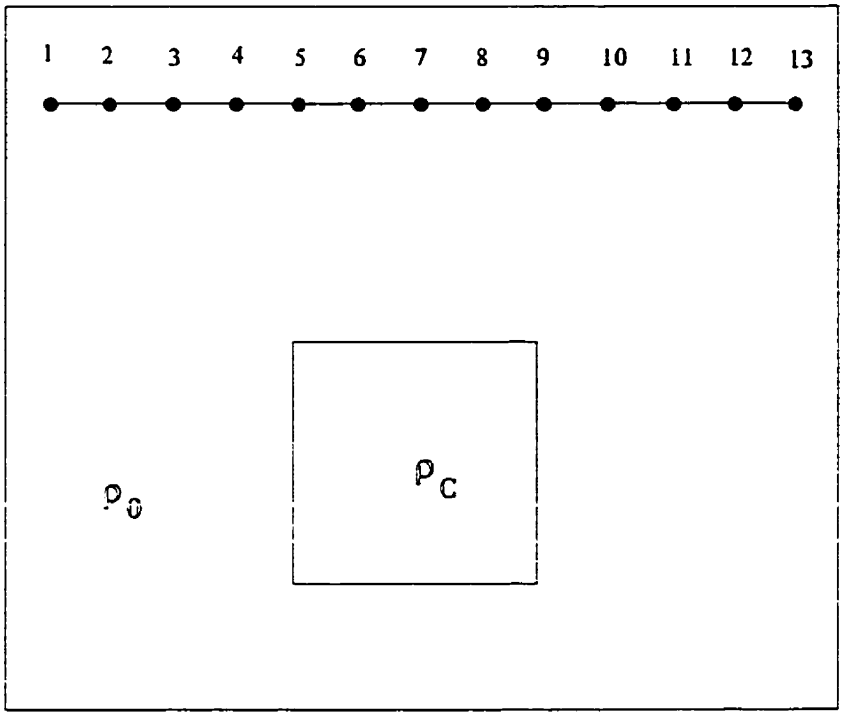


Figure 3.6. Disposition en ligne des électrodes pour le système de mesure en pôle-pôle (cas 2-D).

Les bases théoriques de la modélisation à l'aide du programme UBC reposent sur la méthode des différences finies (MDF) de Dey et Morrison, 1979. L'étude faite par Dey et Morrison a révélé que beaucoup de facteurs pourraient influencer la qualité des données

obtenues par MDF. En outre, l'étude fait ressortir que la précision de la modélisation par MDF est liée aux effets de la discrétisation, des conditions aux frontières et de la transformation inverse des potentiels. De plus, il a été remarqué que la sensibilité de la réponse de la modélisation par MDF de Dey et Morrison 1979, est sujette aux effets de certains paramètres tels que:

- effet de la taille de la grille,
- effet de la discrétisation de la grille,
- effet des frontières de la grille,
- effet du contraste des résistivités entre le corps et le milieu encaissant,
- effet des distances entre les sources et les récepteurs,
- effet de la géométrie, de la profondeur et du pendage du corps.

Bref, compte tenu de tous ces facteurs il semble alors extrêmement difficile d'obtenir une réponse adéquate par modélisation numérique. L'obtention de résultats précis à l'aide du programme de modélisation UBC demandera sans doute de prendre des précautions particulières. Les données de résistivité apparente obtenues par modélisation serviront à calculer les résistivités rétroprojetées par les programmes de rétroprojection décrits auparavant.

3.4.2 Modélisation tomographique électrique 3-D

Le programme de modélisation 3-D utilisé dans cette étude est le TOMOPPFMT développé à MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ce programme utilise un système de mesure (pôle-pôle) en surface basé sur la technique de la grille d'électrodes E-SCAN (**figure 3.7**). Le courant est injecté à l'une des électrodes et on mesure le potentiel sur les électrodes restantes. Chaque électrode devient tour à tour une électrode de courant et de potentiel. Les résistivités apparentes sont calculées à partir des potentiels mesurés pour la configuration pôle-pôle utilisée.

Le programme de modélisation 3-D TOMOPPFMT est basé sur la théorie de l'analogie avec les réseaux de transmission (Madden et Swift,1969; et Swift, 1971). La méthode du gradient conjugué a été appliquée pour résoudre le problème inverse ainsi que celui de la modélisation. Les conditions aux limites appliquées dans le développent du programme sont basées sur celles de Dey et Morrison, 1979.

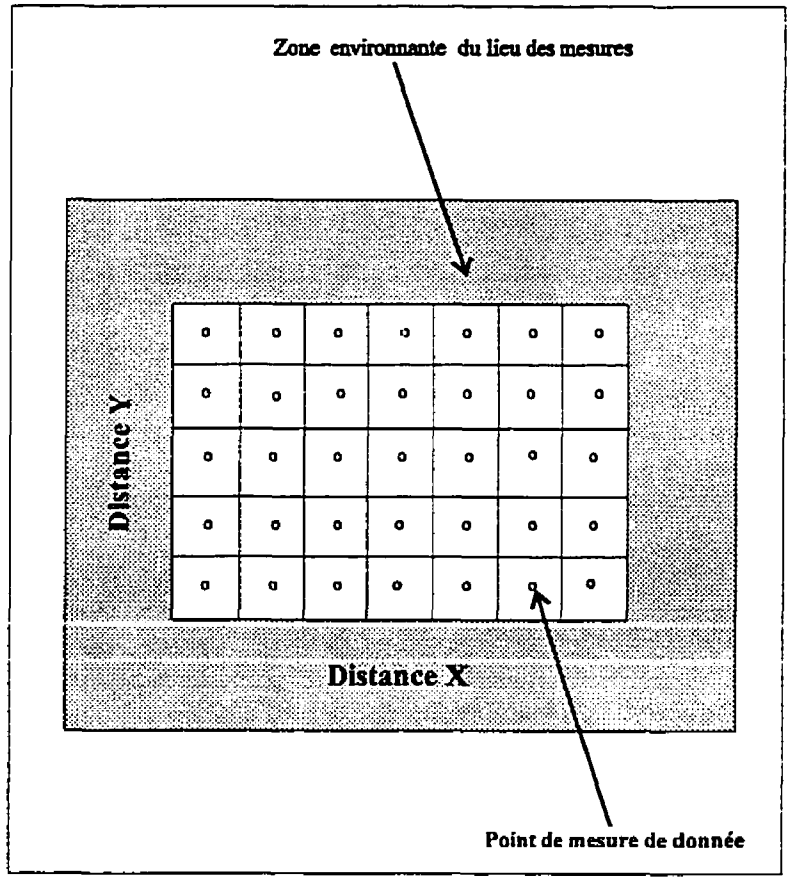


Figure 3.7. Illustration d'une grille E-SCAN pour effectuer des mesures de résistivité apparente (pôle-pôle).

3.5 Reconstruction d'image 2-D et 3-D avec des données synthétiques.

Les données synthétiques de résistivité apparente obtenues par modélisation sont rétroprojetées à l'aide des programmes 2-D et 3-D de rétroprojection afin de produire les sections vraies de résistivité $\rho(x,z)$ ou $\rho(x,y,z)$ selon le cas. Un logiciel de visualisation permet d'obtenir l'image des sections de résistivité ainsi acquises.

3.5.1 Reconstruction d'image 2-D avec des données synthétiques

L'habileté du programme de rétroprojection 2-D à déterminer la résistivité d'une structure a été évaluée par des simulations basées sur des modèles simples: deux couches horizontales, un contact vertical entre deux milieux, un dyke mince et une petite hétérogénéité superficielle. Une série de tests a été également réalisée sur des modèles où un corps (inhomogénéité) est placé dans un milieu encaissant. Des configurations de 11 et 21 électrodes ont été utilisées pour les mesures.

3.5.1.1 Définition du modèle 2-D pour la réconstruction d'image.

Le domaine des cellules de résistivité représentant le sous-sol est borné par des limites horizontales et verticales. Soit D la distance entre les cellules extrêmes (situées au-delà des électrodes les plus lointaines) et les cellules sur lesquelles sont plantées les électrodes les plus lointaines. Si E est l'espacement entre les électrodes, l'extension du domaine de discrétisation dans la direction x est limitéé à D = E. À cette distance, les cellules extrêmes indiquent une valeur de sensibilité (en valeur absolue) d'environ 1/5 fois plus petite que celles sur lesquelles sont plantées les électrodes les plus lointaines. Pour une configuration pôle-pôle de N électrodes, si L est la distance entre deux électrodes les plus

extrèmes, la profondeur maximale d'investigation est obtenue par la relation: Z(max) = .35L (Roy et Apparao, 1971). L'extention du domaine de discrétisation dans la direction de z a été approximativement prise 2 fois la profondeur d'investigation.

3.5.1.2 Résultats des modèles

Pour la recontruction des images des modèles ci-dessous, des cellules de 15x10 (x, z) de taille $\Delta x = \Delta z = 1$ unité et une configuration linéaire de 11 électrodes ayant une séparation L = 1 unité entre elles ont été utilisées. La **figure 3.8** donne une illustration des modèles dont les images ont été reconstruites.

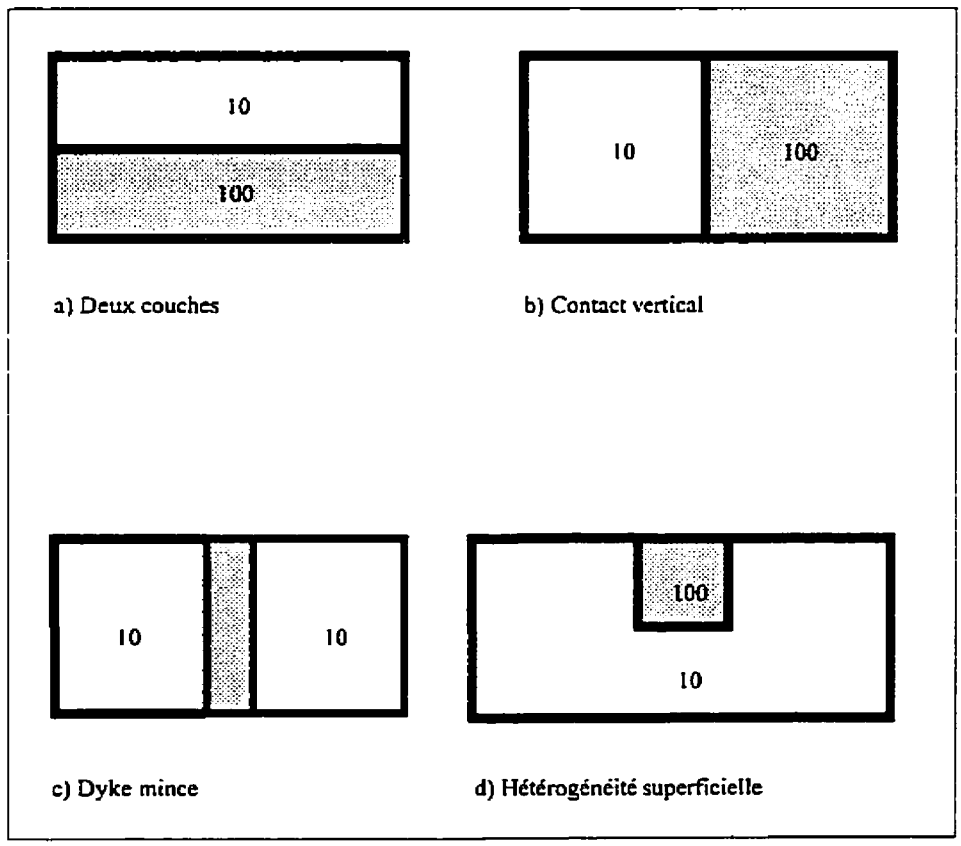


Figure 3.8. Modèles de structures simples pour les tests de simulation.

a) Deux couches horizontales

Dans ce modèle, la résistivité de la couche supérieure est fixée à 10 Ωm et son épaisseur à 2 unités. Une résistivité de 100 Ωm a été assignée à la couche sous-jacente. Les résultats de la reconstruction d'image sont présentés sur les **figure 3.9a** (option linéaire) et **3.9b** (option aire égale) On remarque que les valeurs de la résistivité sont plus faibles jusqu'à la limite inférieure de la première couche ayant 2 unités d'épaisseur, puis augmentent graduellement en profondeur où se situe la couche de plus forte résistivité. L'image produite à la suite de la rétroprojection des données de résistivité apparente est assez conforme à la géométrie du modèle initial. On remarque cependant, que les résistivités obtenues ne reflètent pas celle des structures modélisées. Par ailleurs, l'interface couche conductrice et résistante dans les deux cas n'est pas horizontal, mais est caractérisé par une courbure qui se démarque à une profondeur d'environ 3 unités. En considérant un profil de mesure plus étendu, on pourrait pu obtenir un interface horizontal. Ce test montre clairement, ce sera d'ailleurs le cas de tous les autres tests, que la méthode reconstruit de manière satisfaisante la géométrie des structures modélisées ainsi que les zones de fortes ou de faibles résistivités, mais ne permet pas de restituer les résistivités qui les caractérisent.

b) Contact vertical entre deux milieux.

Ce modèle est constitué de deux milieux ayant un contact vertical. L'un est conducteur avec une résistivité de 10 Ωm et l'autre résistant avec une résistivité de 100 Ωm. La **figure 3.10** présente les résultats obtenus à la suite de la rétroprojection. A gauche du zéro, on remarque la présence d'une zone de plus faible résistivité correspondant à l'image de la couche de 10 Ωm. À la droite, c'est une zone de résistivité plus élevée qui reflète l'image du milieu résistant. À l'aplomb du zéro, on constate la présence d'une zone intermédiaire de résistivité moyenne qui caractérise l'interface entre les deux couches.

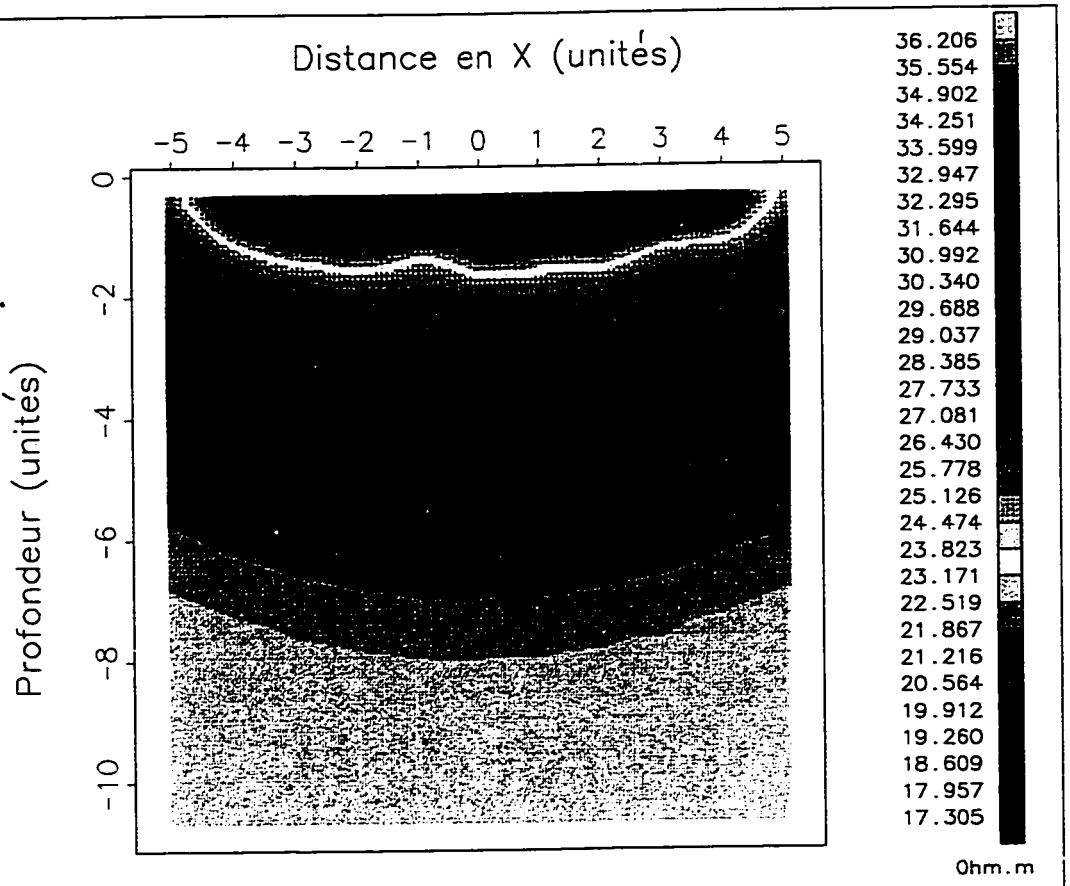


Figure 3.9a: Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de 2 couches horizontales. La résistivité de la couche supérieure est de 10 ohm.m celle de la couche inférieure est de 100 ohm.m (option linéaire).

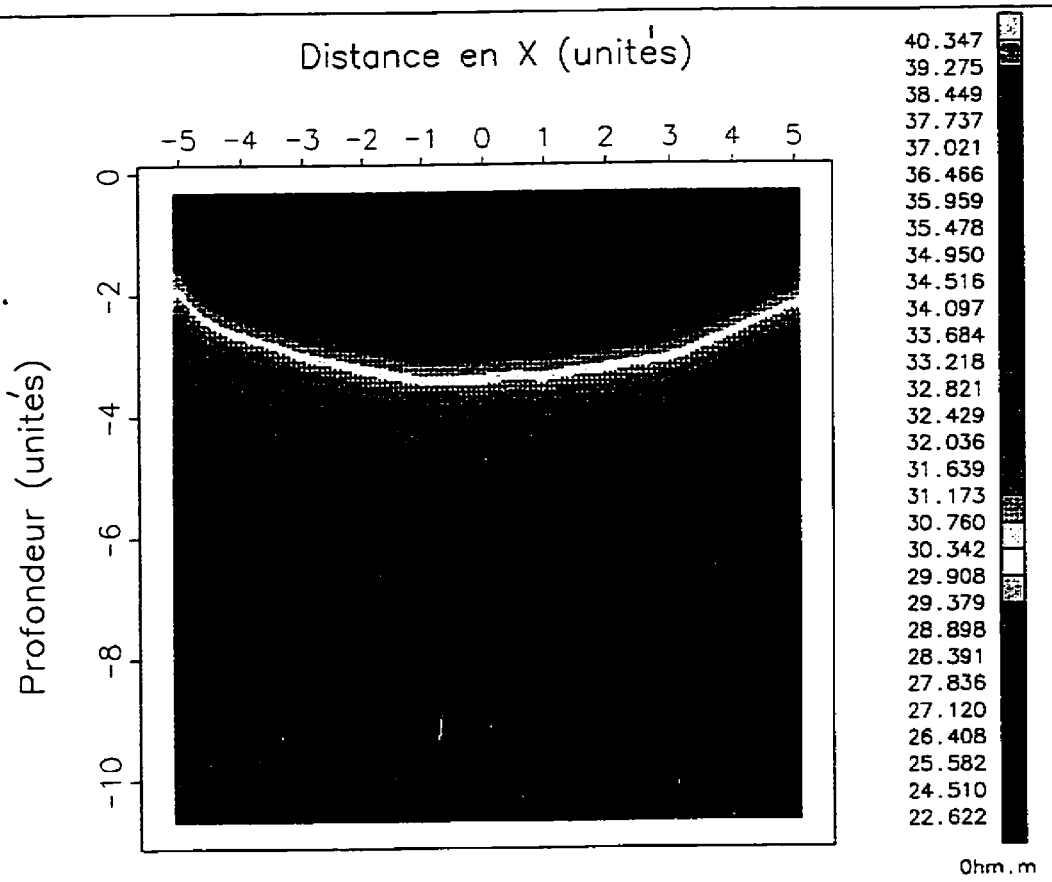


Figure 3.9b: Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de 2 couches horizontales. La résistivité de la couche supérieure est de 10 ohm.m celle de la couche inférieure est de 100 ohm.m (option aire égale).

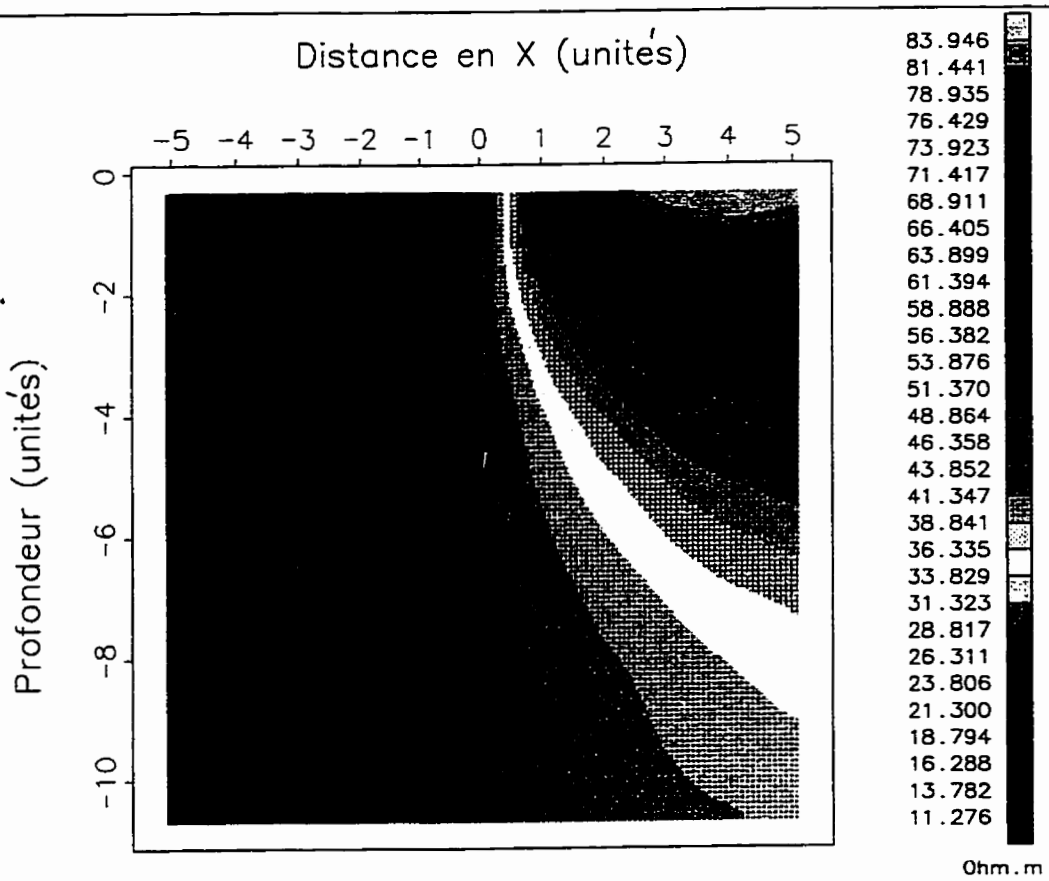


Figure 3.10: Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué de deux milieux ayant un contact vertical. La résistivité de chacun des milieux est définie à la figure 3.8b (option linéaire).

c) Dyke mince

Ce modèle est formé d'un milieu homogène de résistivité 10 Ωm recoupé par un dyke de résistivité 100 Ωm, de largeur 4 unités, de hauteur 50 unités affleurant à la surface. L'image produite à la suite de la rétroprojection des données de résistivité se trouve sur la **figure 3.11** Les résultats montrent nettement l'extension latérale du dyke. En ce qui concerne la démarcation inférieure du dyke, elle se limite seulement à 2 unités de profondeur suite à une restitution verticale réduite. Cela est attribuable à la limitation de la profondeur d'investigation maximale qu'on peut atteindre avec la configuration d'électrodes utilisée. En effet, pour une configuration de N électrodes avec un espacement de L unité entre elles, la profondeur maximale d'investigation correspondant à la séparation entre les deux électrodes extrêmes est Zmax= 0.35L dans le cas d'un milieu homogène (Roy et Apparao, 1971). Ainsi pour la configuration de 11 électrodes avec une séparation de L=1 unité, Zmax=0.35*10 = 3.5 unités. Dans le cas d'un milieu hétérogène Zmax pourrait être inférieure à la valeur indiquée. En se basant sur la formule précédente la borne inférieure de z=2 unités de profondeur de l'image du dyke semble être alors raisonnable. Le milieu de 10 Ωm de part et d'autre du dyke ressort avec une image ayant une résistivité plus élevée que celle initialement modélisée. Cela est dû peut être à l'influence de la forte résistivité du dyke qui a tendance à rehausser la résistivité de ce dernier. La zone de couleur rose est caractérisée par une forte résistivité qui reflète l'emplacement du dyke. On remarque néanmoins que la valeur moyenne de 12 Ωm attribuable à cette zone reste bien en dessous de 100 Ωm préalablement fixé pour modéliser la résistivité du dyke. Ce phénomène peut être probablement considéré comme étant une des limitations de la méthode due à l'inhérente approximation de Born. D'autres techniques de mesure de résistivité apparente pourraient se montrer plus efficaces en ce qui concerne une hausse significative de l'amplitude de la résistivité du corps. A titre d'exemple on peut citer l'étude de *Jorge O. Parra et Thomas E. Owen* (1981) intitulée: « résistivité focalisée

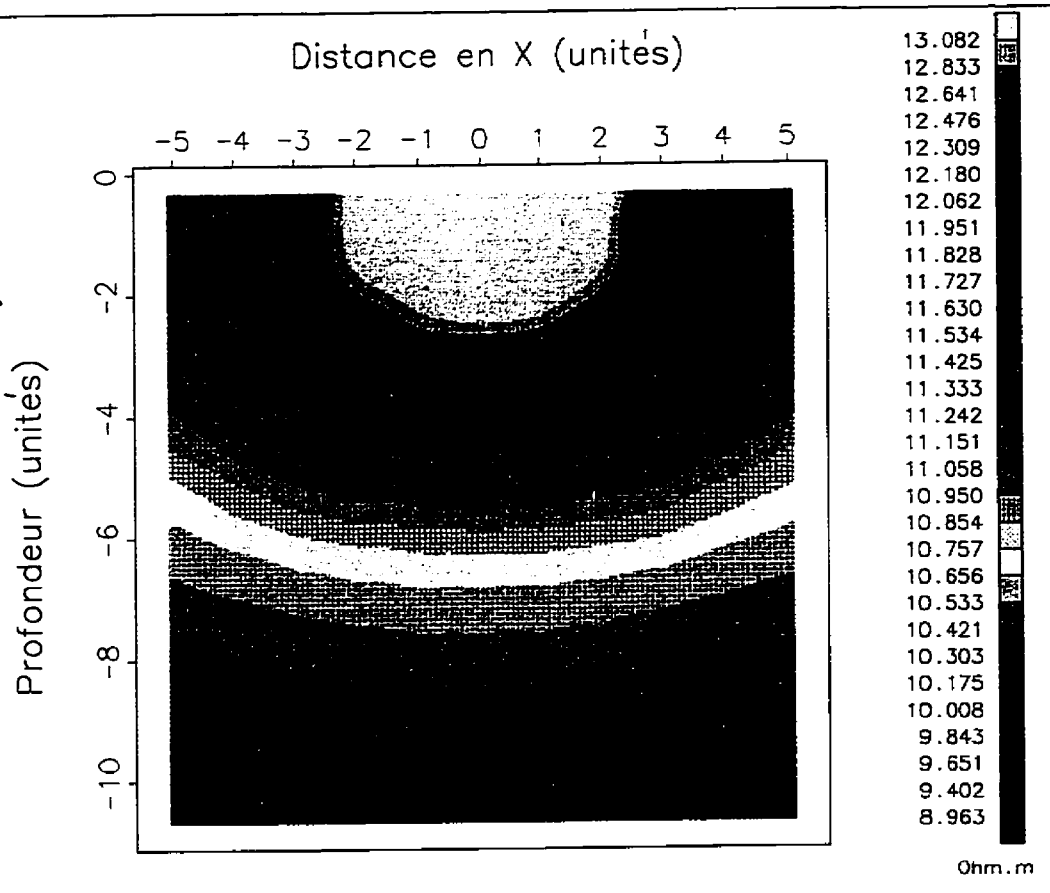


Figure 3.11: Reconstruction 2-D de la section de résistivité d'un modèle constitué d'un mur vertical ou dyke. La résistivité du dyke et celle de son milieu environnant sont définies à la figure 3.8c (option aire égale).

synthétiquement pour détecter des corps profonds ». La recherche faite par *P.D. Jackson* (1981) et intitulée: « configurations de résistivité électrique focalisée: quelques expériences théoriques et pratiques » entre également dans le cadre d'une technique de mesure qui pourrait accroître la signature de l'amplitude du milieu anomal.

d) Hétérogénéité carrée superficielle.

Un petit corps superficiel de géométrie a=b=4 unités et de résistivité 100 Ωm est placé dans un milieu homogène de 10 Ωm. **La figure 3.12** montre les résultats de ce test. On remarque que l'image obtenue par la rétroprojection concorde bien avec les caractéristique du modèle. Le corps se situe dans la zone où la résistivité est maximale (couleurs rose), tandis que son milieu environnant est représenté par une zone de plus faibles valeurs de résistivité. Le contraste de résistivité de l'image du corps et de son milieu hôte demeure cependant faible; cela est le résultat de la limitation de la méthode comme évoquée précédemment.

e) Corps résistant dans un milieu homogène.

Une grille rectangulaire de 46x34 (1564) noeuds a été utilisée pour la simulation de ce modèle. Un corps de (a=b=4 unités) de résistivité 100 Ωm et dont le toit se trouve à 2 unités de profondeur est placé dans un milieu homogène de résistivité 10 Ωm (**figure 3.13**). La partie de la grille où se situe le corps a été finement discrétisée afin d'obtenir une meilleure restitution de l'image. Une configuration de 11 électrodes avec un espacement L=1 unité entre elles a servi pour les mesures. Les **figures 3.14a** (option linéaire), **3.14b** (option log-linéaire) et **3.14c** (option aire égale) montrent chacune une zone de résistivité maximale (couleur rose-claire) pour les deux premières et (couleur rose) pour la troisième. Le centre de cette zone se situant à 2 unités de profondeur correspond au toit du corps dans le cas de la figure 3.14c. Dans le cas de la figure 3.14a et 3.14b, le centre de la zone de résistivité maximale se trouve plus bas que la profondeur z = 2 unités. Quant aux limites latérales, gauche et droite, du corps

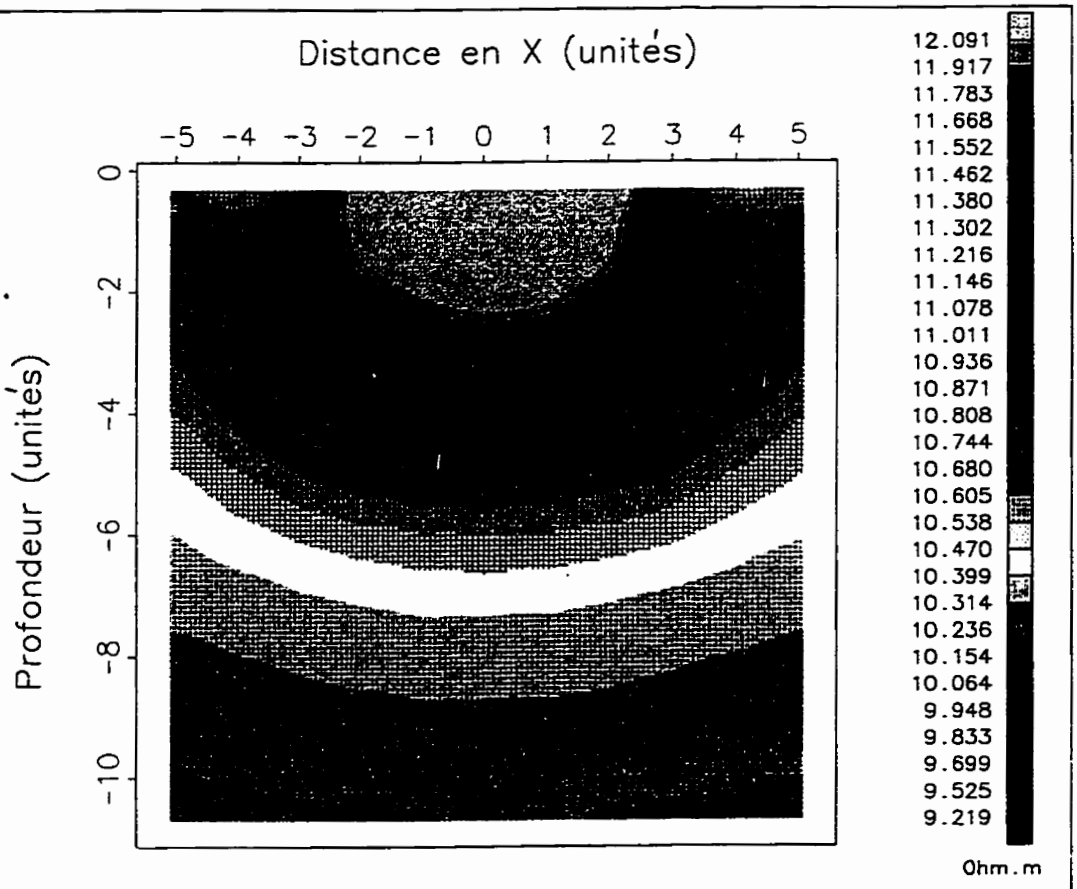


Figure 3.12: Reconstruction 2-D de la section de résistivité pour un modèle constitué d'un milieu (10 ohm.m) dans lequel se trouve une petite hétérogénéité superficielle de 100 ohm.m (figure 3.8d); (option aire égale).

elles sont assez bien définies par rapport au modèle initial. On constate une diminution progressive de la résistivité au-dessous du corps, tandis que sur les côtés la résistivité converge vers celle du milieu encaissant.

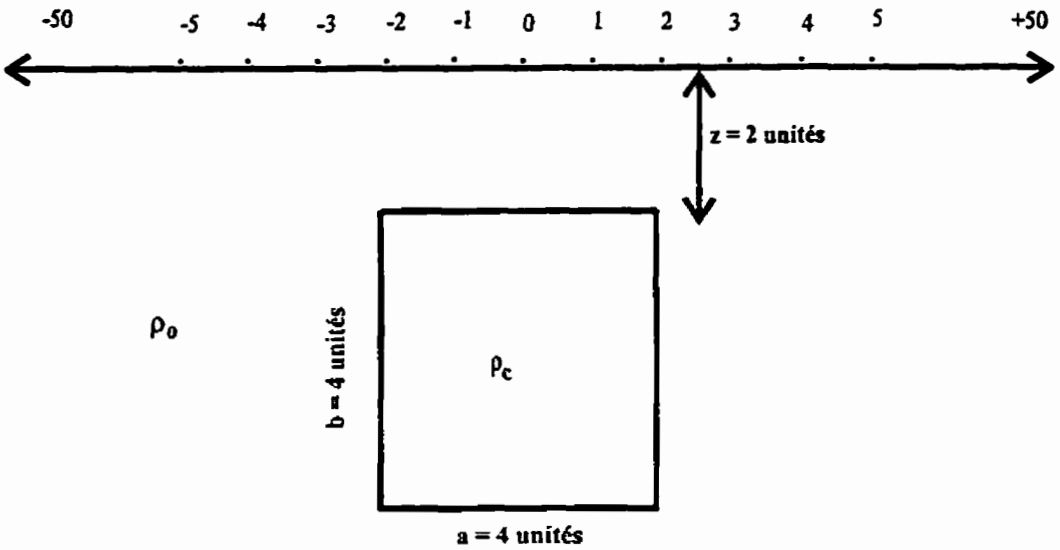


Figure 3.13. Schéma illustratif des paramètres du modèle de simulation avec le logiciel RESIS2D1 de l'University of British Columbia (UBC) dans le cas d'un corps placé dans un milieu homogène.

3.5.1.3 Influences des paramètres du modèle sur la reconstruction d'image.

a) Discrétisation du modèle de simulation pour obtenir les résultats ρ_a.

Pour mettre en évidence l'effet de la discrétisation sur les résultats obtenus, une grille rectangulaire de 50x50 (2500) noeuds a été choisie au lieu de 46x34 (1564) noeuds comme précédemment. Tous les autres paramètres sont restés identiques à ceux du modèle précédent. Les résultats obtenus (figure 3.15) avec le nouveau modèle sont comparables à

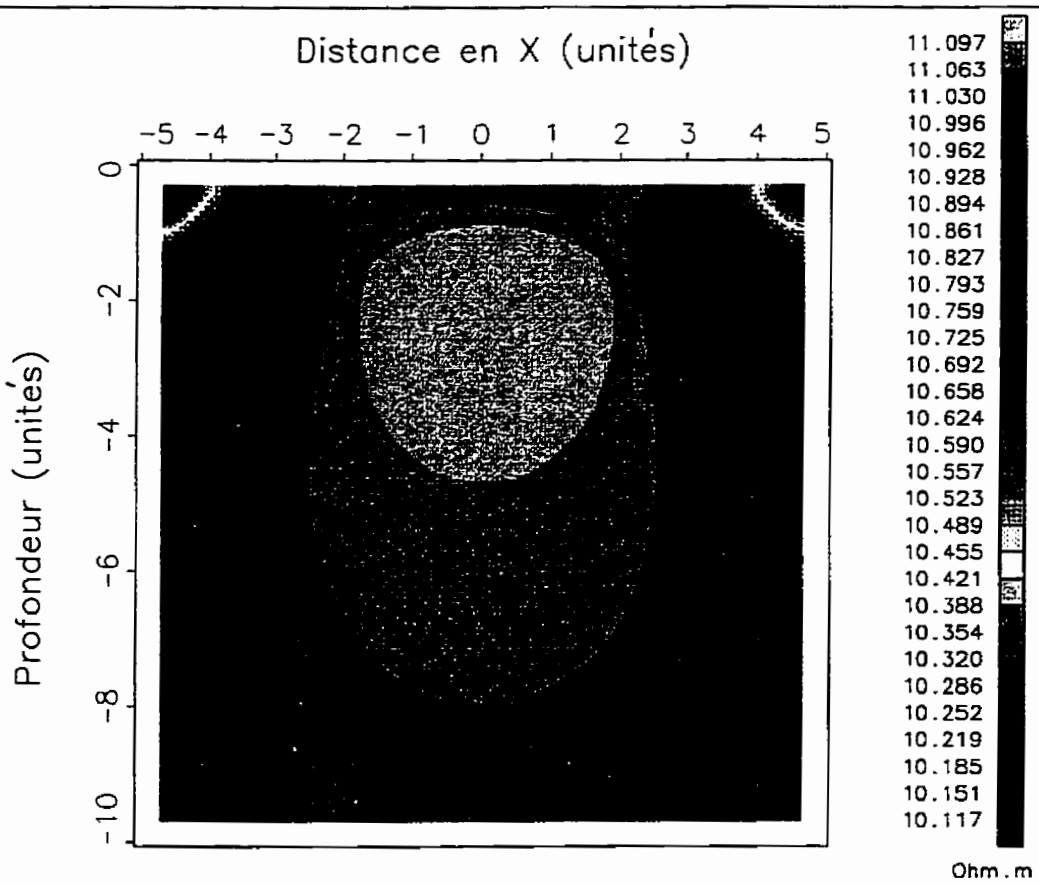


Figure 3.14a: Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m . La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question (option linéaire).

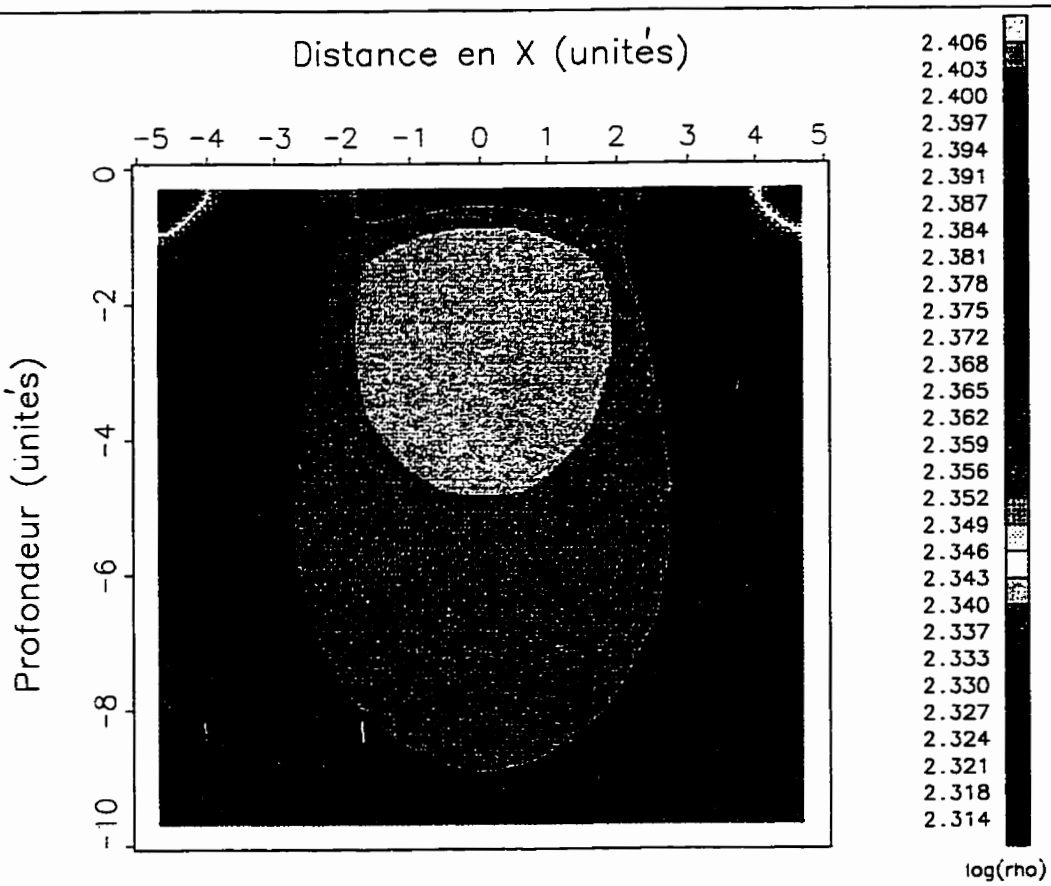


Figure 3.14b: Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m .La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question (option log-linéaire).

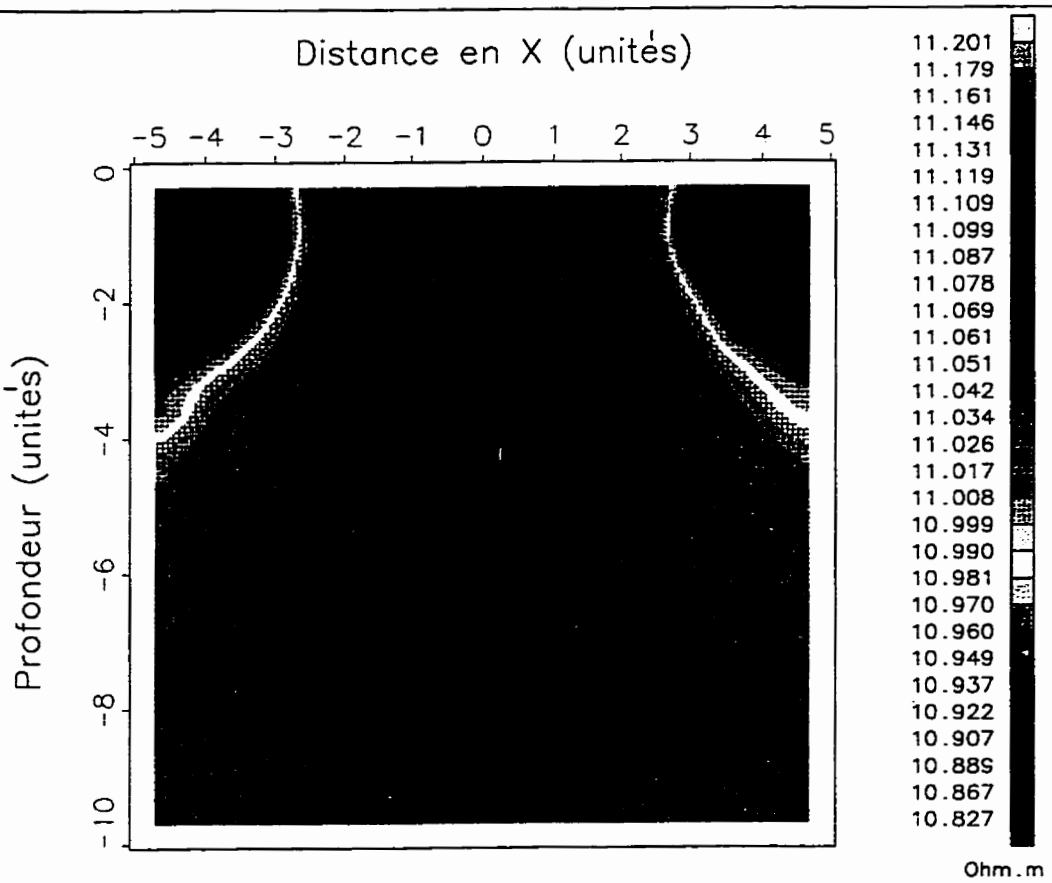


Figure 3.14c: Image 2-D d'un corps de 100 ohm.m, dans un milieu homogène de résistivité 10 ohm.m . La figure 3.13 donne un schéma illustratif des paramètres du modèle en question (option aire égale).

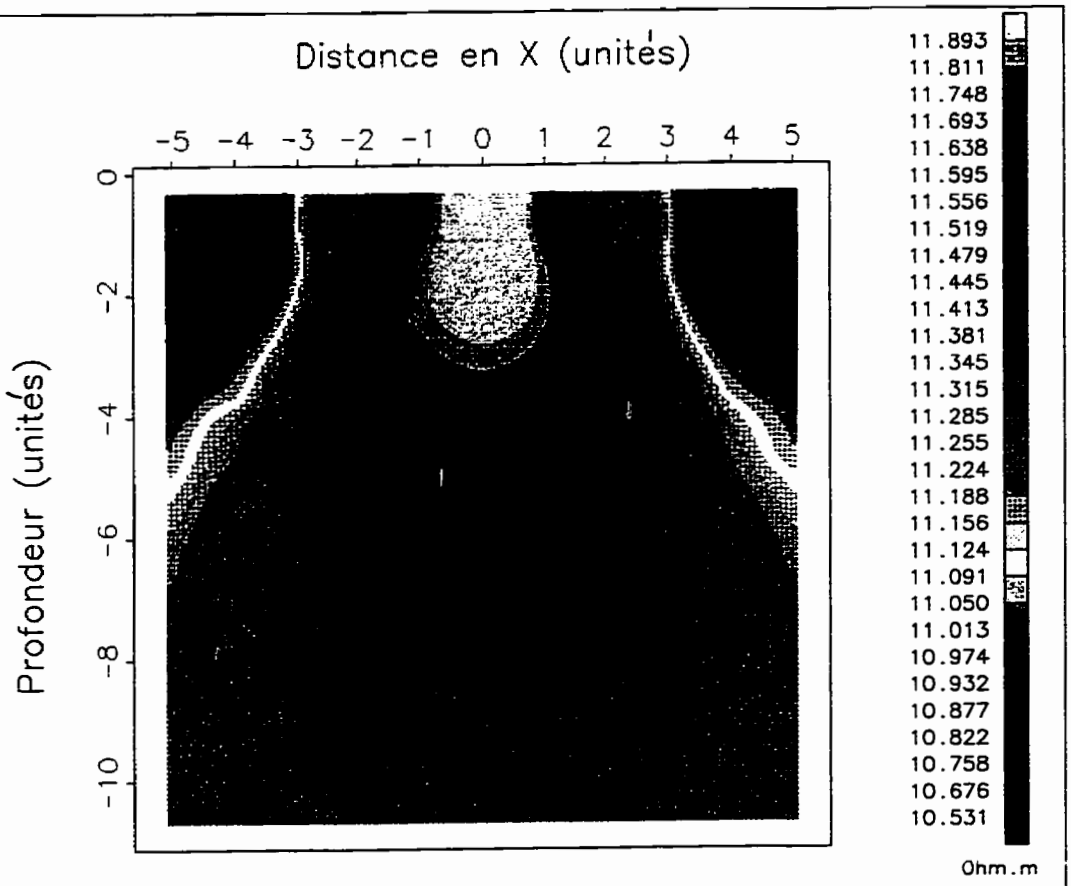


Figure 3.15: Image 2-D mettant en évidence l'effet de la discrétisation de la grille pour obtenir les résultats des résistivités apparentes. On remarque une distorsion de l'image due à la couche superficielle. (option aire égale).

ceux présentés dans la figure 3.14c, mais on remarque que l'image du corps n'est pas bien cernée sur la figure 3.15. De plus on constate une certaine distorsion vers les côtés supérieurs. L'effet de la couche de surface pourrait être à l'origine de cette distorsion. Le toit du corps est placé à 2 unités de profondeur, son extension latérale se situe au voisinage de x=-2 et x=+2 unités. Quant à la borne inférieure du corps, elle reste incertaine. On note une hausse de la résistivité du milieu hôte aux environs du corps. Cependant les zones du milieu encaissant éloignées des bordures supérieures du corps se caractérisent par une résistivité qui est comparable à celle du modèle de départ (10 Ωm).

b) Contraste de résistivité

Afin d'analyser l'influence du contraste de résistivité entre le corps et son milieu encaissant sur les réponses de la reconstruction, une série de simulations a été effectuée en maintenant fixe la résistivité du milieu hôte et en faisant varier celle du corps. Pour ces tests le modèle utilisé est une grille de 46x34 (1564) noeuds; le corps de dimensions a=b=4 unités est placé à une profondeur de 2 unités dans un milieu de résistivité 100 Ωm. Une configuration de 11 électrodes avec un espacement de L=1 unité a été adoptée pour les mesures. Les résultats pour trois différents contrastes de résistivité (ρ_1/ρ_2 =10/100 et ρ_1/ρ_2 =1000/100) sont présentés sur les **figures 3.16 et 3.17** respectivement.

Pour le contraste ρ_1/ρ_2 =10/100 (corps conducteur dans un milieu résistant) figure 3.16, on remarque une zone de plus faible résistivité (couleur vert-foncée) au voisinage de la surface dont l'extension latérale coïncide presque avec les limites x=-2 et x=+2 unités; mais sa limite inférieure s'étend seulement à z=2 unités. Cette zone correspondrait cependant à l'image du corps, seulement qu'elle semble avoir été déplacée vers la surface. Les deux petites zones vert-foncées aux extrémités supérieures gauche et droite sont des artefacts dus vraisemblablement par l'effet de la couche de surface. On remarque une hausse graduelle de la résistivité à partir de z=2 unités vers les zones plus profondes. Cela

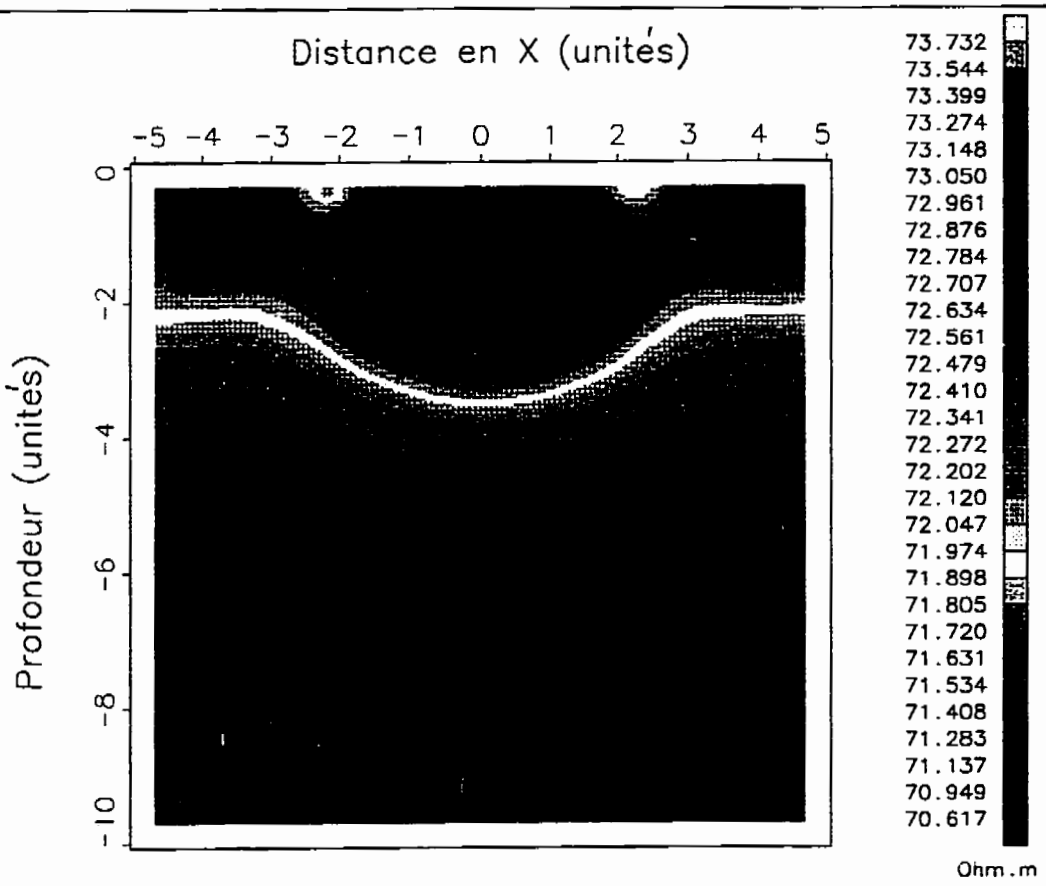


Figure 3.16: Image 2-D d'un modèle dans lequel le contraste de résistivité est rho1/rho2 = 10/100; rho1 étant la résistivité du corps et rho2 celle de son milieu environnant (option aire égale).

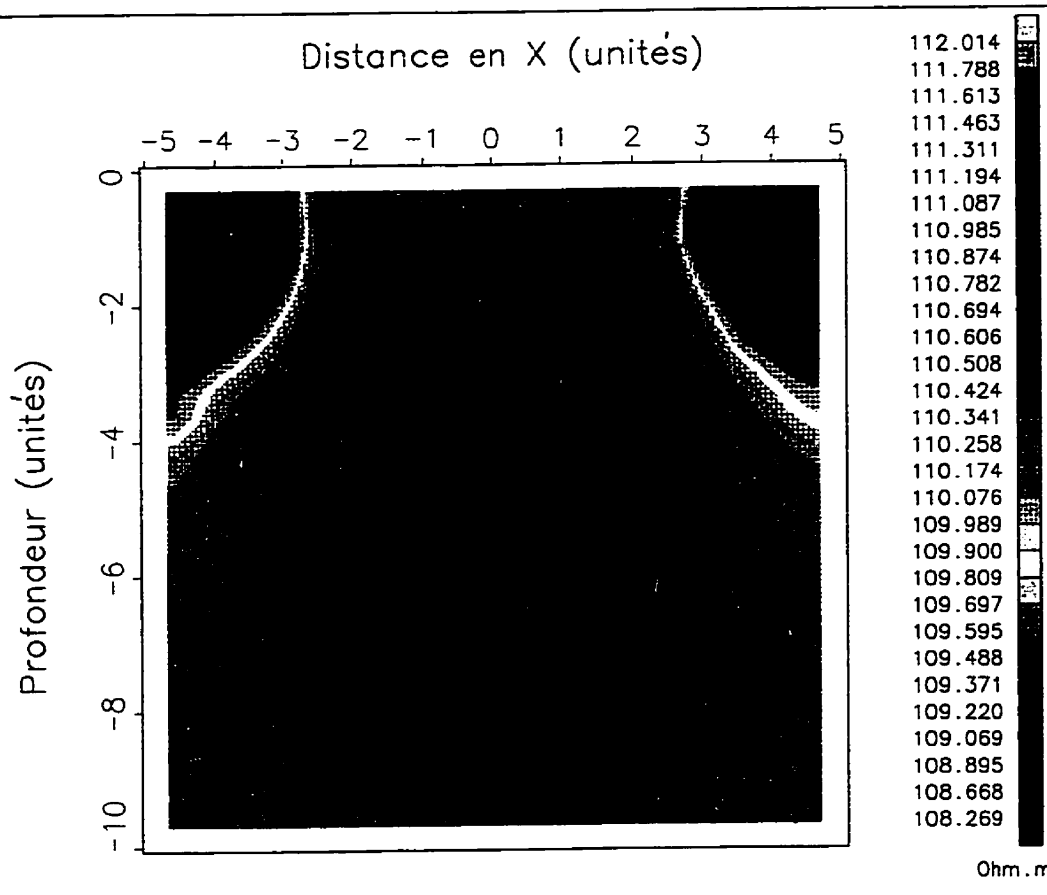


Figure 3.17: Image 2-D d'un modèle dans lequel le contraste de résistivité est rho1/rho2 =1000/100; rho1 étant la résistivité du corps et rho2 celle de son milieu environnant (option aire égale).

prouve l'effet de la présence du milieu résistant dans lequel le corps est plongé. L'échelle des résistivités montre des valeurs plutôt proches de celle du milieu hôte. Tout ce passe comme si la présence du corps de 10 Ωm tendrait à diminuer la résistivité du milieu encaissant.

L'analyse des résultats de la figure 3.17 pour un contraste de résistivité ρ_1/ρ_2 =1000/100 donne des caractéristiques similaires au cas précédent du point de vue localisation spatiale de l'image du corps. L'échelle des résistivités fait ressortir des valeurs au-dessus de 100 Ωm (résistivité du milieu) mais visiblement inférieures à la valeur assignée au corps (1000 Ωm). En définitive on peut dire en ce basant sur les résultats de ces tests que la restitution de l'image est bien influencée par le contraste de résistivité entre le corps et son milieu environnant.

c) Espacement entre les électrodes

Deux tests ont été réalisées pour mettre en évidence l'effet de l'espacement entre les électrodes de mesure. Pour se faire, deux modèles ont été utilisés dans lesquels tous les paramètres sont identiques, sauf l'espacement (L) entre les électrodes. Les modèles envisagés sont constitués d'une grille de 46x34 (1564) noeuds. La profondeur du corps est fixée à z=2 unités et sa résistivité à 100 Ωm et celle du milieu hôte à 10 Ωm.

La **figure 3.18** renferme les résultats pour une configuration de 11 électrodes distantes les unes des autres de L=1 unité. Il en ressort de ce modèle que l'image obtenue suite à la rétroprojection des données de résistivité est conforme aux caractéristiques du corps en ce qui concerne sa localisation spatiale. Les limites horizontales et le toit du corps sont bien identifiés. Mais quant à la limite verticale inférieure, elle reste moins évidente à situer.

Les résultats pour une configuration de 11 électrodes équidistantes de L=2 unités sont présentés dans la **figure 3.19.** On constate que l'extension latérale de l'image du corps est

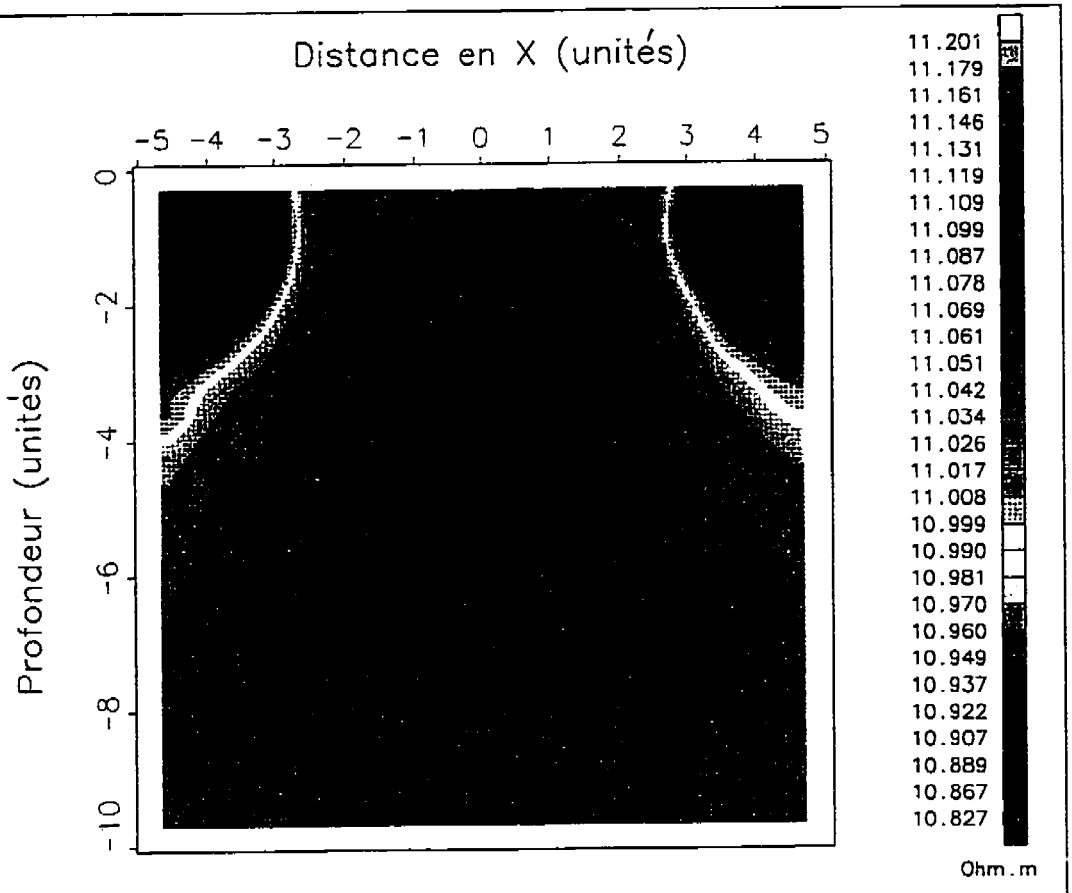


Figure 3.18: Illustration de l'effet de l'espacement entre les électrodes: image 2-D pour L = 1 unité. (option aire égale).

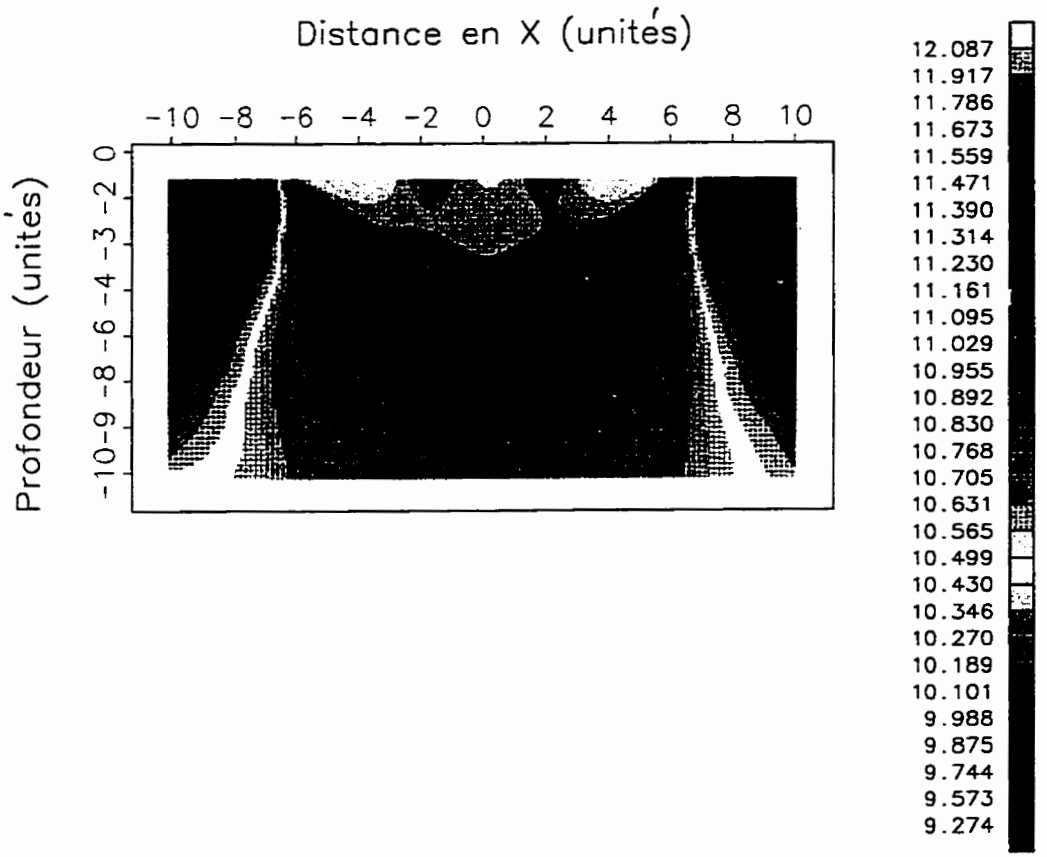


Figure 3.19: Illustration de l'effet de l'espacement entre les électrodes: image 2-D pour L = 2 unités (option aire égale).

plus large (x=-6 à x=+6 unités) par rapport à celle de la figure 3.18. La géométrie de l'image du corps ne coïncide pas de manière satisfaisante à celle du modèle de départ. Ces constatations nous mènent à dire que l'espacement (L=2 unités) s'avère inadéquat par rapport à la géométrie et la profondeur du corps, ce qui fait que l'image obtenue est plus difficile à interpréter du point de vue localisation.

d) Profondeur du corps par rapport à la séparation d'électrode

Deux tests différents ont été réalisés afin d'étudier l'effet de la profondeur du corps par rapport à la séparation des électrodes. Deux modèles ont été simulés dans lesquels la géométrie du corps, sa résistivité (100 Ωm) et celle de son milieu environnant (10 Ωm) sont identiques. Ils diffèrent l'une de l'autre seulement par la séparation utilisée entre les électrodes de mesure. Pour le premier modèle, on utilise une séparation d'électrode de L=1 unité et le corps de dimensions a=b=4 unités se situe à z=8 unités de profondeur.

Les résultats obtenus sont présentés dans la **figure 3.20.** L'image produite à la suite de la rétroprojection ne s'accorde guère à la réponse attendue du modèle. Le corps étant situé à un niveau plus bas que la profondeur d'investigation qui pouvait être atteinte par cette configuration, il est évident que l'image du corps est soit quasiment absente soit mal reconstruite.

Dans le cas du second modèle où les mesures ont été faites avec en prenant L=4 unités et en plaçant le corps à z=8 unités de profondeur (**figure 3.21**), la reconstruction montre l'image du corps dont le toit à z=8 unités et dont les limites gauche et droite correspondent à celles du modèle initial. La limite inférieure de l'image du corps reste cependant plus difficile à déterminer.

Ces deux modèles ont permis de mettre en relief l'importance du choix de la séparation entre les électrodes par rapport à la profondeur du corps. En effet la détectabilité est influencée par la distance entre l'électrode émettrice et l'électrode réceptrice, par

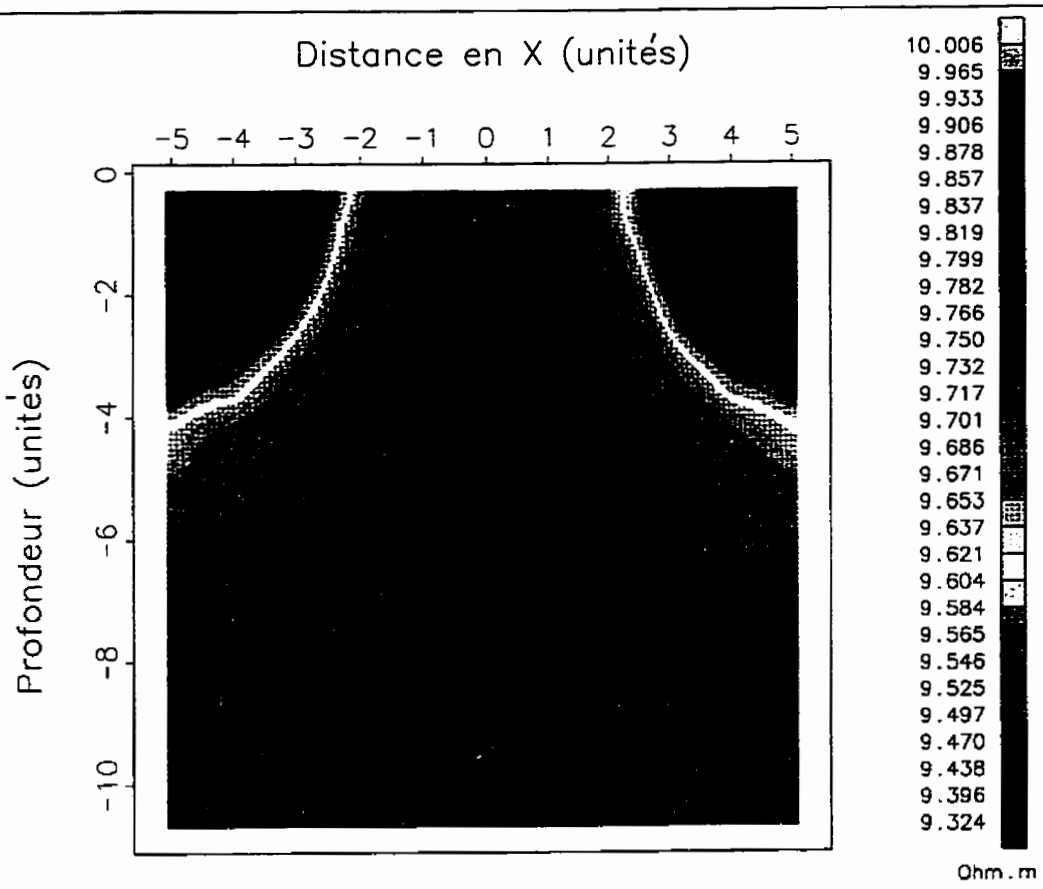


Figure 3.20 Illustration de l'effet de la profondeur du corps par rapport a la séparation d'électrode: image 2-D pour la séparation d'électrode L=1 unité et la profondeur du corps est z= 8 unités. (option aire égale).

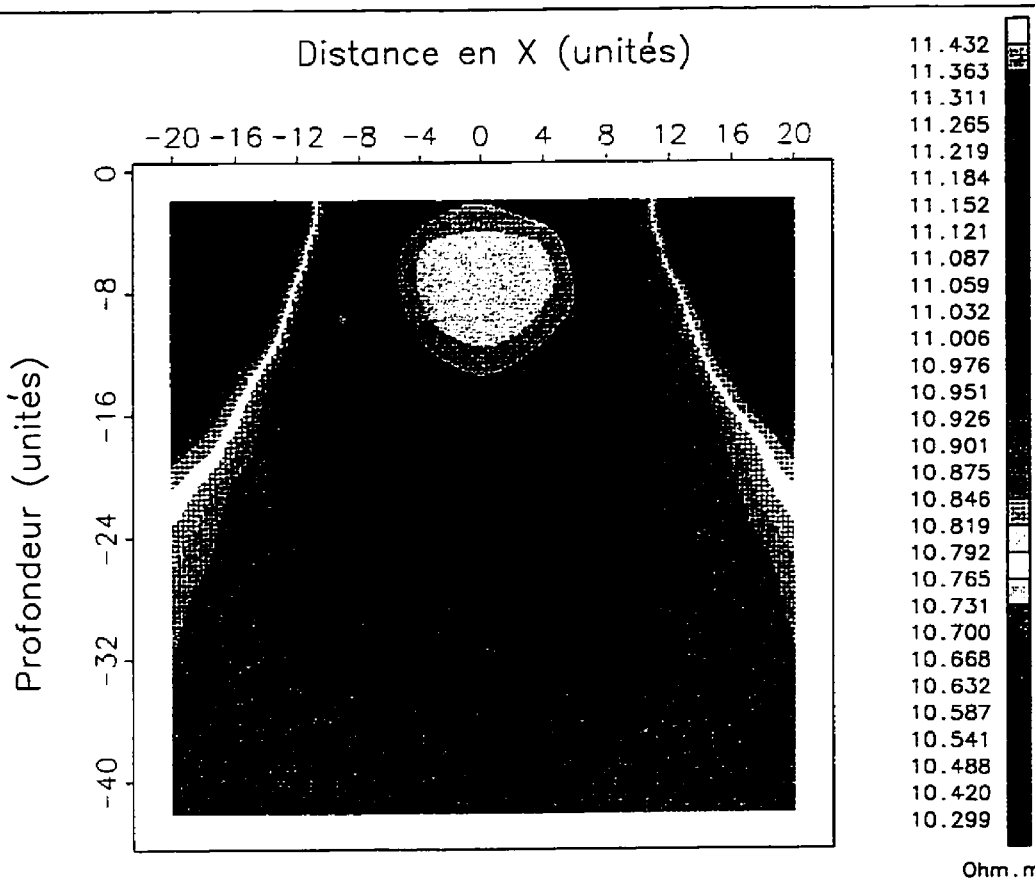


Figure 3.21: Illustration de l'effet de la profondeur du corps par rapport à la séparation d'électrode: image 2-D pour une séparation d'électrode L = 4 unités et la profondeur du corps est z = 8 unités. (option aire égale).

conséquent par la géométrie relative entre celles-ci. Cette distance détermine finalement la profondeur d'investigation. Dans le cas d'un choix inadéquat (comme dans l'exemple du premier modèle), les résultats de la reconstruction seront conséquemment affectés.

e) Longueur du dispositif de mesure

Dans le but de tester l'effet de la longueur du dispositif sur la réponse du corps, deux configurations différentes ayant respectivement 11 et 21 électrodes ont été crées. Pour chacune de ces configurations l'espacement entre les électrodes est fixé à L=1 unité. Le corps de résistivité 100 Ωm et de géométrie a=b=4 unités est placé à z=2 unités de profondeur dans un milieu de résistivité 10 Ωm.

La **figure 3.22** contient les résultats obtenus pour la configuration de 11 électrodes. On note que l'image obtenue est conforme à ce qui a été initialement modélisé. Le toit du corps se trouve à z=2 unités de profondeur, ses extensions horizontales coïncident assez bien avec celles du modèle. Par ailleurs la frontière inférieure du corps est imprécise.

Dans le cas de la configuration de 21 électrodes **(figure 3.23)**, on constate que l'image est mieux restituée que dans le cas précédent. En effet et le toit et les dimensions latérales du corps reflètent assez bien la réponse du modèle. L'image ressort très clairement et sa délimitation est moins ambiguë que dans le cas de 11 électrodes. Dans le cas de 21 électrodes avec une séparation de L=1 unité la profondeur d'investigation atteinte est plus élevée et assure une meilleure couverture de la zone à investiguer que dans le cas de 21 électrodes. Ce sont ces deux faits qui pourraient expliquer l'obtention d'une restitution meilleure comparée à celle obtenue en considérant 11 électrodes en surface.

Ces deux exemples montrent combien il est primordial de bien choisir la longueur du dispositif par rapport à la profondeur du corps. On pourrait bien sûr prendre par exemple L=0.5 unité dans le cas de 21 électrodes afin d'obtenir la même longueur du dispositif comme dans le cas de 11 électrodes ayant une séparation de L=1 unité. Mais

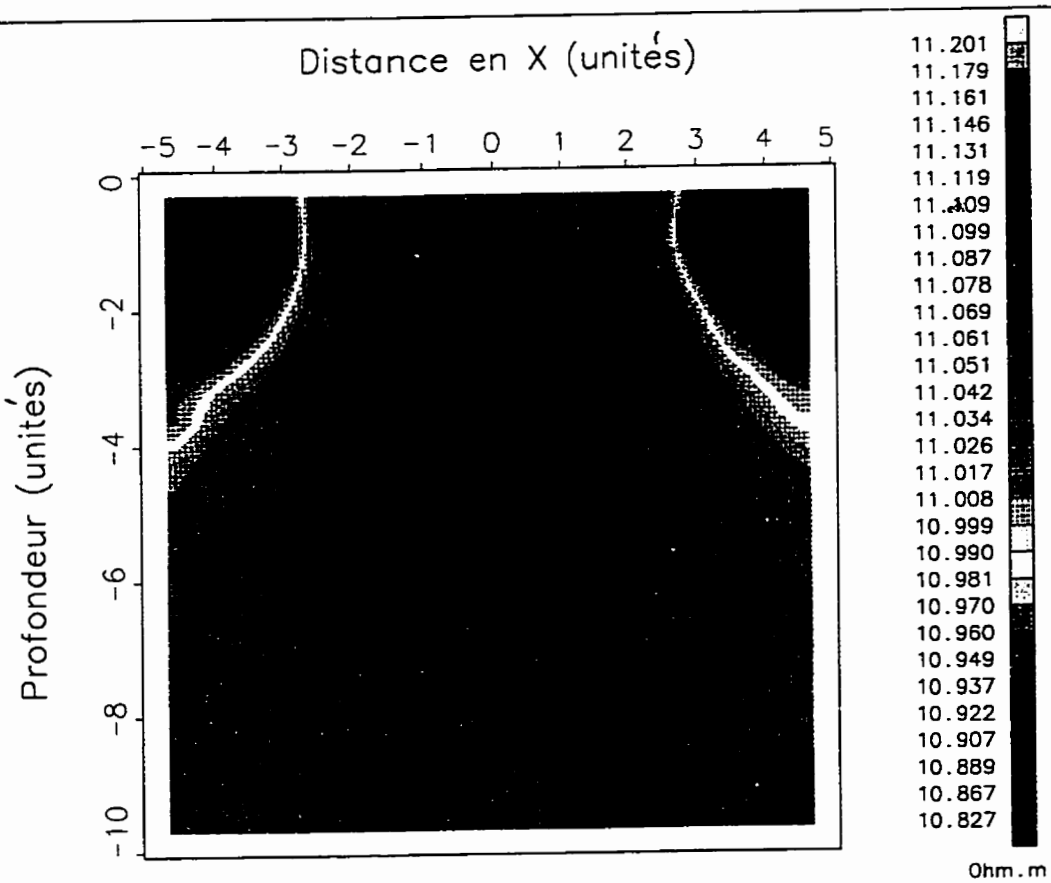


Figure 3.22: Illustration de l'effet de la longueur du dispositif de mesure: image 2-D pour un dispositif de mesure comprenant 11 électrodes. (option aire égale).

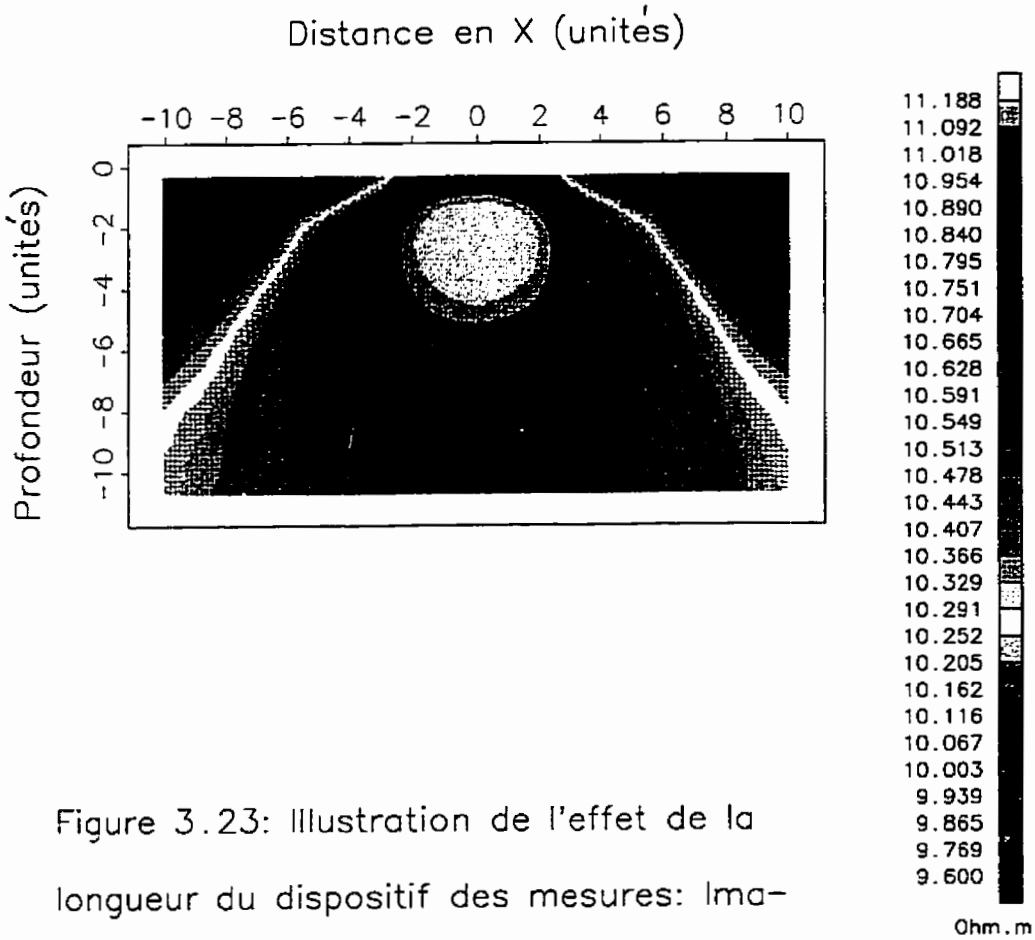


Figure 3.23: Illustration de l'effet de la longueur du dispositif des mesures: Ima- Imagerie 2-D pour une configuration de 21 électrodes (option aire égale).

cette façon de procéder ne permet pas non plus d'obtenir des résultats similaires aux cas de 11 électrodes compte tenu du grand nombre d'électrodes impliquées dans les mesures.

Pour illustrer le lien qui existe entre la longueur du dispositif et la profondeur du corps, on s'est servi de la configuration de 21 électrodes tout en prenant soin de placer le corps à une profondeur de z=6 unités. Les autres paramètres du modèle restant inchangés.

La reconstruction avec ce nouveau modèle donne une image (**figure 3.24**) qui fait apparaître le toit du corps à z=6 unités avec son extension latérale comprise entre x=-2 et x=+2 unités (couleur rose) conformément au modèle initial. Ce test met en évidence qu'il existe bien un lien étroit entre la profondeur du corps et la longueur du dispositif qu'il faut envisager afin d'obtenir une résolution acceptable.

Les résultats des essais sur des modèles synthétiques sont encourageants. L'efficacité de la technique de rétroprojection de reconstruire l'image des structures modélisées a pu être mise en évidence. La géométrie de l'hétérogénéité et les différentes zones conductrice et résistantes sont assez bien identifiées. Cependant, les résistivités obtenues montrent un contraste beaucoup moins élevés que ceux des modèles initiaux. Cela est dû à l'approximation de Born selon laquelle le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule est supposé constant. Malgré cette limitation de la méthode, elle demeure cependant un nouvel outil prometteur de définition de la géométrie du sous-sol. Pour rehausser les amplitudes des résistivités de l'hétérogénéité, d'autres techniques de traitement des données de résistivité apparente (ex. technique de mesure de résistivité focalisée synthétique) pourraient être appliquées.

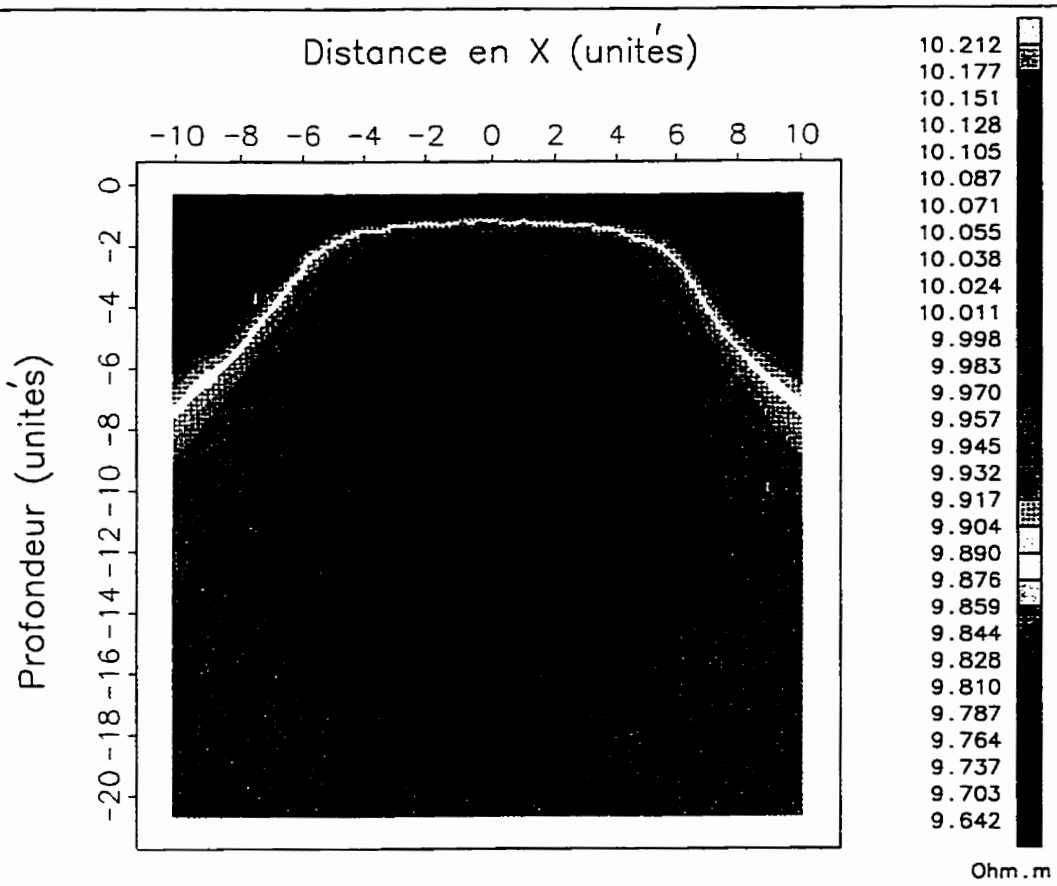


Figure 3.24: Illustration de l'effet de la longueur du dispositif de mesure par rapport à la profondeur du corps pour une configuration de 21 électrodes. Image 2-D pour un corps placé à z = 6 unités. (option aire égale).

3.5.2 Reconstruction d'image 3-D avec des données synthétiques

Dans cette partie du chapitre des tests ont été réalisés avec des données synthétiques puis réelles pour mettre en évidence la capacité du programme de rétroprojection (3-D) à produire l'image des sections de résistivité. Les données synthétiques sont obtenues par modélisation à l'aide du programme TOMOPPFMT. Plusieurs simulations ont été réalisées en considérant des modèles simples dont certains paramètres de ces modèles ont été soumis également à des tests afin de déterminer leur effet dans la reconstruction des images. La visualisation des sections de résistivité a été faite à l'aide du logiciel MATLAB version 4.2c.1.

3.5.2.1 Modèle synthétique pour générer des données de résistivité 3-D.

Pour estimer la performance de la technique d'imagerie de résistivité 3-D, un corps placé dans un milieu homogène a été simulé en considérant une grille de taille 21x21x15 avec un maillage équidistant de 10 unités pour chacune des dimensions x et y et z. Les deux premières maille pour les dimensions x et y ont une largeur de 60 et 30 unités, tandis qu'elle est de 30 et 60 unités pour les deux dernières mailles. Les deux dernières mailles pour la dimension z ont également une largeur de 30 et 60 unités respectivement. Une configuration pôle-pôle avec une grille de 5x5 (25) électrodes est utilisée pour les injections de courant et les mesures de potentiel.

3.5.2.2 Définition du domaine du modèle 3-D pour la reconstruction d'image.

La définition du domaine du modèle 3-D se fait de façon analogue à celle du cas bidimensionnelle compte tenue de la ressemblance des deux techniques. Le modèle 3-D est discrétisé avec des cellules de dimensions Δx, Δy et Δz (unités) définies selon le problème

qu'on veut resoudre et la qualité de résolution de l'image qu'on veut atteindre pour une structure donnée. Le choix du nombre de cellules et celui des électrodes dépend aussi de la résolution désirée pour un problème spécifique. Il est important de noter, que pour toutes les reconstructions 3-D faites dans ce paragraphe, la taille des cellules est fixée à $\Delta x=\Delta y=\Delta z=18$ unités. Cependant, une mention spéciale concernant la taille utilisée des cellules sera faite à chaque fois qu'un problème spécifique en ferait cas.

3.5.2.3a. Corps conducteur dans un milieu encaissant résistant et homogène.

Un corps conducteur de dimensions $\Delta x=\Delta y=70$ unités et $\Delta z=30$ unités est placé à une profondeur $z=30$ unités. En d'autres termes le corps se situe alors entre $z_1=30$ unités (toit du corps) et $z_2=60$ unités (base du corps). La résistivité du milieu encaissant est de $\rho_0=100\ \Omega m$, tandis que celle du corps est de $\rho_c=10\ \Omega m$. Le nombre d'électrode utilisé s'élève à 5x5=25. L'écartement entre les électrodes est fixée à L=40 unités. La **figure 3.25** (*modèle 1*) donne une vue en plan de la disposition des électrodes et de l'emplacement du corps conducteur. Dans une telle grille de mesure, chaque électrode est utilisée comme transmetteur et aussi comme récepteur. A chaque fois une électrode transmet le courant et les mesures de voltage sont faites aux électrodes restantes. On obtient ainsi 600 (25x24) lectures de potentiel à partir desquelles les résistivités apparentes qui serviront comme données d'entrée dans la technique d'imagerie. Pour la grille d'électrodes de 5x5 comme définie plus haut, il y a 600 cas possibles pour les mesures de potentiel. Ce nombre de cas possible se réduit à 300 mesures indépendantes si on tient compte de la réciprocité des mesures.

La **figure 3.26** représente la variation de la résistivité apparente pour les électrodes d'injection numéro **1** (électrode inférieure située à l'extrême gauche) et **13** (électrode centrale). Dans le cas de l'électrode numéro 1, les isocontours de résistivité montrent un minimum au-dessus de la position du corps conducteur. Cette zone de résistivité minimum n'est cependant pas centrée sur le corps, mais est plutôt translatée vers la position de

l'électrode d'injection numéro 1. Dans le cas de l'électrode d'injection numéro 13 (électrode centrale), la distribution de la résistivité apparente affiche un minimum au centre et aux environs des bordures du corps conducteur.

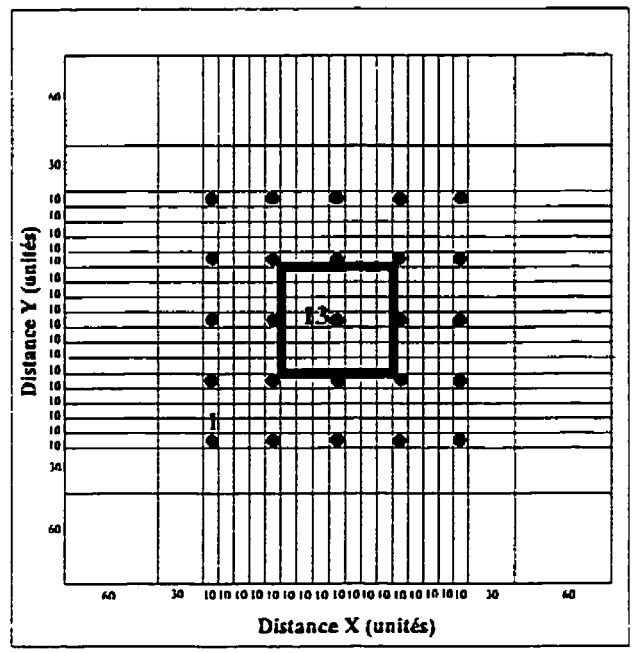


Figure 3.25: Grille de mesure illustrant la position des électrodes (points noirs) et celle du corps (rectangle centrale). La partie centrale du domaine de la grille est finement discrétisée.

La rétroprojection des données de résistivité obtenues à l'aide du modèle de la figure 3.25, a été effectuée en considérant une grille divisée en espace-cellules de 1 352

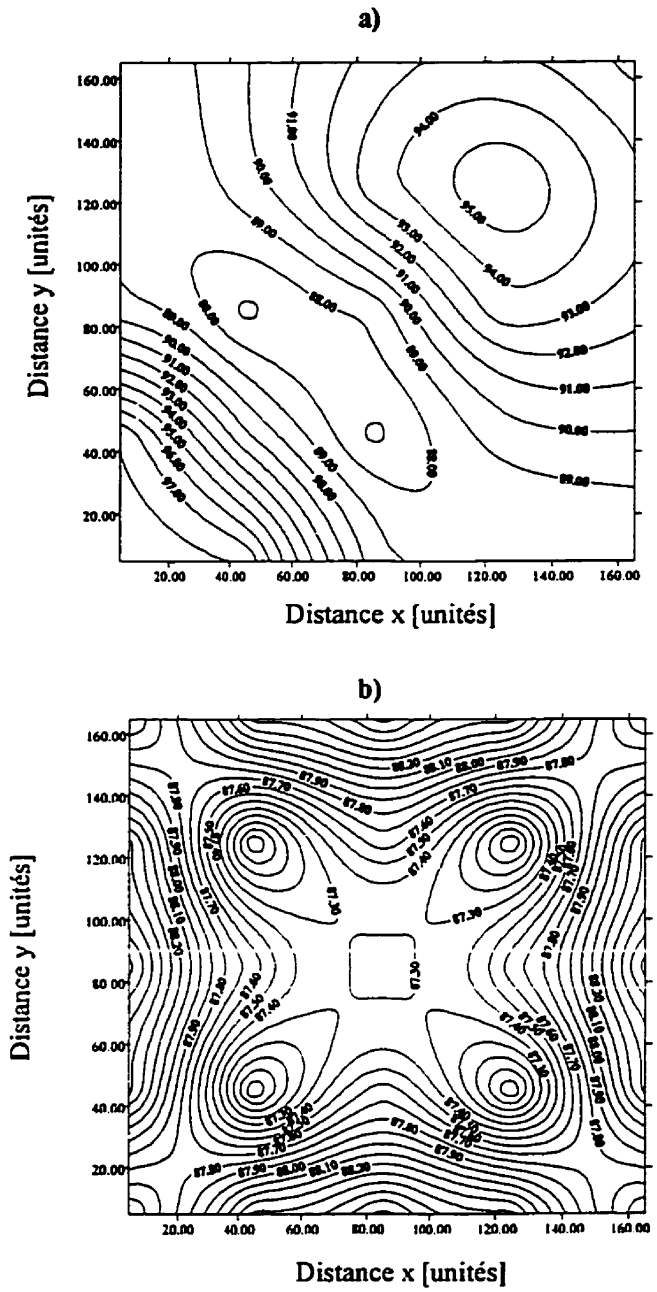


Figure 3.26: Distribution de la résistivité apparente pour les électrodes d'injection de courant No. 1 (a) et No. 13 (b). Il y a 5 électrodes aux positions 0.0, 40, 80, 120 et 160 unités en X et 5 électrodes aux mêmes positions en Y; ce qui fait une combinaison totale de 5x5=25 électrodes. L'électrode No.1 se trouve au point de coordonnées (0, 0) et l'électrode No.13 se trouve au point de coordonnées (80, 80).

(13*13*8) cellules, c'est à dire en plaçant 13 cellules dans les directions des axes x, y et 8 cellules dans la direction z. La taille de chaque cellule est de $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 18$ unités.

La **figure 3.27a** donne les résultats de la reconstruction du *modèle 1* pour la tranche z=9 unités. Cette tranche passe à une profondeur qui coïncide aux coordonnées z_i du milieu des cellules superficielles. On constate pour cette tranche, la présence d'artefacts dus à l'effet de la couche superficielle pour laquelle les cellules présentent des valeurs élevées de coefficient de sensibililité. Ces artefacts seront éliminés de l'image des reconstructions postérieures par l'utilisation, dans le processus de rétroprojection, des coefficients de sensibilité « atténués » pour la couche superficielle.

La **figure 3.27b** renferme le résultat de la reconstruction du *modèle 1* pour la tranche horizontale z=30 unités de profondeur. Cette tranche est située à une profondeur correspondant au toit du corps. On constate que l'image du corps ressort très bien (zone centrale) et sa localisation est identique à celle du modèle initial. L'échelle de couleur de la résistivité affiche des valeurs comprises entre 80 et 90 ohm.m pour l'image du corps conducteur et des valeurs au-delà de 90 ohm.m pour le milieu encaissant.

la **figure 3.27c** représente le résultat de la reconstruction du *modèle 1* pour la tranche horizontale z=45 unités de profondeur. Cette tranche intersecte le corps en son milieu. Là également, l'image du corps ressort très bien, sa localisation et ses dimensions correspondent bien à celles du modèle original. On note cependant un léger pâlissement de couleur par rapport au cas précédent. L'échelle de couleur de la résistivité affiche des valeurs comprises entre 80 et 90 ohm.m pour l'image du corps conducteur et des valeurs au-delà de 90 ohm.m pour le milieu encaissant.

La **figure 3.27d** met en relief l'image du *modèle 1* pour la tranche horizontale z=60 unités. Cette tranche passe par la partie inférieure (base) du corps . L'image du

IMAGERIE 3D

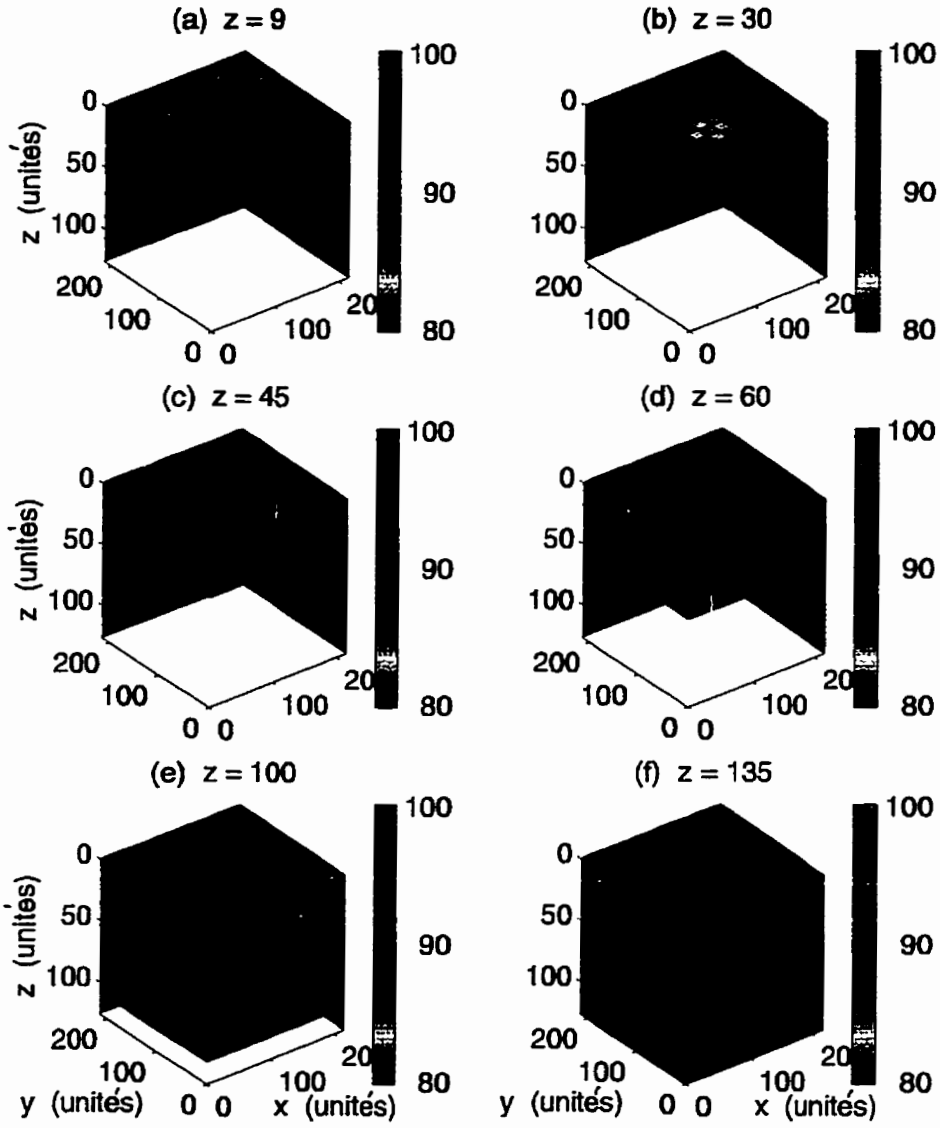


Figure 3.27: Image 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps conducteur (10 ohm.m) dans un milieu résistant (10 ohm.m) pour différentes tranches de z=9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités. L'image produite pour la tranche z=9 est caractérisée par des artéfacts dus à l'effet de la couche superficielle.

corps est toujours bien identifiable comme dans les deux cas précédents. On s'aperçoit néanmoins que le pâlissement de l'image est plus accentué que celui de la tranche pour z=45 unités. Le corps aussi bien que son environnement conservent tout de même un rapport de contraste de résistivité semblable à celui des figures 3.27a et 3.27b.

La **figure 3.27e** et **figure 3.27f** donnent le résultat de la reconstruction du *modèle 1* pour la tranche horizontale z=100 et z=135 unités de profondeur. Ces tranches passent à une profondeur bien au-dessous de la base du corps. À ces profondeurs l'image du corps est devenue imperceptible car elle est substituée par celle du milieu encaissant.

La reconstruction du *modèle 1* pour les tranches z=9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités montre clairement que le programme 3-D développé est capable de faire la rétroprojection des données synthétiques de résistivité et de produire ainsi des images raisonnablement interprétables. On s'aperçoit que plus on va en profondeur, moins l'image obtenue est accentuée c'est à dire qu'on assiste à une atténuation graduelle du contraste de résistivité. Néanmoins, l'image du corps ressort de façon nette ainsi que sa localisation. Les résistivités qu'affiche la barre de couleur ne sont pas aussi contrastées que celle du modèle initial. L'atténuation de la couleur est probablement en rapport avec la distribution des densités de courant puisque celle-ci décroît avec la profondeur. Cette décroissance influence la profondeur d'investigation pouvant être atteinte. On sait que la profondeur d'investigation dépend également entre autres du contraste de résistivité entre le corps et son milieu environnant. Dans le cas d'un corps conducteur dans un milieu encaissant résistant, les filets de courant se redressent pour pénétrer dans le corps conducteur, la profondeur d'investigation devient de cet effet beaucoup plus grande. Bien que pour la configuration d'électrodes décrite dans la figure 3.25 (*modèle 1*), la profondeur d'investigation théorique est environ 80 unités, il est cependant peu probable qu'en réalité on puisse atteindre exactement cette profondeur. La non-perception de l'image du corps pour les tranches z=100 et z=135 unités s'explique par le fait que la rétroprojection ne genère pas d'artefacts pour des profondeurs supérieures à la profondeur d'investigation.

3.5.2.3b. Coefficients de sensibilité « atténués ».

L'image de la figure 3.27a du modèle précédent a révélé la présence d'artefacts pour la tranche z = 9 unités correspondant à la couche superficielle. Ces artefacts sont liés à des cas de singularité dus aux cellules placées à l'aplomb des électrodes de mesures (I, V). Ces cellules sont en effet, caractérisées par des valeurs de coefficients de sensibilité élevés, vue la très petite distance qui sépare leur centre de la surface du sol. Pour diminuer la sensibilité élevée des cellules en question (donc éliminer les artefacts qu'elles créés), on a procédé à la division des coefficients de sensibilité de celles-ci par leur coordonnée du milieu z.

Les images **a, b, c, d, e** et **f** de la **figure 3.28** donnent les résultats de la reconstruction du *modèle 1* en utilisant les coefficients de sensibilité « atténués ». On constate que l'image obtenue pour la tranche z = 9 unités est exempte d'artefact. Ce qui prouve que l'application du principe des coefficients de sensibilité « atténués » a en effet réussi à éliminer toute trace artefacts et à produire une image conforme au modèle initial.

Il est important de noter que dans les reconstructions ultérieures d'image (pour différents modèles de tests d'illustration), on fera intervenir le principe de sensibilité « atténués » afin d'éliminer les artefacts qui pourraient se présenter sur la première couche.

3.5.2.4. Corps résistant dans un milieu encaissant conducteur et homogène.

Pour ce test on a utilisé de nouveau le *modèle 1* de la figure 3.25 tout en prenant soin d'attribuer la résistivité de 10 ohm.m au milieu encaissant et 100 ohm.m au corps. Le nouveau modèle ainsi constitué sera le *modèle 2*. Nous présentons ci-dessous le résultat des reconstructions pour les tranches z=9, 30, 45, 60, 100 et 135 unités.

La **figure 3.29a** donne l'image pour la tranche z=9 unités. C'est l'image du milieu environnant qui ressort puisqu'il n' y a pas de corps à cette profondeur.

IMAGERIE 3D

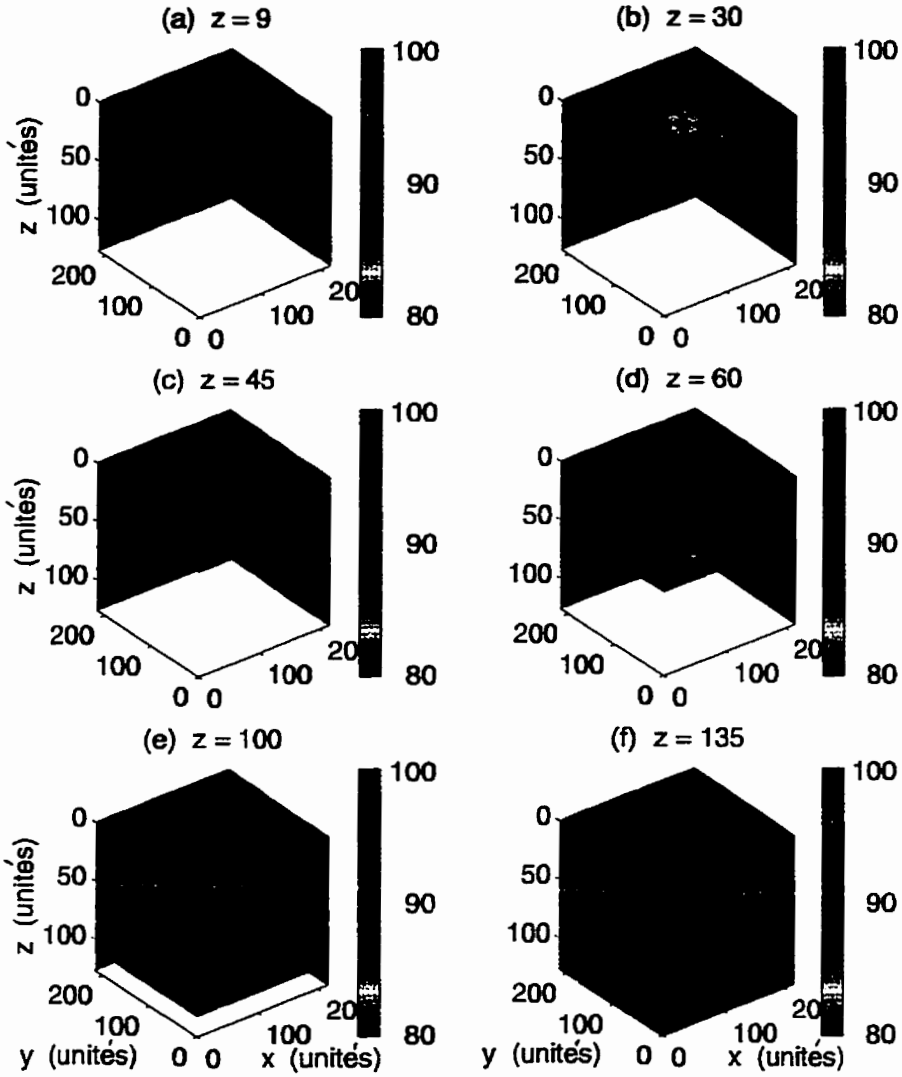


Figure 3.28:: Image 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps conducteur (10 ohm.m) dans un milieu résistant (100 ohm.m) pour différentes tranches de z=9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités. Les coefficients de sensibilité des cellules de la première couche ayant subi une correction, on constate que les artéfacts ont disparu de l'image a) pour la tranche z=9 unités, comme ce n'était pas le cas à la figure 3.27 où les coefficients des cellules de la même couche n'avaient pas été corrigés.

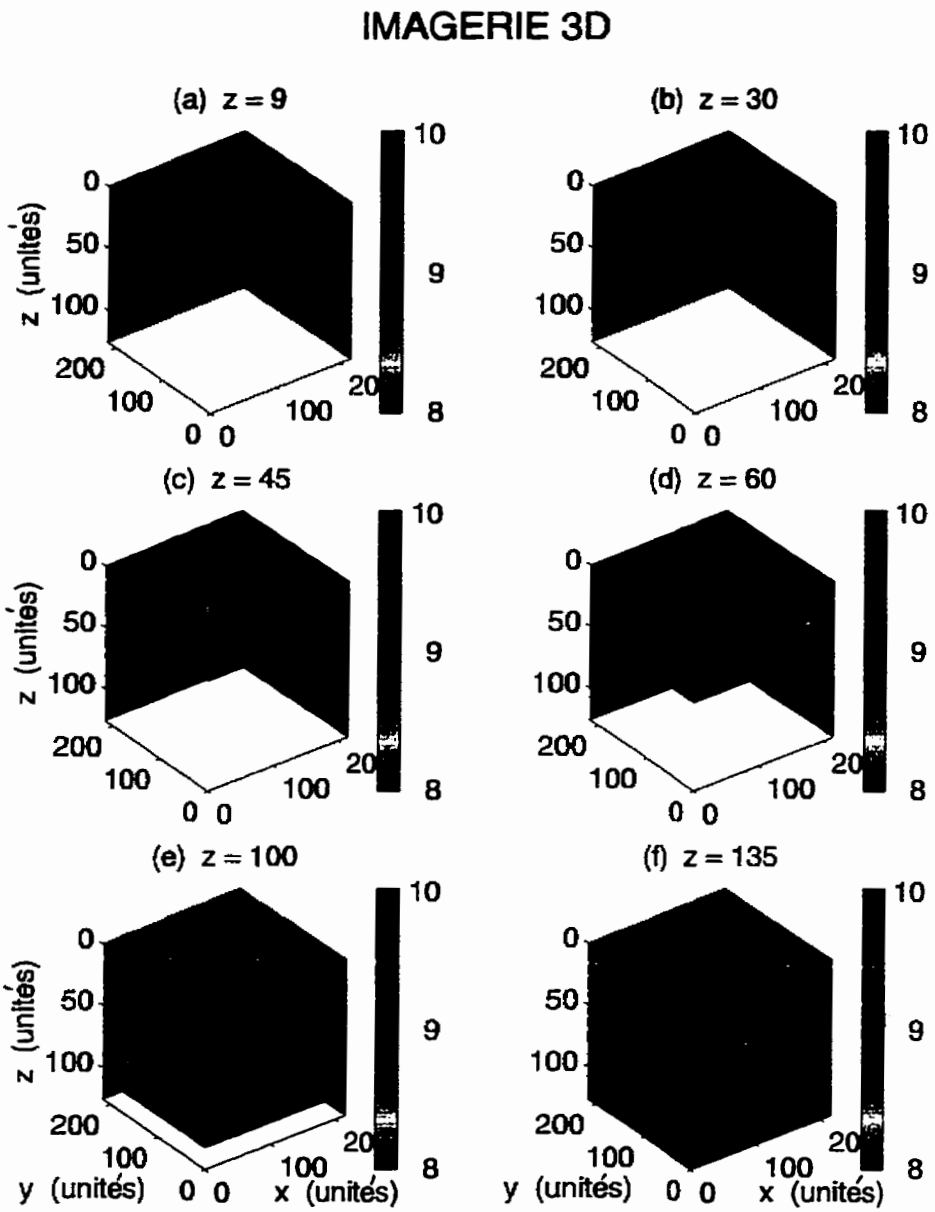


Figure 3.29: Image 3-D du modèle synthétique de la figure 3.25 consistant à un corps résistant (100 ohm.m) placé dans un milieu conducteur (10 ohm.m) pour différentes tranches z= 9, z=30, z=45, z=60, z=100 et z=135 unités.

L'image du *modèle 2* pour la tranche z=30 unités est présentée dans la **figure 3.29b.** L'image du corps se présente dans la partie centrale de la tranche avec une résistivité plus élevée qui le distingue de son milieu environnant, mais cette démarcation n'est pas aussi nette comme dans le cas d'un corps conducteur dans un milieu résistant. Les résistivités qu'affiche l'échelle de couleur sont plus proches de la résistivité du milieu que de celle du corps, donc très peu contrastées.

La **figure 3.29c** affiche le résultat de la reconstruction du *modèle 2* pour la tranche z=45 unités. On remarque que pour cette tranche l'image du corps ressort avec une couleur plus atténuée que dans le cas précédent, néanmoins, elle se démarque bien du milieu encaissant.

La **figure 3.29d** met en relief le résultat de la reconstruction du *modèle 2* pour la tranche z=60 unités. L'image du corps est visible dans la partie centrale de la tranche, mais on assiste là aussi comme dans l'exemple précédent de la figure 3.28d à un pâlissement de la couleur et cela pour les mêmes raisons déjà évoquées.

Les **figures 3.29e** et **3.29f** donnent le résultat de la reconstruction du *modèle 2* pour les tranches horizontales z=100 et 135 unités. Pour ces trancches, l'image du corps est inexistante pour les mêmes raisons énnoncées plus haut dans le cas des figures 3.27e et 3.27f.

Après l'analyse des résultats obtenus pour les différentes tranches considérées on peut conclure que des remarques similaires aux cas des reconstructions du *modèle 1* sont applicables aux reconstructions du *modèle 2*. Cependant, dans le cas d'un corps résistant dans un milieu conducteur, la profondeur d'investigation atteinte est influencée par des phénomènes qui diffèrent de ceux du cas inverse (corps conducteur dans un milieu résistant). Théoriquement, la profondeur d'investigation pour le modèle 2 s'élève aussi à 80 unités. Mais puisque le corps résistant est plongé dans un milieu conducteur, les filets de courant auront tendance à se localiser dans le milieu conducteur et ainsi la profondeur d'investigation atteinte pourrait être plus faible qu'elle ne l'est théoriquement. Aussi,

puisque la sensibilité des cellules décroit en profondeur, cela entraîne une atténuation du contraste de résistivité vers les profondeurs plus élevées.

3.5.2.5 Deux corps conducteurs placés dans un milieu résistant

Le *modèle 1* de la figure 3.25 a servi comme modèle de base pour tester la capacité du programme à détecter deux corps placés dans un milieu résistant. La **figure 3.30** montre une vue en plan de l'emplacement du corps par rapport à la disposition des électrodes. Dans un premier cas nous avons placé dans le milieu résistant de 100 ohm.m, deux corps conducteurs de résistivité 10 ohm.m et de dimensions identiques $\Delta x=\Delta y=50$ unités et $\Delta z=30$ unités (carrés internes). Un second cas très semblable au précédent a été envisagé, avec pour seule modification la taille des corps fixée à $\Delta x=\Delta y=70$ unités et $\Delta z=70$ unités (carrés externes).

Les **figure 3.31a** et **3.31b** donnent les résultats de la reconstruction du modèle pour la tranche z = 25. Dans le cas de la figure 3.31a on peut identifier les images des deux corps selon la diagonale. La figure 3.31b pour le second cas affiche deux images collées parce qu'ils étaient situés très proches l'un de l'autre dans la modélisation initiale; la zone restreinte qui s'étend entre eux est également mal investiguée, due à une mauvaise couverture des électrodes dans cette région.

Cet exemple démontre que le programme est en mesure de retrouver deux ou plusieurs corps mais dans certaines limites. Une grille de mesure adéquatement discrétisée, permettra sans doute de placer les corps plus éloignés l'un de l'autre et de mieux choisir la disposition des électrodes.

3.5.2.6 Tests de profondeur.

Le *modele 1* de la 3.25 a été utilisé pour tester la capacité de la technique de détecter des corps placés à des profondeurs différentes. Le corps a été placé successivement aux profondeurs: z1=10, z2=20, z3= 30 z4=40 unités. L'écartement entre les électrodes

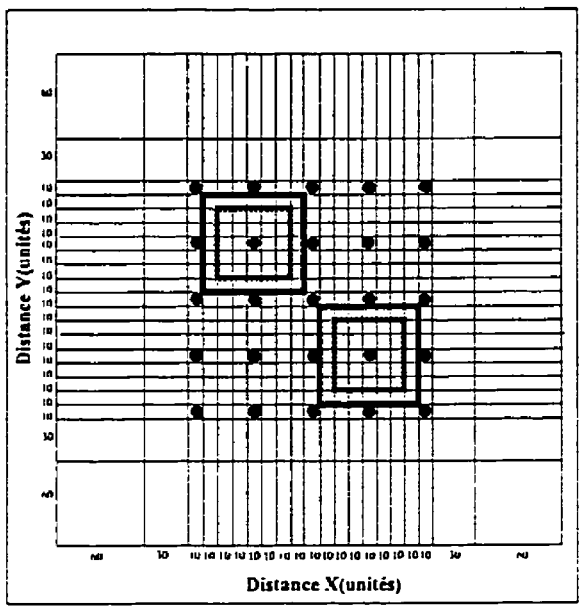
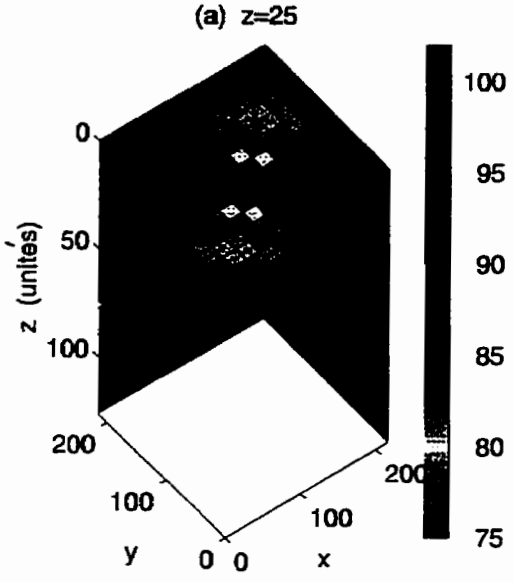


Figure 3.30. Grille de mesure illustrant la position des électrodes (points noirs) et celle des corps. Les corps de taille 50x50x30 unités sont représentés par les carrés internes et ceux de taille 70x70x30 unités correspondent aux carrés externes.

est demeuré le même pour tous les cas envisagés.

Les **figures 3.32a, 3.32b, 3.32c et 3.32d** représentent les coupes pour y = 117 unités. Dans le cas des figures 3.32a, 3.32b, 3.32c, l'image du corps est clairement identifiable. La figure 3.32d donne une restitution très pauvre, ainsi le corps demeure indétectable.

Imagerie 3D



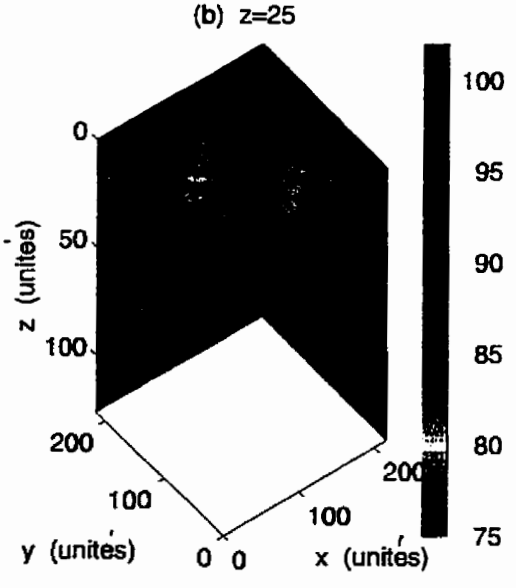


Figure 3.31: Image 3-D de deux corps conducteurs (10 ohm.m) placés dans un milieu résistant (10 ohm.m). La taille des corps pour la figure a) est 50x50x30 unités alors que celle de la figure b) est fixée à 70x70x30 unités.

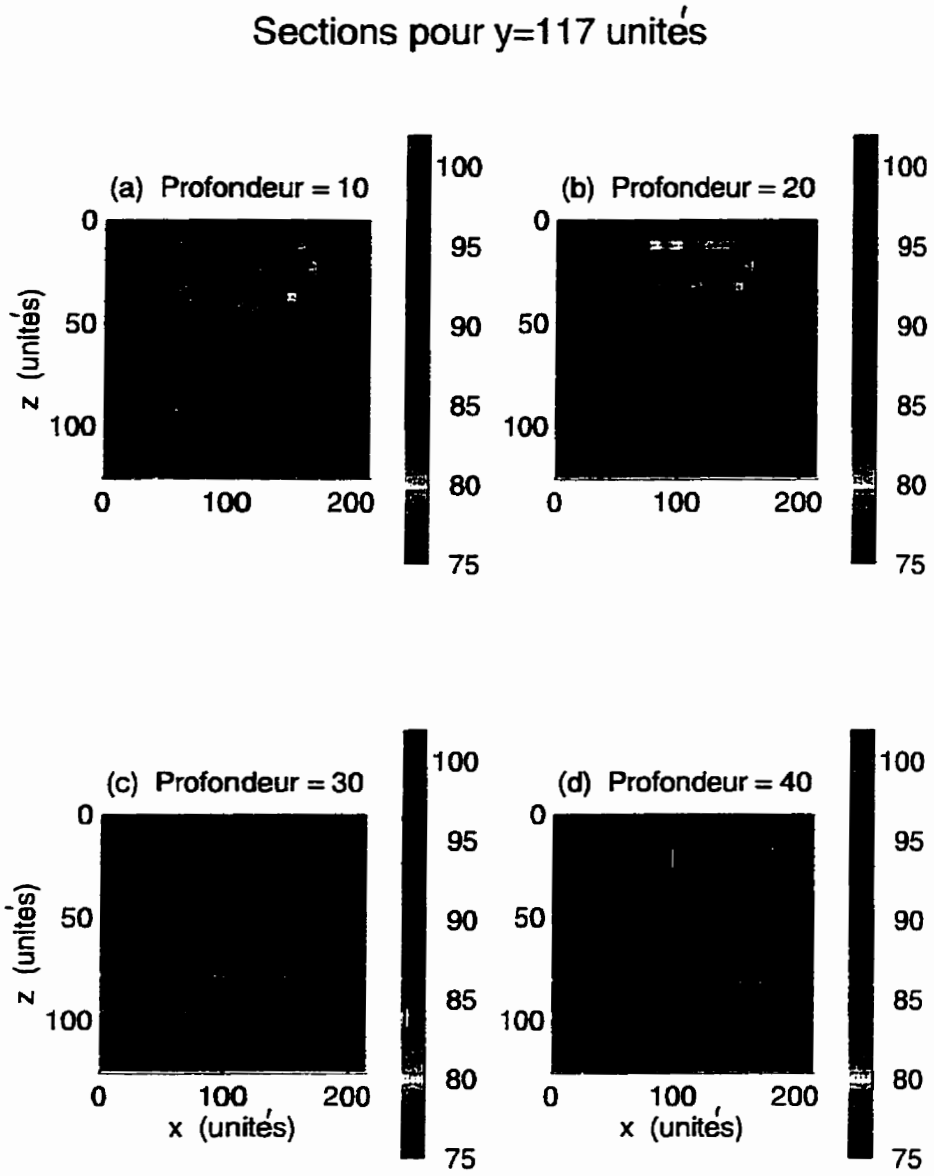


Figure 3.32: Résultats des tests de profondeur. Un corps de résistivité (10 ohm.m) est plongé dans un milieu résistant de 100 ohm.m. Ce même corps est placé à des profondeurs différentes de z1= 10, z2=20, z3=30 et z4=40 unités. La reconstruction est faite en prenant le même nombre d'électrodes (25) et le même espacement entre les électrodes (40 unités). À partir de z=40 unités de profondeur, le corps n' est pas détectable.

Ces tests permettent de conclure que pour une hétérogénéité se trouvant à une profondeur égale ou plus élevée que l'écartement (L) des électrodes, ne pourra pas être détectée.

3.5.2.7 Paramètres physiques et géométrique du modèle et reconstruction des images.

a) Contraste de résistivité.

Le *modèle 2* précédemment décrit a été utilisé pour réaliser trois tests mettant en évidence l'influence du contraste de résistivité existant entre le corps et son milieu. En gardant constante la résistivité du milieu encaissant ($\rho_1=10$ ohm.m) on a fixé successivement celle du corps à $\rho_2=100$, $\rho_2=500$, $\rho_2=2000$ et $\rho_2=10000$ ohm.m.

Les **figures 3.33a, 3.33b, 3.33c** et **3.33d** donnent respectivement les résultats de la reconstruction pour la tranche z=45 unités en considérant des contrastes de $\rho_1/\rho_2=10/100$, $\rho_1/\rho_2=10/500$, $\rho_1/\rho_2=10/2000$ et $\rho_1/\rho_2=10/10000$

La **figure 3.33a** donne l'image du *modèle 2* dans le cas où le contraste de résistivité entre les deux milieux est le moins élevé. L'image du corps ressort assez bien mais sa localisation n'est pas nette surtout aux bordures. La valeur de résistivité correspondant à cette image est de l'ordre de 10 ohm.m; valeur qui ne reflète guère la résistivité initiale du corps.

Dans le cas de la **figure 3.33b** où le contraste de résistivité entre les deux milieux est 5 fois plus élevé que celui du cas précédent, on constate que l'image du corps se présente et se localise de façon nette en concordance avec le modèle initial. La résistivité qui caractérise cette image du corps est de l'ordre de 10 ohm.m comme précédemment.

En ce qui concerne l'image de la **figure 3.33c** où le contraste de résistivité est 20 fois supérieur à celui du premier cas et quatre fois à celui du deuxième cas, on remarque qu'il y a peu de différence voire même inexistante dans la localisation et la présentation de l'image du corps comparativement au 2-ème cas. Quant à la résistivité de l'image du corps, elle est toujours de l'ordre de 10 ohm.m.

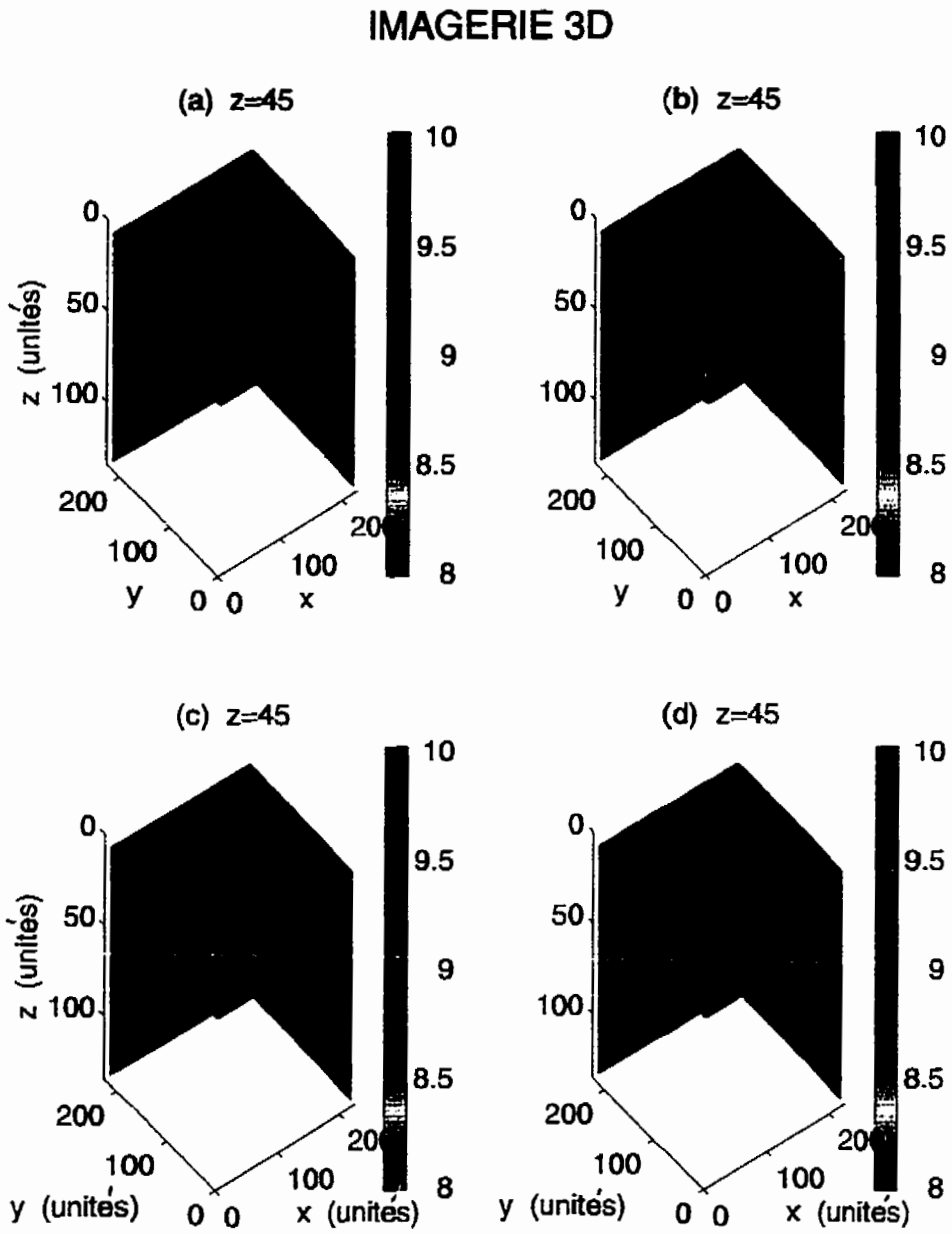


Figure 3.33: Images 3D mettant en évidence l'effet du contraste de résistivité. Le modèle utilisé pour ce test, consiste à un corps (de résistivité variable) placé dans un milieu environnant de 10 ohm.m Les contrastes suivants ont été utilisés: rho1/rho2=10/100, 10/500, 10/2000 et 10/10 000. Rho1 étant la résistivité du milieu et rho2 celle du corps.

Finalement la **figure 3.33d** présente l'image du modèle où le contraste de résistivité est 100 fois supérieur au premier cas, 20 fois le second cas et 5 fois le troisième cas. L'image obtenue et la valeur de résistivité correspondant à celle-ci sont quasiment identiques à celles du deuxième et troisième cas. On remarque que la réponse (10/500) = réponse (10/2000) = réponse (10/10000). Ce phénomène est lié à l'effet de saturation de la résistivité. Cet effet peut être illustré comme suit: si on considère l'équation (2.20) qui donne l'expression du potentiel anormal, on remarque qu'il est proportionnelle à la quantité $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} = \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1}{\frac{\rho_1}{\rho_2} + 2}$ (Society of Exploration Geophysics, theory II, 2nd edition, 1967), où ρ_2 est la résistivité du corps et ρ_1 celle de son milieu environnant . La variation de la propriété physique de cette quantité en fonction de ρ_1 / ρ_2, donne une magnitude de l'anomalie qui tendra assymptotiquement vers un niveau de saturation avec l'augmentation de ce rapport. Après une certaine valeur du rapport ρ_1 / ρ_2 , une augmentation du contraste de résistivité, contribuerait de façon insignifiante à la magnitude de l'anomalie.

b) Profondeur du corps et écartement des électrodes.

En prenant soin de maintenir des conditions identiques au *modèle 1* de la figure 3.25, le corps a été placé successivement à deux profondeurs différentes z_1=30 unités et z_2=100 unités.

L'image de la **figure 3.34a** donne le résultat de la reconstruction du *modèle 1* pour la tranche z=45 unités. On s'aperçoit que l'image du corps est bien identifié localisé au centre de la tranche avec une résistivité de l'ordre de 80 à 90 ohm.m.

La **figure 3.34b** représente le résultat de la reconstruction du même *modèle 1* pour la même tranche z=45 unités lorsque le corps est situé à une profondeur z_2=100 unités. On remarque alors que l'image du corps est inexistante. Cela voudra tout simplement dire

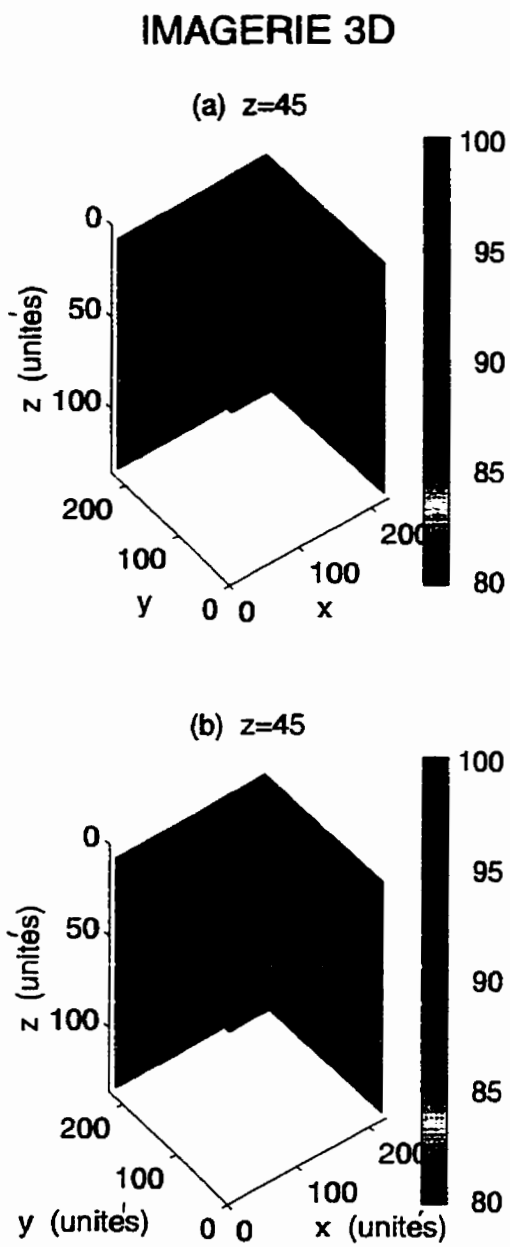


Figure 3.34: Images 3-D illustrant l'effet de la profondeur du corps par rapport à l'écartement des électrodes. La figure (a) donne l'image pour un corps placé à z=30 unités et la figure (b) pour z=50 unités. L'écartement des électrodes dans les deux cas est de L=40 unités.

que le corps est placé à une profondeur supérieure à la profondeur d'investigation (80 unités pour la configuration d'électrodes utilisée). L'usage d'une configuration d'électrodes avec un espacement plus grand entre les électrodes pourrait permettre d'investiguer plus profondément et rendre perceptible l'image du corps placé à $z_2=100$ unités de profondeur.

c) Taille du corps pour un écartement donné entre les électrodes.

Pour tester l'influence du rapport taille du corps versus écartement des électrodes sur le résultat de la reconstruction d'un modèle donné, on s'est servit du *modèle 2* comme définit au sous-chapitre 3.5.2.2 tout en apportant cependant quelques petites modifications. Dans un premier cas on a modifié le *modèle 2* en considérant une taille plus grande du corps; $\Delta x=\Delta y=110$ unités et $\Delta z=30$ unités. Dans le second cas, la taille du corps a été réduite à $\Delta x=\Delta y=70$ unités et $\Delta z=10$ unités. La profondeur du corps ($z=30$ unités) et l'espacement ($L=40$ unités) entre les électrodes sont identiques dans les deux cas envisagés.

La **figure 3.35a** renferme les résultats de la reconstruction pour le premier cas ($\Delta x=\Delta y=110$ unités et $\Delta z=30$ unités) pour la tranche $z=45$ unités. On remarque que l'image est identifiable, mais son extension latérale ne correspond pas au modèle initial. L'image obtenue donne l'impression d'un corps de dimensions plus restreintes qu'il ne l'est en réalité. Les valeurs de résistivité qui caractérisent l'image du corps varient entre 75 et 80 ohm.m.

La **figure 3.35b** donne les résultats de la reconstruction pour le deuxième cas ($\Delta x=\Delta y=70$ et $\Delta z=10$ unités) pour la même tranche $z=45$ unités. On s'aperçoit que là l'image ressort très bien selon le modèle initial, et les résistivités qui lui sont attribuables varient cette fois-ci entre 80 et 90 ohm.m.

Ces deux exemples prouvent que le choix du rapport de la taille du corps par rapport à l'espacement entre les électrodes influence la résolution pouvant être obtenue par

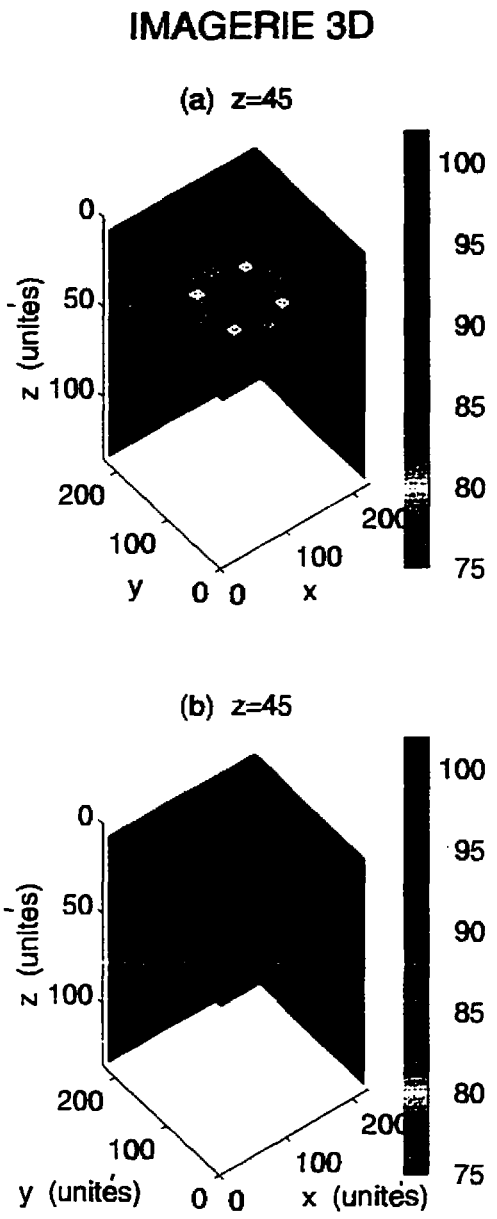


Figure 3.35: Images 3-D mettant en évidence l'effet de la taille du corps par rapport à un écartement donné d'électrodes. Le modèle utilisé est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu de 100 ohm.m. La taille du corps est 110x110x30 unités (figure (a)) et 70x70x30 unités (figure (b)). L'écartement d'électrode dans les deux cas est L=40 unités.

reconstruction. Dans le cas présent cela revient à dire que l'espacement de L=40 unités est petit par rapport au corps de grandes dimensions (premier cas). Ainsi la configuration d'électrodes utilisée n'assure pas un recouvrement adéquat du corps vers ses parties externes. C'est donc une certaine partie de celui-ci qui est recouverte, d'où l'image du corps ressort de façon réduite. Cependant, l'espacement d'électrode choisi s'avère convenable pour le corps de dimensions plus petites (deuxième cas); ce qui a permis d'obtenir une image qui reflète bien le modèle initial.

d) Espacement entre les électrodes pour une taille donnée du corps.

Le *modèle 1* de la figure 3.25 est prise en considération pour la réalisation de ce test. Deux modèles ayant pour prototype le *modèle 1* ont été élaborés. La taille du corps pour chacun d'eux est identique et est égale à $\Delta x=\Delta y=70$ unités et $\Delta z=30$ unités. Le corps est placé à une profondeur z=30 unités. L'espacement entre les électrodes dans un premier cas est fixé à L=40 unités et dans un second cas à L=30 unités.

La **figure 3.36a** donne une reconstruction du modèle dans le cas où L=40 unités pour la tranche z=45 unités. L'image du corps apparaît nettement à la partie centrale de la tranche et les résistivités qui la caractérisent varient entre 80 et 90 ohm.m.

La **figure 3.36b** met en relief la reconstruction du modèle lorsque L=30 unités pour la même tranche z=45 unités de profondeur. On remarque que l'image obtenue ressort d'une façon moins nette et sa localisation est incertaine par rapport au cas L=40 unités. Une valeur de résistivité de 90 ohm.m est attribuable à l'image du corps.

Il en ressort de ces deux tests qu'un choix inadéquat de l'espacement entre les électrodes pour une grandeur donnée du corps peut négativement influencer la résolution de la reconstruction. Des espacements d'électrodes trop grands ou trop petit par rapport à l'objectif que l'on cherche à imager, pourraient conduire à des réponses biaisées ou surprenantes de celui-ci. Dans le cas de L=30 unités, les densités de courant s'atténuent à

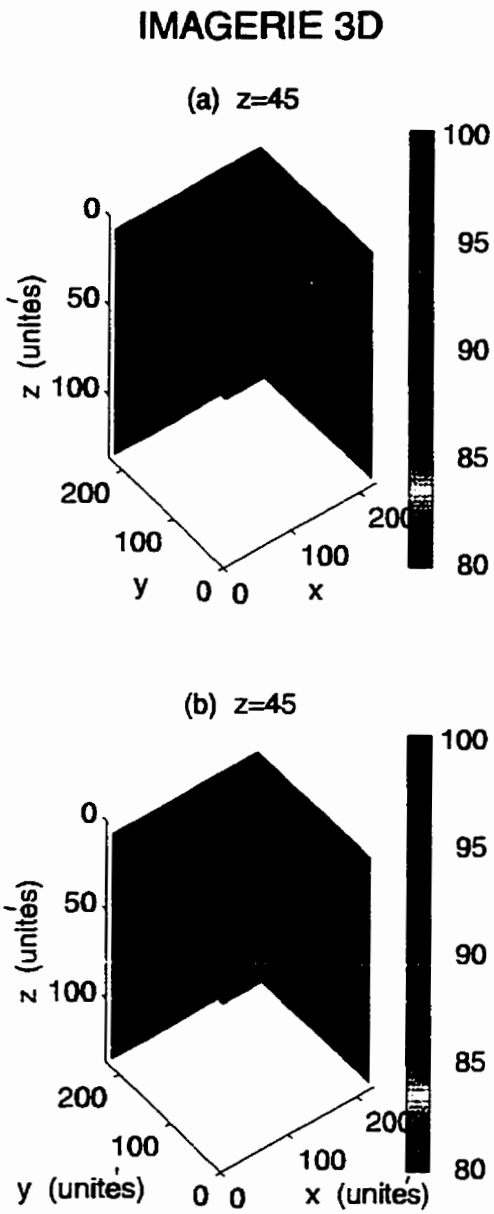


Figure 3.36: Images 3-D qui mettent en relief l'effet de l'espacement des des électrodes pour une taille donnée du corps. Le modèle envisagé est celui du cas d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu (100 ohm.m). La taille du corps est 70x70x30 unités. L'espacement entre électrodes est fixé respectivement à 40 et 30 unités dans le cas de la figure (a) et (b).

une profondeur moins grande que celle du cas où L=40 unités. Par conséquent, la profondeur d'investigation atteinte dans chacun des cas est différente, ce qui entraîne alors une image moins nette pour la figure 3.36b.

e) Discrétisation de la grille de simulation pour obtenir les résultats (ρ_a).

Le succès de la reconstruction de l'image à partir des données ρ_a obtenues par simulation, dépend entre autres, de la qualité de ces données. Pour mettre en évidence l'erreur associée à la discrétisation de la grille pour obtenir les résultats ρ_a, on a utilisé une grille de taille 21x21x15 identique à celle du *modèle1* de la figure 3.25. Dans un premier cas, cette grille a été discrétisée en considérant des mailles d'égales largeurs de 10 unités dans chacune des dimensions x, y et z. Les deux premières mailles pour les dimensions x et y ont une largeur de 60 et 30 unités, tandis qu'elle est de 30 et 60 unités pour les deux dernières mailles. Les deux dernières mailles pour la dimension z ont également une largeur de 30 et 60 unités respectivement. La taille du corps dans ce cas est de $\Delta x=\Delta y=70$ unités et $\Delta z=30$ unités. L'espacement entre les électrodes est fixé à L=40 unités et la profondeur du corps à z=30 unités. Le corps de résistivité ρ_1 = 10 ohm.m est plongé dans un milieu résistant ρ_2 =100 ohm.m. Dans un second cas, la grille de 21x21x15 a été discrétisée à l'aide des mailles d'égales largeurs de 15 unités dans chacune des dimensions x, y et z, sauf pour les deux premières et les deux dernières mailles des dimensions x et y et pour les deux dernières mailles de la dimension z qui ont des largeurs identiques à celles du premier cas. Les autres paramètres demeurent identiques à ceux du cas précédent.

La **figure 3.37a** affiche le résultat de la reconstruction pour la grille de discrétisation plus fine (largeur de maille égale à 10 unités) dans le cas de la tranche z=45 unités. On constate que l'image du corps pour ce modèle est nettement visible et sa résistivité varient entre 80 et 90 ohm.m.

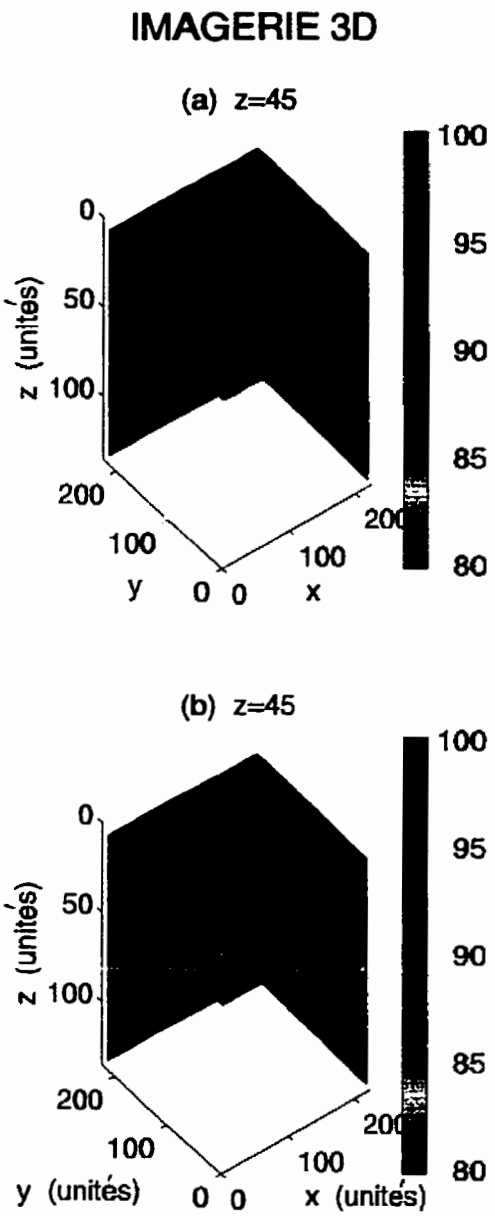


Figure 3.37: Images 3-D pour illustrer l'effet de la discrétisation de la grille de mesure pour obtenir les résistivités apparentes. Le modèle utilisé est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu résistant (100 ohm.m). Des mailles de largeur 10 unités dans le cas de a) et 15 unités dans le cas de b) en x, y et z ont été utilisées.

La **figure 3.37b** présente le résultat de la reconstruction pour le modèle dont la grille a été plus grossièrement discrétisée pour la même tranche z=45 unités. L'image obtenue est beaucoup moins accentuée et sa localisation est moins précise comparativement à celle du cas précédent.

Ces deux tests permettent de conclure que la discrétisation de la grille de mesure pour obtenir les résultats ρ_a , influence la qualité de résolution de l'image. L'image de la figure 3.37a illustre le cas d'une discrétisation optimale, alors que celle de la figure 3.37b donne le cas où la discrétisation est inappropriée.

Pour plus de clarté, notons que la discrétisation de la grille, dont il a été question (cas 2-D) et dont il est question (cas 3-D), est celle utilisée pour générer les données ρ_a à l'aide des programmes de simulation. Dans le cas des données réelles de terrain ce problème ne se pose pas. Alors, pour lever l'ambiguité, soulignons qu'il ne s'agit pas de la discrétisation du domaine du modèle 2-D ou 3-D utilisé pour la reconstruction d'image, mais de la grille du modèle pour obtenir les résistivités apparentes.

f) Nombre d'électrodes.

Le *modèle 1* de la figure 3.25 a une de plus servi de modèle de base pour étudier l'effet du nombre d'électrodes sur la qualité de l'image produite. Nous avons gardé intacts les paramètres du corps du *modèle 1:* $\Delta x=\Delta y=70$ unités, $\Delta z=30$ unités et le corps est placé à z=30 unités de profondeur. Les résistivités du corps et de son milieu sont respectivement 10 et 100 ohm.m. L'espacement entre les électrodes est fixé à L=40 unités. Pour le modèle ainsi crée, deux configurations d'électrodes constituées de 25 et 9 électrodes ont été envisagées.

La **figure 3.38a** montre le résultat de la reconstruction pour le nombre d'électrodes N=25 pour la tranche z=45 unités. L'image produite du corps s'identifie bien au centre

IMAGERIE 3D

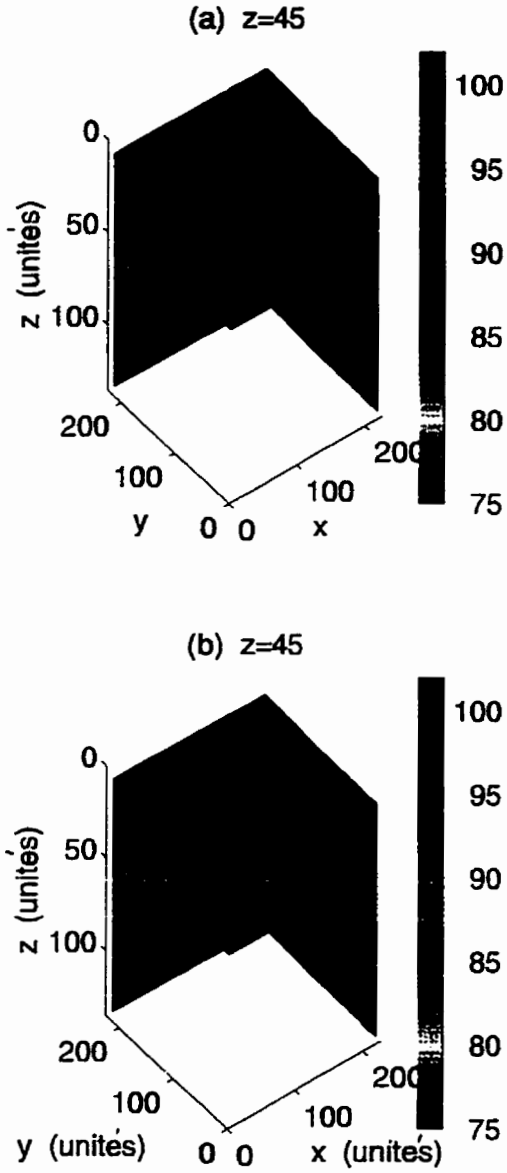


Figure 3.38: Images 3-D pour illustrer l'effet du nombre des électrodes. Le modèle initial est celui d'un corps (10 ohm.m) dans un milieu résistant (100 ohm.m). Le nombre d'électrode utilisé s'élève à 25 dans le cas de la figure (a) et à 9 dans le cas de la figure (b).

de la tranche conformément au modèle initial du point de vue géométrie, mais avec une résistivité bien inférieure à celle du modèle du départ.

La **figure 3.38b** présente le résultat pour le nombre d'électrodes N=9 pour la même tranche z=45 unités. Là l'image du corps ne ressort pas ou pas de façon distincte; de plus sa localisation est très ambiguë. Cela voudra dire d'une part que le nombre restreint de N=9 électrodes ne recouvre que très partiellement l'étendue du corps, d'autre part la profondeur d'investigation pouvant être atteinte pour cette configuration est très inférieure au cas où N=25 électrodes, par conséquent l'image du corps est floue.

g) Tests de bruit et robustesse de l'algorithme

Dans une première étape des tests on a réalisé des simulations avec une configuration d'électrodes non homogène. Autrement dit, sur 25 électrodes plantées en surface, seulement les données recueillies sur 22 électrodes ont été prises en considération.

Les images **a** et **b** de la **figure 3.39** donnent respectivement les résultats pour une configuration homogène (25 électrodes) et non homogène (22 électrodes). Les imgages obtenues dans les deux cas présentent une grande ressemblance. On constate que l'image dela figure 3.39a (configuration homogène) correspond raisonnablement bien à celle de la figure 3.39b (configuration non-homogène) voire même identique.

Un test de bruit a été réalisé afin de déterminer comment se conduirait la rétroprojection dans le cas de données réelles de terrain. Le modèle pour générer les données de résistivité apparente pour ce test, est celui de la figure 3.25. Un bruit avec une distribution normale est ajouté aux données de résistivité apparente. La moyenne de ce bruit est zéro et son écart-type est égal à 50 % de la moyenne des données de résistivité apparente calculées.

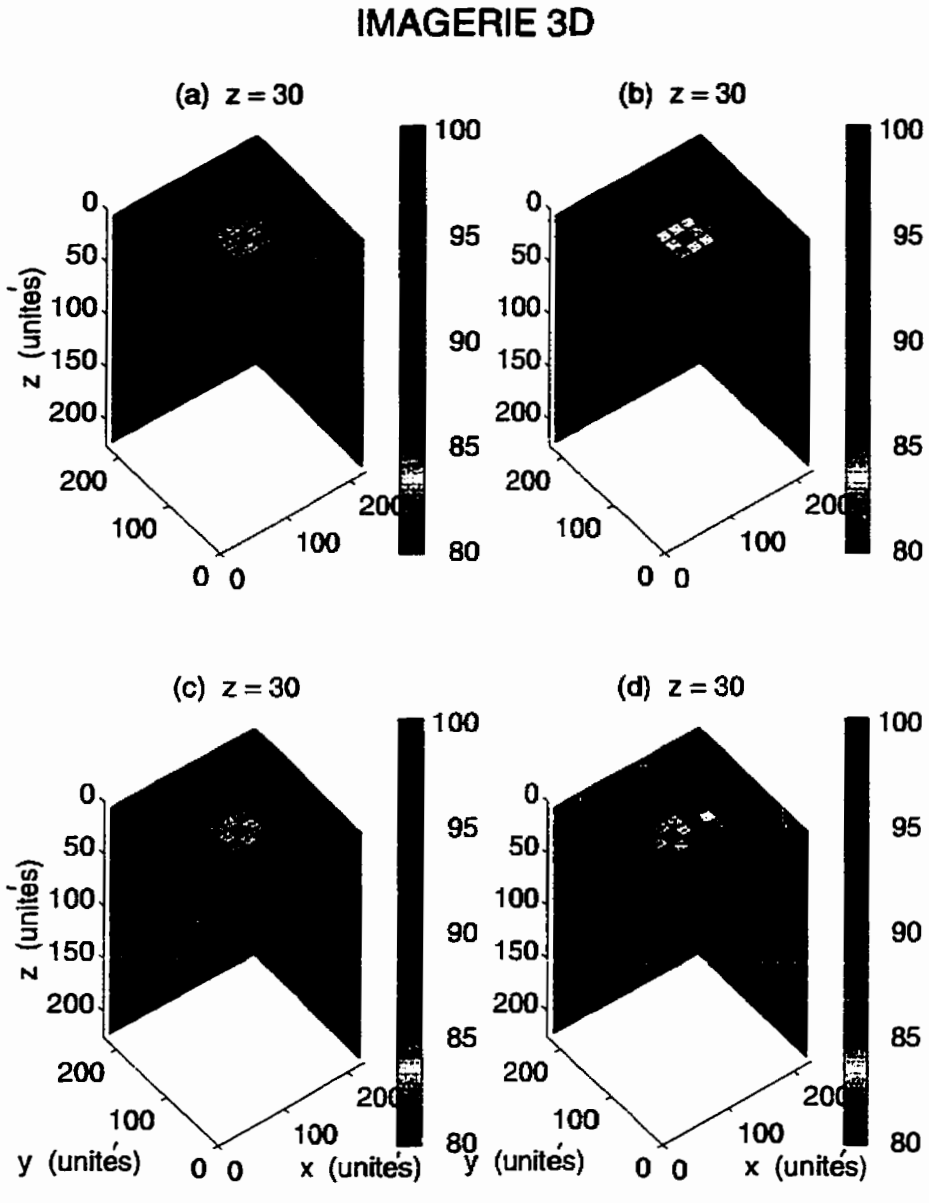


Figure 3.39: Images 3-D illustrant des tests de bruit et la robustesse de l'algorithme. Le modèle initial est un corps (10 ohmm) placé dans un milieu résistant (100 ohmm). La figure (a) est l'image d'une configuration homogène de 25 électrodes, tandis que la figure (b) est celle d'une configuration non homogène constituée de 22 électrodes plantées à la surface. Les figures (c) et (d) montrent respectivement les images sans et avec bruit.

Les images **c** et **d** de la **figure 3.39** montrent respectivement les résultats dans le cas sans bruit et avec bruit. On remarque que l'image du corps est moins cernée dans le cas avec bruit que dans le cas sans bruit.

Les deux tests précédents mettent en évidence que le programme est peu sensible au bruit.

h) Tests de profondeur avec des coefficients de sensibilité pondérés.

Des coefficients de sensibilité pondérés ont été utilisés pour les tests de profondeur en vu de rehausser la résolution des structures plus en profondeur. Pour générer de tels coefficients de sensibilité on s'est servi des faits suivants et déjà connus On sait que les coefficients de sensibilité sont fonction des positions relatives des électrodes de courant, des électrodes de potentiel et des cellules. Les cellules plus profondes sont caractérisées par des valeurs de coefficients moins élevées que celles superficielles. Par ailleurs, il est clair que les grandes profondeurs d'investigation sont atteintes pour de grands écartements et les petites profondeurs pour de petits écartements entre les électrodes de courant et de potentiel. Vu que ces phénomènes sont interdépendants, une façon de rehausser la résolution des structures profondes est de donner plus de poids aux coefficients des cellules plus en profondeur. Cela reviendrait alors de multiplier les coefficients de sensibilité de chacune des cellules impliquées dans le processus de rétroprojection par les distances des positions relatives des électrodes de courant et de potentiel.

Les images **a, c,** et **e** de la **figure 3.40** montrent la reconstruction pour des coefficients non pondérés tandis que les images **b, d** et **f** de la même figure donnent la reconstruction pour des coefficients pondérés. On remarque que pour les mêmes tranches z, la résolution de la partie de la structure (plus en profondeur) est meilleure dans le cas des coefficients pondérés.

IMAGERIE 3D

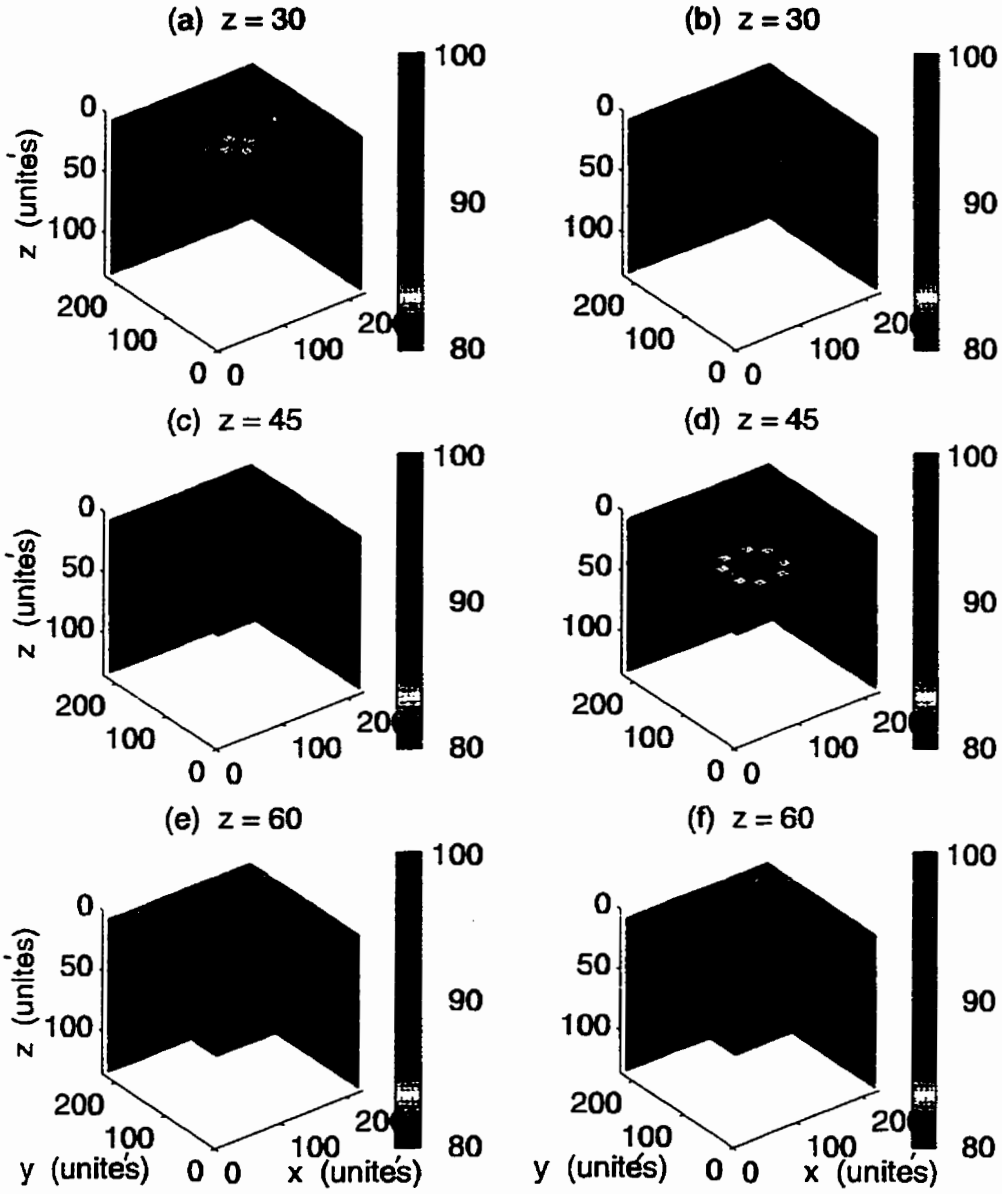


Figure 3.40: Images 3-D illustrant des tests de profondeur en utilisant des coefficients de sensibilité pondérés. Les images (a), (c) et (e) correspondent à des tests avec des coefficients de sensibilité non pondérés, tandis que les images (b), (d) et (f) sont celles obtenues avec des coefficients pondérés.

3.5.2.8 Modèles simples: couches stratifiées

Selon le contexte géologique, la zone d'étude est connue avoir une structure de couche stratifiées consistant à une superposition de sable sec, sable saturé et d'argile. A la lumière de ces informations, des tests sur des modèles de couches stratifiées ont été réalisés. Ces tests avaient pour but d'avoir un aperçu préliminaire sur les résultats auxquels on pourrait s'attendre dans le cas des données de terrain.

a) Résultats de modèle: cas 1.

Dans ce modèle, une couche conductrice de résistivité 10 ohm.m et d'épaisseur 30 unités surmonte une couche résistante de 100 ohm.m. La rétroprojection des données de résistivité pour ce modèle ainsi que des modèles suivants a été faite en utilisant 13x13x8 cellules de dimensions 18x18x18 unités chacune.

La **figure 3.41a** montre le résultat obtenu pour la section y=117 unités. L'interface couche conductrice-résistante ressort aux environs de z= 50 unités, ce qui montre un décalage assez important par rapport à ce qui a été initialement modélisé.

b) Résultats de modèle: cas 2.

Tous les paramètres de ce modèle sont identiques à ceux du précédent sauf que les résistivités des deux couches ont été interverties. Là aussi l'interface couche résistante-conductrice se situe à une profondeur autour de 50 unités (**figure 3.41b**).

c) Résultats de modèle: cas 3.

Des travaux pratiques géophysiques ont été réalisés en mai 1996 sur le site de Lachenaie dans le cadre du cours GML-6201 (Techniques géophysiques de haute

Sections verticales pour (y=117 unités)

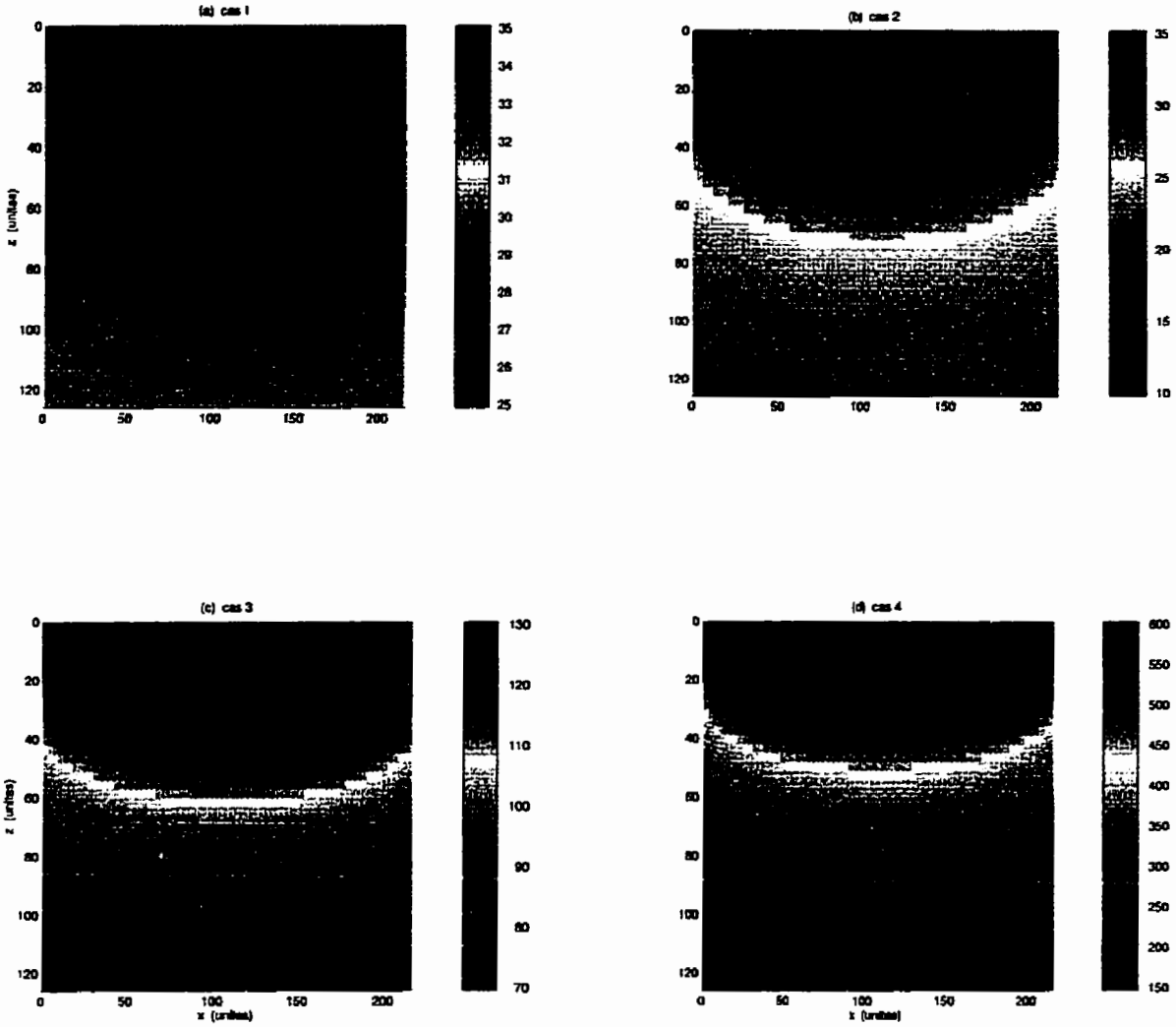


Figure 3.41

a) Image d'un modèle à 2 couches de résistivité respective 10 et 100 ohm.m
b) Image d'un modèle à 2 couches de résistivité respective 100 et 10 ohm.m
c) Image d'un modèle à 3 couches de résistivité respective 1000, 100 et 10 ohm.m
d) Image d'un modèle à 3 couches de résistivité respective 5000, 100 et 10 ohm.m

résolution). Ainsi, l'inversion des données VLF recueillies sur le site à l'aide de l'appareil Geonics EM-16R à la station 40 des lignes 5 à 80 a permis d'identifier 3 couches de résistivité et d'épaisseur ci-contre: 1000 Ωm (2.55 m), 100 Ωm (2.98 m) et 7 Ωm. En nous inspirant de ces résultats, un modèle de 3 couches a été utilisé pour ce test. La résistivité de la couche superficielle est de 1000 ohm.m avec une épaisseur de 30 unités, celle de la couche intermédiaire est de 100 ohm.m et ayant pour épaisseur 20 unités. La résistivité de la troisième couche est fixée à 10 ohm.m. Ce modèle correspond à un cas de 3 couches décroissantes de type Q (Meyer De Stadelhofen, 1991) là où il est difficile à distinguer les interfaces; cela se solde donc avec une ambiguité d'interprétation.

La **figure 3.41c** donne le résultat pour le modèle en question. L'interface entre les deux premières couches de délimite à partir de 40 unités et celui entre la couche intermédiaire et la dernière se situe au niveau de 60 unités. Ces profondeurs des intrefaces diffèrent ce celles qui ont été initialement modélisées à cause de la raison précédente.

d) Résultats de modèle: cas 4.

L'inversion des données de résistivité apparente (configuration Schlumberger) prises sur la ligne 40 aux stations 40 et 60 sur le même site que précédemment a donné, pour un modèle de terrain 4 couches, les valeurs de résistivité et d'épaisseur suivantes:
Station 40: 1300 Ωm (0.42 m), 5700 Ωm (1.25 m), 100 Ωm (3.58 m) et 3 Ωm
Station 60: 1000 Ωm (0.41 m), 5105 Ωm (0.57 m), 100 Ωm (3.01 m)et 6.48 Ωm
A titre de comparaison, rappellons que la ligne 40 est située à 20 m de la ligne 20 qui passe par le centre de la configuration où les mesures pôle-pôle ont été effectuées.
En se basant sur les résultats de l'inversion des données de résistivité obtenues avec la configuration Sclumberger, on a crée un modèle à 3 couches ayant chacune une résistivité de 5000, 100, et 10 ohm.m du haut vers le bas. Les épaisseurs des deux premières couches sont respectivement 30 et 20 unités.

La **figure 3.41d** donne un résultat pour ce modèle, là où l interface entre deux premières couche se situe au niveau de 40 unités et celui entre les deux dernières couche à environ 60 unités.

Les résultats des modèles synthétiques ci-dessus ont montré habileté de la technique de produire des images plausibles. La distribution des résistivités peut être efficacement cartographiée, mais leurs valeurs absolues ne sont pas bien déterminées.

3.5.3 Reconstruction 3-D avec des données réelles de terrain.

Jusqu'ici nous avons montré et discuté des résultats de la rétroprojection 3-D appliquée sur des données synthétiques. Dans les sections qui suivent, il sera alors question de l'application du programme sur des données réelles collectées dans la région de Lachenaie.

3.5.3.1 Site des mesures et contexte géologique et hydrologique.

Les levés de données réelles ont été faits au nord-est de l'Île de Montréal. Cette zone est située aux abords du site d'enfouissement sanitaire de l'usine de triage de Lachenaie de la compagnie BFI. Des études antérieures réalisées dans le site révèlent que la stratigraphie de la région est constituée d'un shale d'Utica fracturé recouvert par environ 2 à 3 mètres de till silteux-sablonneux et de 20 mètres d'argile glacio-lacuste. Le tout est recouvert par une couche de sable de 1 à 5 mètres qui constitue l'aquifère régional.

3.5.3.2 Acquisition des données pôle-pôle.

Les données de résistivité sont mesurées en considérant une grille de 5x5 électrodes avec un espacement de 3 mètres entre elles. Cette grille a été utilisée en plaçant une électrode de courant et de potentiel respectivement à 150 mètres (électrodes à l'infini) de la grille afin que leur contribution soit négligeable sur les valeurs mesurées des potentiels et que la configuration soit un pôle-pôle. La **figure 3.42** présente la localisation du site des levés et de la disposition des électrodes.

Pour la grille d'électrodes de 5x5, nous avons 600 cas possibles de points de données. Ce nombre de points pourrait cependant se réduire à 300 si on tenait compte de la réciprocité des mesures. Cela prendrait beaucoup de temps pour exécuter une telle grande

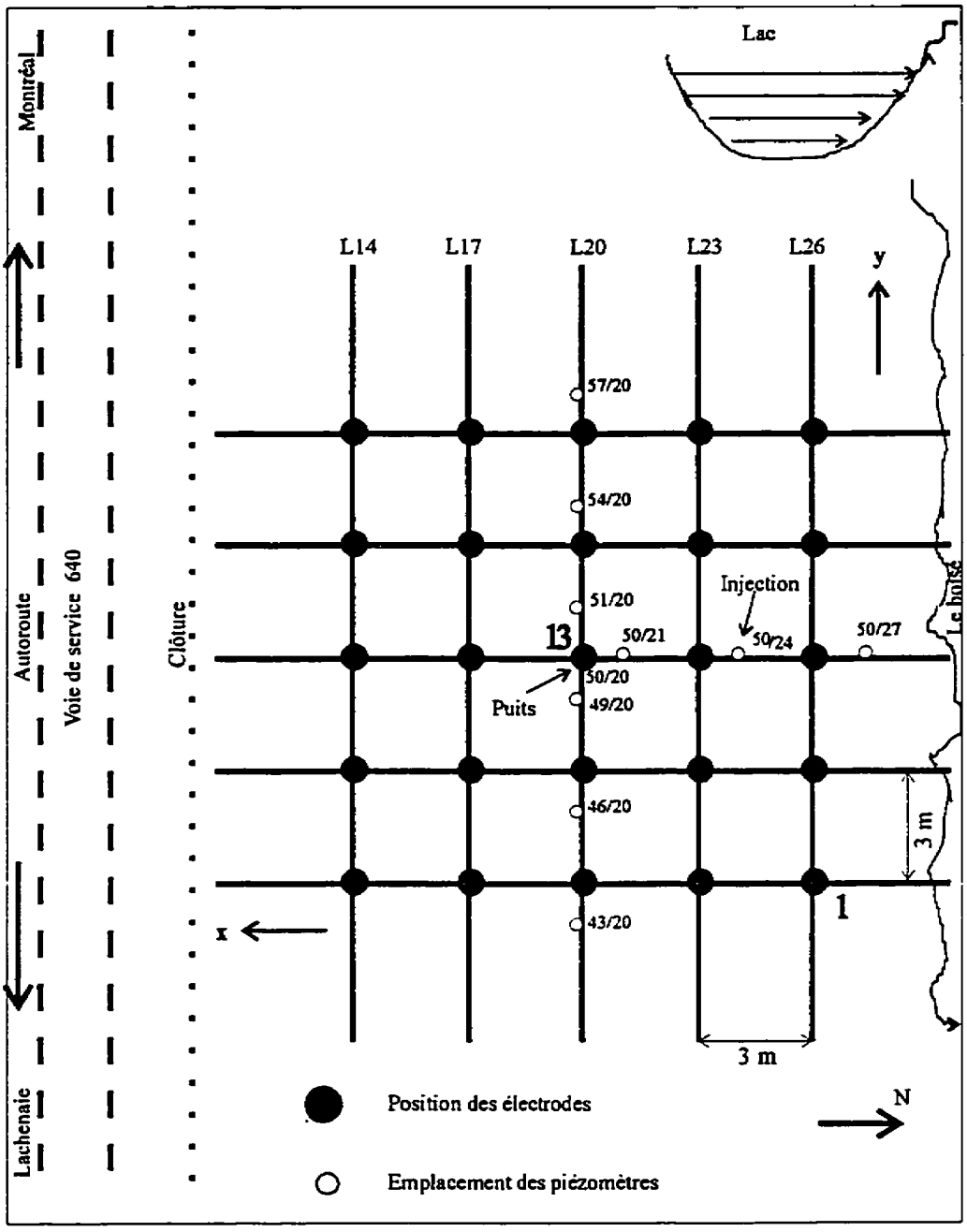


Figure 3.42: Localisation du site des mesures électriques pôle-pôle. L'origine (0, 0) des axes se situe à la position de l'électrode No. 1.

quantité de mesure avec des résistivimètres conventionnels. Par exemple, il nous a fallu 7 heures et demie pour réaliser les 600 points de mesure pour la grille de 5x5 électrodes avec un espacement de 3 mètres. Loke et Barker (1996) ont développé une technique de « levé cross-diagonal » pour réduire le temps nécessaire à l'exécution des levés de résistivité 3-D pour des nombres modérés (25 à 100) d'électrodes. Leur technique consiste à faire des mesures de potentiel aux électrodes placées le long des lignes horizontales, verticales et la diagonale 45° passant à travers l'électrode de courant. Selon cette technique, le nombre de points de données pour une grille de 7x7 électrodes se réduirait alors à 476 au lieu de 2 352 si on s'en tient à tous les cas possibles.

Les levés de résistivité ont été réalisés en deux volets les 7 et 12 juin 1996. Dans un premier volet (état perturbé), les mesures ont été prises lors d'un essai de pompage (débit: Q=55 L/min) dans le puits 50/20. Une solution de 10 litres contenant deux traceurs, le lithium (1000 ppm) et le potassium (5000 ppm), a été injectée dans le piézomètre 50/24 situé à 4 mètres du puits de pompage (voir figure 3.42). Le piézomètre d'injection est enfoncé jusqu'au niveau de la nappe phréatique. Les opérations d'injection et de pompage ont débuté à 8:00 heures du matin, alors que les levés géophysiques se sont déroulés à partir de 10:30. Dans un second volet (état normal) les mesures sont faites dans des conditions normales, c'est à dire sans essai de pompage ni injection de traceurs.

La répartition des levés en deux volets différents avait pour objectif d'une part de cartographier la zone d'étude à l'état normal et d'autre part de chercher à détecter l'hétérogénéité crée dans le sous-sol suite à l'injection de traceurs et à l'essai de pompage puis de faire une comparaison des résultats de la reconstruction entre les deux états.

Les résistivités apparentes, servant de données d'entrée pour la rétroprojection, ont été calculées à partir des valeurs V/I mesurées. L'analyse de ces données V/I lors du premier volet a permis d'estimer les pourcentages suivants: 8 % des mesures satisfont le test de réciprocité à l'intérieur d'une différence de 0 % ; 66 % à l'intérieur de 5 % et 94 % à l'intérieur de 10 %. La majorité des différences s'est produite là où il y avait une grande séparation entre l'émetteur et le récepteur (signal faible et rapport signal/bruit faible). De

plus, il est à noter que pour des raisons inconnues, des différences significatives ont été enregistrées pour les paires réciproques d'électrodes 8↔5; 8↔15; 8↔19; 5↔13 et 6↔18. Ces différences élevées sont probablement liées à des problèmes singuliers dus soit à une défaillance de lecture ou soit à un mauvais contact sol-électrode.

Pour analyser la distribution des résistivités apparentes calculées, nous les avons représenté sous forme d'isocontours dans la **figure 3.43.** Les électrodes **1** et **13** (pour chacun des états normal (a, b) et perturbé (c,d)) ont servi d'électrodes émettrices pour ce test. On remarque que les isocontours des figures 3.53 a, b, c et d sont à peu près circulaires autour des émetteurs en question. Cette allure des isocontours dévoile qu'il y a peu d'hétérogénéité latérale , sinon ils seraient soumis à des distorsions (Park et Van, 1991). Les isocontours révèlent une décroissance de la résistivité apparente à des grandes distances de la source. Cette tendance confirme que la résistivité vraie doit aussi décroître avec la profondeur.

3.5.3.3 Rétroprojection et interprétation des résultats.

La rétroprojection des résistivités apparentes correspondant aux deux états (normal et perturbé) a été réalisée en utilisant des cellules de 17x17x11. La taille des cellules est fixée à $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ m et l'écartement entre les électrodes à L = 3 m.

La **figure 3.44** présente l'image dans le cas de **l'état normal** pour la section y=8.5 m. Cette section correspond au profil qui passe par le centre de la configuration d'électrodes utilisée; donc à travers les piézomètres 50/27, 50/24, 50/21 et le puits 50/20. D'après l'image obtenue, nous sommes bien en présence de couches stratifiées conformément au contexte géologique du site. Trois couches distinctes pourraient être délimitées. Une première couche d'une épaisseur presque constante (1.20 m) et d'une résistivité élevée s'étend entre 0 et 1.20 m de profondeur. Cette couche pourrait correspondre au sable sec de surface. Au-dessous de la première couche se trouve une

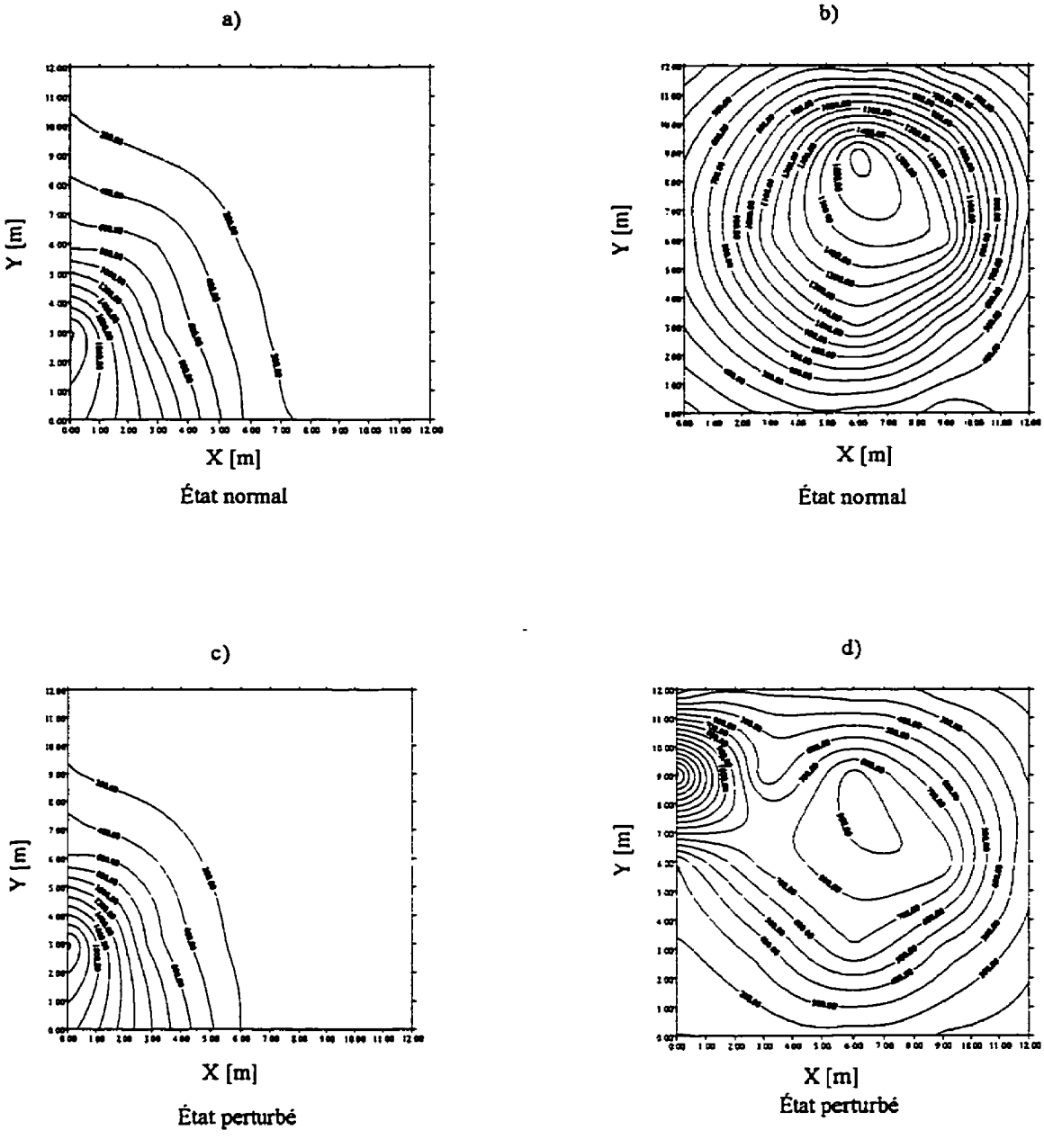


Figure 3.43:

Distribution des résistivités apparentes pour l'état normal (a, b) et perturbé (c, d), pour les électrodes de courant # 1 et # 13. Il y a 5 électrodes aux positions 0.0, 3, 6, 9 et 12 m en X et 5 électrodes aux mêmes positions en Y; ce qui fait une combinaison totale de 5x5=25 électrodes. L'électrode No.1 se trouve au point de coordonnées (0, 0) et l'électrode no.13 se trouve au point de coordonnées (6, 6).

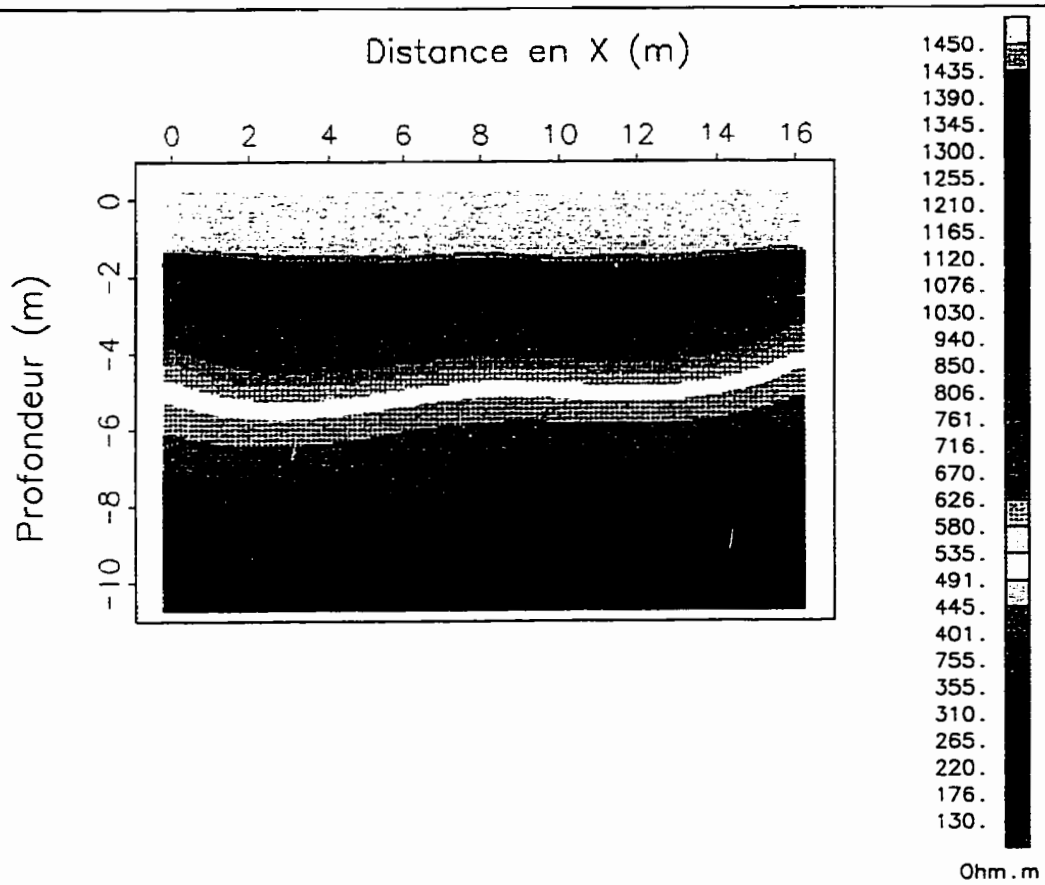


Figure 3.44: Section verticale de la structure du sous-sol obtenue par rétroprojection des données acquises sur le site de Lachenaie (état normal) pour y=8.5 m (option aire égale).

seconde avec une épaisseur variant entre 2.5-2.8 m (épaisseur moyenne 2.65 m) et de résistivité inférieure à celle-ci. Il pourrait bien s'agir de la couche de sable saturé. Enfin une troisième couche d'épaisseur indéterminée dont le toit se situe à une profondeur de 5 m environ. Celle-ci correspondrait à la couche d'argile présente dans la zone d'étude.

La **figure 3.45** donne l'image obtenue suite à la rétroprojection dans le cas **l'état perturbé** pour la même section que précédemment. Là encore nous distinguons trois couches stratifiées. La couche supérieure très résistante d'épaisseur comprise entre 1.1-2.2 m (épaisseur moyenne 1.65 m) correspondrait au sable sec de surface. La couche intermédiaire, moins résistante que la première avec une épaisseur de l'ordre de 1.5-2.6 m (épaisseur moyenne 2.05 m) pourrait être assimilée au sable saturé. La troisième couche qui s'étale à partir environ 5 m de profondeur refléterait la couche d'argile.

La détermination des interfaces entre les différentes couches pour les deux états (naturel et perturbé) est quelque peu incertaine. Mais cette ambiguïté d'interprétation se rencontre fréquemment au cours d'une prospection électrique et il est toujours souhaitable pour lever l'incertitude de disposer d'un sondage mécanique permettant d'asseoir l'interprétation. Ce désir est comblé dans le cas de cette étude, car selon les données de forage recueillies sur le site, l'épaisseur de la couche de sable sec a été estimée à 1.50 m , celle du sable saturé à 2.10 m et quant à la couche d'argile elle s'étend à partir de 3.60 m de profondeur. Ces données sont en assez bonne corrélation avec l'interprétation géophysique obtenue.

En ce qui concerne l'interprétation dans le cas de l'état perturbé, nous devons prendre en considération l'effet de l'essai de pompage qui a eu lieu dans le puits 50/20 et qui a produit un rabattement du niveau de la nappe phréatique de 0.24-0.76 m (moyenne 0.5 m). L'essai de pompage a engendré un abaissement du niveau d'eau qui a eu pour conséquence un assèchement de la couche superficielle (sable sec); de ce fait on assiste à une augmentation de son épaisseur et un rétrécissement de celle de la couche sous-jacente

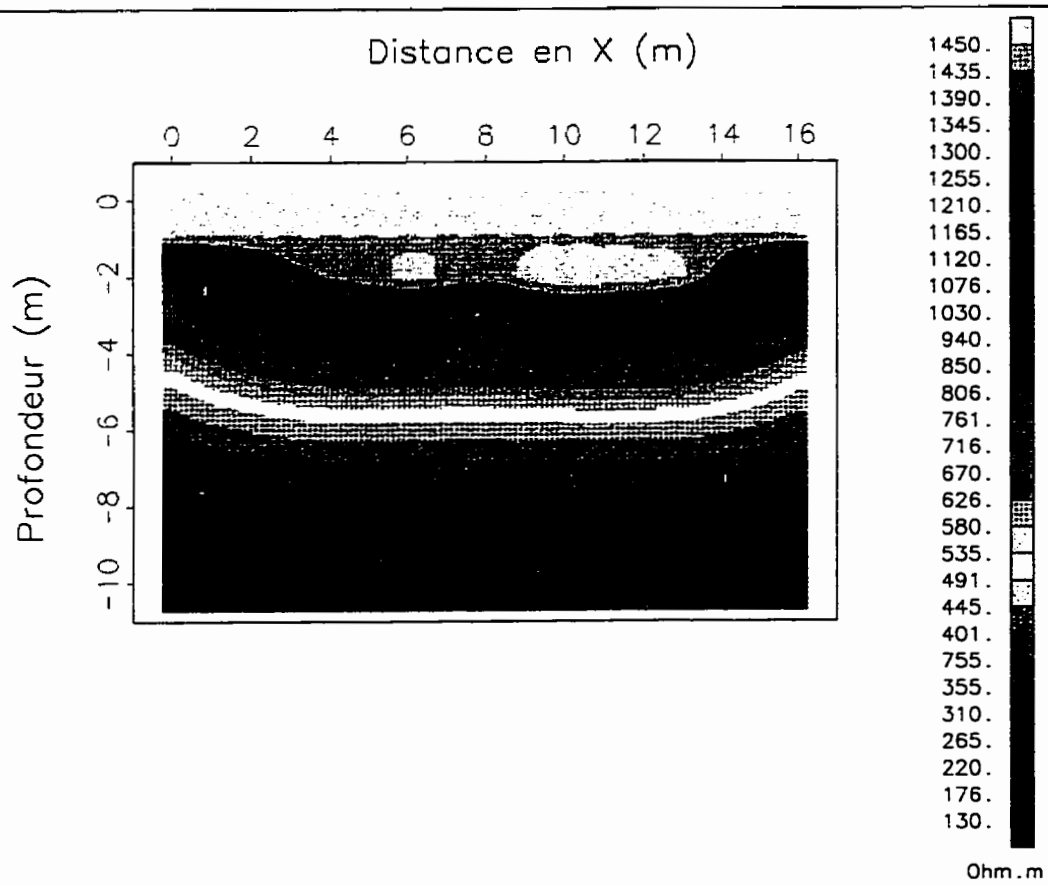


Figure 3.45: Section verticale de la structure du sous-sol obtenue par rétroprojection des données acquises sur le site de Lachenaie (état perturbé) pour y=8.5 m (option aire égale).

(sable saturé). Ce phénomène pourrait expliquer pourquoi l'interprétation géophysique donne des résultats un peu différents de ceux obtenus en trous de forage.

On s'attendait à détecter l'hétérogénéité qui aurait été crée suite à l'injection de traceurs, mais malheureusement aucune indice ne permet de localiser la présence d'une telle anomalie. Même les résultats de la reconstruction (non présentés dans ce rapport) pour d'autres sections telles que y=1.5 m, y=4.5 m, y=7.5 m, y=10.5 m et y=13.5 m n'ont pas permis de trouver la trace d'une quelconque hétérogénéité que se soit. La non détectabilité d'anomalie due aux traceurs pourrait avoir des causes multiples. D'après l'interprétation des études hydrogéologiques (s'agissant de la détectabilité des traceurs utilisés), il s'est avéré que le potassium (5000 ppm) n'était pas détectable dans le puits 50/20 parce qu'il aurait été consommé par les racines des plantes avoisinantes. Quant au lithium (1000 ppm) il a pu être détecté. La question reste de savoir pourquoi la géophysique n'a t-elle pas alors détecté le chlorure de lithium ? Une réponse probable à cette question serait que la concentration de lithium (1000 ppm) utilisée était faible pour qu'elle puisse créer une hétérogénéité de résistivité détectable. Par ailleurs on retrouve à la partie centrale de la figure deux zones résistantes à l'intérieur de la couche de sable sec; est ce là un effet superposé dû par l'essai de pompage et la présence de traceur ?

Il ressort des interprétations précédentes qu'il y a un amincissement de la couche saturée et un épaississement de la couche non-saturée dans le cas de l'état perturbé. Ce phénomène pourrait s'expliquer comme suit: le rabbatement du niveau d'eau survenu lors de l'essai de pompage a engendré un certain assèchement d'une portion de la couche saturée. Mais suite à l'arrêt des opérations d'essai de pompage et peut être aussi grâce à l'infiltration des eaux météoriques qui sont tombées lors et après le premier volet des mesures, le niveau de la nappe phréatique a dû remonter à son niveau d'antan, causant ainsi la résaturation d'une partie du sable antérieurement assèché. C'est donc la fluctuation du niveau de la nappe phréatique qui est à l'origine du phénomème décrit ci-dessus.

Les tests de terrain ont prouvé que la technique est capable de cartographier la structure du sous-sol et d'obtenir des images raisonnablement interprétables. En effet, la géométrie des structures de la zone étudiée est assez bien restituée permettant ainsi la démarcation des interfaces entre les différentes couches stratifiées. Cependant, d'une façon similaire aux résultats des modèles synthétiques, les valeurs absolues des résistivités sont mal déterminées.

CHAPITRE 4
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS

Des développements récents ont été réalisés dans les techniques de modélisation et d'inversion pour interpréter les données de résistivité. La plupart de ces techniques se prêtent à l'étude d'hétérogénéités complexes, par contre elle demandent d'énorme ressources de calcul. Il y a un besoin pour des techniques d'imagerie, plus particulièrement 3-D, capables de produire une image des hétérogénéités de résistivité du sous-sol et capables de fonctionner en un temps record (quelques secondes) sur des ordinateurs personnels.

Nous avons développé deux techniques d'imagerie (2-D et 3-D) basées sur le principe de rétroprojection avec une configuration pôle-pôle. La couverture de mesure des données d'entrée pour la technique 2-D est un profil, tandis que celle de la 3-D est une grille de type E-SCAN qui permet d'obtenir une grande quantité de données pôle-pôle.

Les techniques d'imagerie ont été appliquées avec succès sur des données synthétiques comme sur des données réelles de terrain. Les résistivités apparentes calculées, à partir des potentiels mesurés en pôle-pôle, peuvent être rétroprojetées pour obtenir l'image des structures 2-D ou 3-D.

L'efficacité de la technique 2-D à produire des images des structures de résistivité du sol a été évaluée sur des modèles simples. L'analyse des résultats obtenus pour les modèles considérés a révélé que la technique donne une image approximative correspondant à la géométrie de la distribution de résistivité du modèle initial. Les contrastes de résistivité de l'image sont cependant beaucoup moins accentués que ceux du modèle initial. Différents essais ont été réalisés pour mettre en évidence les effets de paramètres physiques et géométriques du modèle sur la reconstruction d'image. Les résultats de ces tests ont fait ressortir l'importance d'un choix optimal des paramètres du

modèle (tels que la taille de la maille de discrétisation, la longueur du dispositif, le nombre d'électrodes etc) pour obtenir une image acceptable. Le choix inadéquat de ces paramètres influe de façon négative (artéfacts, distorsion, restitution médiocre, etc.) sur la reconstruction de l'image du modèle.

Des commentaires et observations similaires à ceux de la technique 2-D sont applicables aux résultats des tests pour la technique d'imagerie 3-D. En effet la technique d'imagerie 3-D est capable de reproduire d'une manière satisfaisante des images de modèles simples. L'analyse des différentes images reconstruites permettent d'affirmer que la géométrie de la distribution de résistivité s'accorde bien avec celle du modèle initial. Mais là aussi les contrastes de résistivité sont plus faibles que ceux du modèle initial, à cause de l'inhérente approximation de Born qui suppose que le champ électrique $E \cong E_o$ ne varie que peu entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule.

D'une façon générale, la technique d'imagerie décrite et testée dans ce projet s'est révélée efficace et peut être utilisée pour obtenir des images 2-D ou 3-D des structures de résistivité. A titre d'exemple, un ensemble de données composé de 420 mesures de potentiel en surface peut être converti en image 2-D de 50x50 (x, z) cellules en 1 minute sur un PC 486 grâce à la technique d'imagerie 2-D. Dans le cas de la technique 3-D, la conversion de 600 mesures de potentiel en image 3-D de 17x17x17 (x, y, z) cellules s'obtient en 20 minutes sur PC 486 et 5 minutes sur Sun SPARCstation 5. Ces chiffres témoignent en effet à quel point les deux techniques sont relativement rapides et demandent peu d'espace mémoire. L'amélioration dans la programmation (par exemple, en tenant compte de la symétrie du dispositf dans les calculs des coefficients de sensibité) conduirait cependant à une réduction significative du temps d'ordinateur.

La technique d'imagerie développée dans ce rapport présente néanmoins certaines limites. Par exemple, le fait que les résistivités de l'image du corps et de son environnement sont beaucoup moins contrastées que celles du modèle initial.

La technique de rétroprojection de résistivité développée dans ce rapport peut procurer la géométrie de la structure du sous-sol, néanmoins les conclusions additionnelles suivantes devraient être prises en considération:

- les tests ont montré qu'on obtient une meilleure restitution des images lorsque que le corps et son milieu environnant ont des valeurs de résistivité suffisamment contrastées.
- les structures plus profondes et de petites dimensions relativement à l'écartement des électrodes produisent une restitution médiocre.
- pour des structures de tailles différentes, mais faisant intervenir le même nombre d'électrodes, la restitution sera fonction de l'écartement d'électrode utilisé. Elle est meilleure dans le cas où la grille d'électrodes assure une couverture adéquate par rapport à la taille de la structure en question.
- l'utilisation du même nombre d'électrode pour une structure donnée mais avec des espacements différents entre les électrodes a donné les conclusions suivantes: pour des espacements d'électrode trop grands ou trop petits par rapport à la structure, les images obtenues avaient une mauvaise restitution. Un choix convenable de l'espacement entre les électrodes produit une bonne restitution de l'image de la structure.
- les exemples numériques ont montré que si la grille de mesure pour dériver les résistivités apparentes (dans le cas de simulations synthétiques) n'est pas finement discrétisée, alors l'image obtenue ne serait pas bien restituée. Une grille finement discrétisée voudra dire que la largeur des mailles centrales doit être égale à, au plus, le quart de l'espacement entre les électrodes.
- Une restitution appréciable de l'image dépend entre autres de la discrétisation en cellules du modèle 2-D ou 3-D pour la reconstruction. En effet, des cellules de dimensions plus petites peuvent en principe produire des images plus détaillées, mais le processus de la rétroprojection pourrait donner des images trompeuses lorsque la taille des cellules est très petite. Shima (1992) a en effet fait la lumière sur cette question en suggérant que la taille de la cellule devrait être limitée à des dimensions pas plus petites que la moitié de l'espacement entre les électrodes. Il admet cependant que cette limitation entraîne quand

même une restitution minimum pour ce type d'imagerie de résistivité. Dans le cas de la technique développée dans ce rapport, la dimension de la cellule ne doit être plus petite que le tiers de l'espacement entre les électrodes.

- le nombre d'électrodes utilisé joue également un rôle non négligeable dans la restitution des images produites. Ainsi pour une structure et un espacement d'électrode donnés, on obtient une meilleure restitution de l'image dans le cas où le nombre d'électrodes est suffisamment élevé pour assurer une bonne couverture du sous-sol à investiguer. En principe le choix du nombre des électrodes dépend du problème à resoudre, mais nous suggérons de prendre un nombre modéré (25 à 50) afin d'éviter de longs calculs qui pourraient rendre instable le processus de la rétroprojection.
- des tests de bruit et des essais avec une distribution non homogène d'électrodes ont montré que la méthode de reconstruction est assez robuste, donnent des images des hétérogénéités proches de celles du modèle initial.
- L'usage de coefficients de sensibilité pondérés a permis de rehausser la restitution des structures plus en profondeur.
- Les artéfacts présents uniquement sur la première couche ont pu être éliminés grâce à l'utilisation des coefficients de sensibilité dits atténués.
- enfin les exemples de terrain ont démontré l'usage potentiel de la méthode E-SCAN pour des levés de résistivité (pôle-pôle) et de la technique de reconstruction développée dans cette étude pour rétroprojeter les données afin d'imager le sous-sol. Notons que la technique décrite dans ce projet est conçue pour des données collectées avec une configuration pôle-pôle; on convient alors que pour des grilles d'électrodes élevées, le temps nécessaire à l'exécution des mesures de terrain avec un résistivimètre conventionnel pourrait être un inconvénient majeur. Mais avec l'apparition sur le marché des appareils spécialisées, cette difficulté pratique peut être résolue.

RECOMMANDATIONS

Bien que la technique d'imagerie 2-D et 3-D ayant fait l'objet de cette étude a permis d'obtenir des résultats appréciables, certaines études pourraient être faites pour améliorer leur efficacité. Pour cela, on peut suggérer des recommandations qui s'orienteraient vers:

1. l'application de la technique des mesures de résistivité focalisée synthétiquement pour l'acquisition des données afin de chercher à rehausser les contrastes de résistivité de l'image du modèle.
2. la réalisation d'une série de simulations sur des modèles plus complexes serait un atout pour mieux explorer les avantages et les limites des deux techniques.
3. l'amélioration dans la programmation (tenir compte de la symétrie du problème dans le calcul des coefficients de sensibilité) pour réduire le temps d'ordinateur pour la rétroprojection des données de résistivité en espace image 3-D.

RÉFÉRENCES

APPARAO, A. et GANGADHARA, T. (1974). Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes. Geophysical Prospecting, 22, 211-223.

APPARAO, A. et ROY, A. (1971). Resistivity model experiments. Geoexploration, 9, 195-198.

APPARAO, A. et ROY, A. (1973). Field results for d.c. resistivity profiling with two-electrode array. Geoexploration, 11, 41-43.

BARBER, D.C. et BROWN, B.H. (1984). Applied potential tomography. J. Phys. E: Sci.Instrum. 17, 723-733.

BARKER, R.D. (1980). Applications of geophysics in groundwater investigations. Water Serv., 84, 489-492.

BARKER, R.D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, 54, 8, 1031-1037.

BARKER, R.D. (1990). Improving the quality of resistivity sounding data in landfill studies: In S.H. Ward (ed). Geotechnical and Environmental Geophysics, 2, 245-251, SEG, Tulsa, Oklahoma.

BARKER, R. (1992). A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break, 10, 2, 53-62.

BHATTACHARYA, B.B. et SEN, M.K. (1981). Depth of investigation of collinear electrode arrays over homogeneous anisotropic half-space in direct current methods. Geophysics, 46, 5, 768-780.

COGGON, J.H. (1971). Electromagnetic and Electrical Modeling by the Finite Element Method. Geophysics, 36, 1, 132-155.

DAHLIN, T. (1993). On the automation of 2-D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Ph.D thesis, ISBN 91 -1032-4, Lund University, 187.

DAHLIN, T., JOHANSSON, S. et LANDIN, O. (1994). Resistivity Surveying for Planning of Infrastructure. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP ' 94, 1, March 27-31, 1994, 509-527.

DAS, U.C. et PARASNIS, D.S. (1987). Resistivity and induced polarization responses of arbitrarily shaped 3-D bodies in a two-layered earth. Geophys. Prosp., 35, 98-109.

DAS, U.C. et VERMA, S.K. (1980). Digital linear filter for computing type curves for the two-elctrodes system of resistivity sounding. Geophysical Prospecting, 28, 610-619.

DEY, A. et MORRISON, H.F. (1979). Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 106-136.

DEY, A. et MORRISON, H.F. (1979). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. Geophysics, 44, 4, 753-780.

DIETER, K., PATERSON, N.R. et GRANT, F.S. (1969). IP and resistivity type curves for three-dimensional bodies. Geophysics, 34, 615.

DRASKOVITS, P. et FEJES, I. (1990). Near-surface groundwater research and protection from surface pollution. Geotechnical and Environmental Geophysics, 2, Soc. Expl. Geophys., 333-337.

ELLIS, R.G. et OLDENBURG, D.W. (1994). The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach. Geophysical J. Int., 119, 187-194.

GORHAN, H.L. (1976). The determination of the saline/fresh water interface by resistivity soundings. Bull. Ass. Eng. Geol, 13, 163.

GRIFFITHS, D.H. et BARKER, R.D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology, Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

GRIFFITHS, D.H. et BARKER, R.D. (1994). Electrical imaging in archaeologic. Journal of Archaeological Science, 21, 153-158.

GRIFFITHS, D.H. et TURNBULL, J. (1985). A multi-electrode array for resistivity surveying. First Break, 7, 16-20.

HAGMEYER, T.R. et STEWART, M. (1990). Resistivity investigations of salt-water intrusion near a Major Sea-level Canal. Geotechnical and Environmental Geophysics, 2, 343.

JACKSON, P.D. (1981). Focussed electrical resistivity arrays: some theoritical and practical experiments. Geophysical Prospecting, 29, 601-626.

JACOBS, F. (1995). Earth Resistivity Tomography (ERT) and Cavity Investigation. Environmental and Engineering Geophysics, EEGS European Section 1 st Meeting, Torino, Italy September, 25-27 th, 154-157.

JAIN, S.C., KUMAR, R. et ROY, A. (1973). Some results of experimental geophysical surveys for location of ancient gold workings, Kolar, India. Geophysical Prospecting, 21, 229-242.

JAIN, S.C. et REDDY, B.S. (1977). Experimental resistivity surveys for bauxite prospecting at Amarkantak, M.P., Technical Report, NGRI, Hyderabad, India.

JORGE, O. PARRA. et THOMAS E. OWEN, (1990). Synthetically focused resistivity for detecting deep targets. Geotechnical and Environmental Geophysics, 3, Soc. Expl. Geophys., 37-50.

KUMAR, R. (1974). Direct interpretation of two-electrode resistivity soundinds. Geophysical Prospecting, 22, 224-237.

KUMAR, R. (1977). Development of some interpretation techniques in D.C. resistivity methods. Ph.D. thesis, Indian School of Mines, Dhanbad.

LABRECQUE, D.J. et MORELI, G. (1995). Advances in ERT Interpretation Methods. Environmental and Engineering Geophysics, EEGS European Section 1 st Meeting, Torino, Italy September, 25-27 th, 344-348.

LEHMANN, H. (1995). Potential representation by independent configuration on a multi-electrode array. Geophys. J. Int., 120, 331-338

LI, Y. et OLDENBURG, W. (1992). Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. Geophys.J.Int., 109, 343-362.

LI, Y. et OLDENBURG, W. (1994). Inversion of 3-D DC resistivity data using an approximate inverse mapping. Geophys.J.Int., 116, 527-537.

LINES, L.R. et TREITEL, S. (1984). Tutorial: A review of Least-Squares Inversion and its application to geophysical problems. Geophysical Prospecting, 32, 159-186.

LOHNBERG, A. et STERN, W. (1932). Ein neuer Weg der karshydrologischen forschung durch Anwendung geoelektricher methoden. Ztschr. fur Geophysik, 8, 283-305.

LOKE , M.H. et BARKER, R.D. (1994). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections. Paper presented at the 54 th Annual E.A.E.G. Meeting, Vienna, Austria.

LOKE , M.H. et BARKER, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics, 60, 1682-1690.

LOKE , M.H. et BARKER, R.D. (1996). Practicle techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting, 44, 499-523.

LOWRY, T., ALLEN, M.B. et SHIVE, N. (1989). Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. Geophysics, 54, no.6, 766-774.

LUGEON, M. et OULIANOFF, U. (1939). L'alluvion du Rhône valaisan. Essai de détermination de l'épaisseur par la méthode électrique. Bulletin des laboratoires de géologie, géographie physique et paléontologie, Lausane, Bulletin no. 64.

LYTLE, R.J. et HANSON, J.M. (1983). Electrode configuration influence on resistivity measurements about spherical anomaly. Geophysics, 48, 8, 1113-1119.

MADDEN, T.R. et SWIFT, C.M., Jr. (1969). Magnetotelluric studies of the electrical conductivity structure of the crust and upper mantle, in the earth's crust and upper mantle. Geophys. Mono, 13, Am. Geophys. Union, 469-479.

MAILLET, R. et Charin F. (1933). Les méthodes de la géophysique appliquées aux recherches minières et au génie civil. Bulletin de la Société belge des ingénieurs et industriels, no.7, 36.

MEYER DE STADELHOFEN, C. (1991). Applications de la géophysique aux recherches d'eau. Lavoisier TEC et DOC, Paris, 183.

MORELLI, G. et LABRECQUE, D.J. (1995). Occam's inversion of 3D ERT field data. Environment and Engineering Geophysics (Proceedings) EEGS European Section, 1st Meeting, Torino, Italy, September, 25-27 th, 351-354.

MUNDRY, E. (1984). Geoelectrical model calculations for two-dimensional resistivity distributions. Geophys. Prosp., 32, 124-131.

NELY, G. (1989). Les séries à évaporites en exploration pétrolière, 2 méthodes géophysiques. Greco 52 (CNRS), 198.

NOEL, M. et WALKER, A.R. (1990). Development of an electrical resistivity tomography system for imaging archaeological structures. Archaeometry, 32, 767-776.

NOEL, M. et XU, B. (1991). Archeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. Geophys.J.Int, 107, 95-102.

OKABE, M. (1981). Boundary element method for the arbitrarily inhomogeneities problem in electrical prospecting. Geophys. prosp., 29, 39-59.

PARK, S.K. et VAN, G. (1991). Inversion of pôle-pôle data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. Geophysics, 56, 7, 951-960.

PARKER, R.L. (1984). The inverse problem of resistivity sounding. Geophysics, 49, 12, 2143-2158.

PARRA, O.J. et OWEN, E.T. (1990). Synthetically focused resistivity for detecting deep targets. Geotechnical and Environmental Geophysics, 3, Soc. Expl. Geophys., 37-50

POWELL, H.M., BARKER, D.C. et REESTON, I.L. (1987). Impedance imaging using linear electrode arrays. Clin. Phys. Physio. Meas. Suppl. A, 8, 109-118.

PRIDMORE, D.F., HOHMANN, G.W., WARD, S.H. et SILL, W.R. (1981). An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. Geophysics, 46, 7, 1009-1024.

QUERALT, P., POUS, J. et MARCUELLO, A. (1991). 2-D resistivity modeling: An approach to arrays parallel to the strike direction. Geophysics, 56, 7, 941-950.

ROSS, H.P., MACKELPRANG, C.E.et WRIGHT, P.M. (1990). Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites. Geotechnical and Environmental Geophysics, 2, 343

ROTHÉ, E. et ROTHÉ, J.P. (1952). Prospection géophysique. Gauthier-Villars, 2, 714.

ROY, A. et APPARAO, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, 36, 5, 943-959.

ROY, A. (1972). Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods. Geophysical Prospecting, 20, 329-340.

SAKAYAMA, T. et SHIMA, T. (1988). High resolution two-dimensional resistivity inversion technique using alpha centers. Electromagnetics, 1.3, 47-49.

SANTOSA, F. et VOGELIUS, M. (1990). A backprojection algorithm for electrical impedance imaging. SIAM J. APPL. MATH, 50, 1, 216-243.

SASAKI, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-463.

SASAKI, Y. (1994). 3-D resistivity inversion using the finite-element method. Geophysics, 59, 11, 1839-1848.

SHIMA, H. (1990). Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers. Geophysics, 55, 6, 682-694.

SHIMA, H. (1992). 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. Geophysics, 57, 10, 1270-1281.

SHIMA, H. et SAKAYAMA, T. (1988). Resistivity tomography: An approach to 2-D resistivity inversion problem. Electromagnetics, 1.4, 59-61

STEFANESCU, S. et STEFANESCU, D. (1974). Mathematical models of conducting ore bodies for direct current electrical prospecting. Geophys. Prosp., 22, 246-260.

SWIFT, C.M., Jr. (1971). Theoretical magnetelluric and Turam response from two-dimensional inhomogeneities. Geophysics, 36, 38-52.

TELFORD, W.M., GELDART, L. et SHERIFF, R.E. (1993 Second Edition). Applied Geophysics, Cambridge University Press, 770.

TRIPP, A.C., HOHMANN, G.W. et SWIFT, C.M. (1984). Two-dimensional resistivity inversion. Geophysics, 49, no.10, 1708-1717.

VAN DAM, J.C. et MEULENKAMP, J.J. (1967). Some results of the geoelectrical resistivity method in groundwater investigations in the Netherland. Geophys. Prosp., 15, 92-115.

XU, B. et NOEL, M. (1993). On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity surveys. Geophys. Prospect., 41, 791-801.

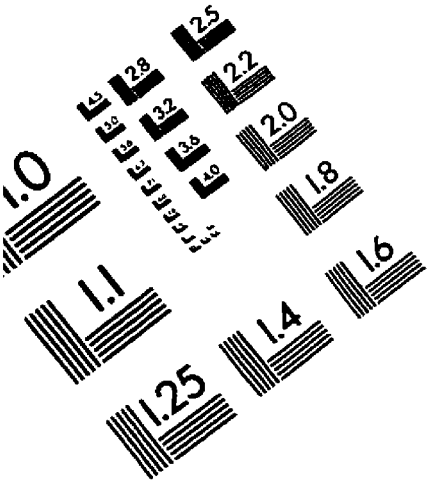
ZHANG, J., MACKIE, R.L. et MADDEN, T.R. (1995). 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. 64th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, Soc. Expl. Geophysics, 377-380.

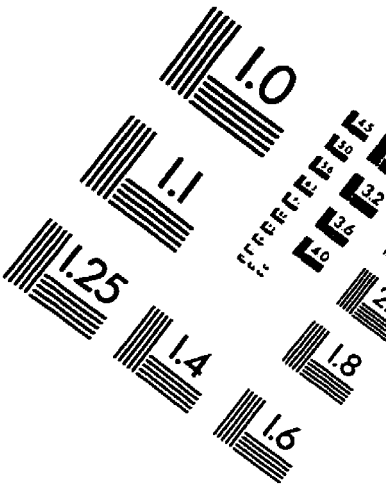
ZHANG, J., MACKIE, R.L. et MADDEN, T.R. (1995). 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. Geophysics, 60, no.5, 1313-1325.

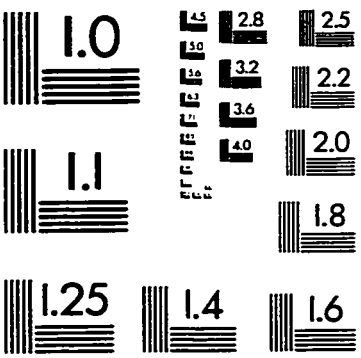
ZOHDY, A.A.R. (1969). The use of Schlumberger and equatorial soundings in groundwater investigations near El Paso, Texas. Geophysics, 34, 713-728.

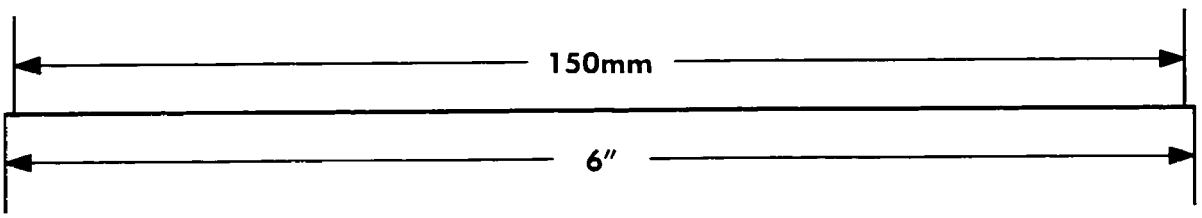
ZOHDY, A.A.R. (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner souding curves. Geophysics, 54, no.2, 245-253.

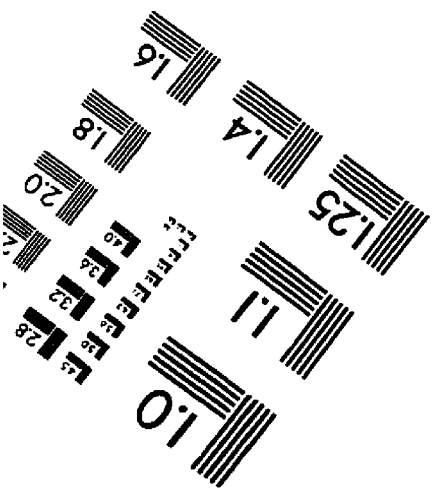
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

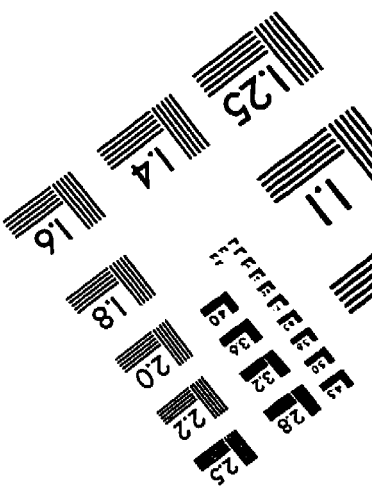












APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved