UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION ET INTERPRÉTATION DE TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ET DE POLARISATION PROVOQUÉE ENTRE TROUS DE FORAGE

ISABELLE D'AMOURS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 1998

© Isabelle D'Amours, 1998.

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.

0-612-38672-4

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

MODÉLISATION ET INTERPRÉTATION DE TOMOGRAPHIE DE RÉSISTIVITÉ ET DE POLARISATION PROVOQUÉE ENTRE TROUS DE FORAGE

présenté par: D'AMOURS, Isabelle

en vue de l'obtention du diplôme de: Maître ès science appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. VALLÉE Marc A., Ph.D., membre

Je dédie cette thèse à mon mari Stéphane pour son soutien et encouragement ainsi qu'à mes parents Ginette et Réal qui m' ont toujours incité à poursuivre mes objectifs autant personnels qu'académiques.

Remerciements

Je remercie mon directeur Michel Chouteau, Pierre Bérubé de Val d'Or SAGAX pour le support financier et technique. Je remercie également Klaus Spitzer pour son aide et son assistance quant à l'utilisation de ses programmes de modélisation. Je tiens aussi à souligner la contribution du CRSNG par le biais d'une bourse CRSNG à incidence industielle.

Résumé

La méthode de tomographie électrique entre trous de forage a été étudiée. Une première étape de modélisation a été réalisée à l'aide du programme 3ddc de Klaus Spitzer afin d'étudier les réponses obtenues pour des situations simples avec deux trous verticaux et pour des situations plus complexes à trous inclinés en résistivité et en polarisation provoquée. Nous avons observé que pour des corps à extension latérale importante, la présence d'un corps conducteur sera marquée par un baisse de résistivité pour les électrodes d'injection et de mesure à proximité du corps. Par contre, si un corps d'extension latérale limitée est présent, la réponse inverse, c'est-à-dire une hausse de la résistivité pourrait être observée. La modélisation a également démontré que la géométrie des trous et de la cible ainsi que les contrastes de résistivité affectent grandement la réponse obtenue pour un levé.

Une technique d'imagerie basée sur le principe de rétroprojection a été développée pour des données de résistivité et de chargeabilité acquises avec la configuration pôle-pôle entre trous de forage. La technique a été appliquée sur des données synthétiques et réelles de terrain. Des images de sections 2-D ont été obtenues. L'efficacité de la

technique de rétroprojection sur des sections 2-D est démontrée pour des structures 1-D ou 2-D. Les tests ont démontré que l'imagerie est meilleure si les corps sont approximativement perpendiculaires aux trous de forage et que leur épaisseur par rapport à l'espacement des trous et l'espacement des électrodes est suffisante.

Les résultats de l'application de la technique de rétroprojection sur des données tomographiques en forage réelles obtenues aux sites de Selbaie et McConnell sont assez bien correlés avec les sections géologiques connues.

La technique d'imagerie par rétroprojection est rapide. La durée du calcul pour un ensemble de 768 mesures de potentiel et 4941 cellules de rétroprojection est d'environ 10 minutes sur un Pentium 133 MHz.

Abstract

The cross-borehole electrical tomography method has been studied. Synthetic models were calculated with Klaus Spitzer's 3ddc finite-difference program to study responses in resistivity and induced polarization for simple models with vertical holes and more complex situations with inclined boreholes. It was observed that for bodies with an important strike length, the presence of a conductor between holes is marked by a decrease in resistivity. However, if a conductive body has limited strike extent, the inverse response, i. e. an increase in resistivity, may be observed. The synthetic models demonstrated the important effect of borehole and target geometry as well as resistivity contrasts on the cross-borehole measurements.

An imaging technique based on the backprojection method was developped for resistivity and chargeability data acquired using the cross-borehole pole-pole configuration. The technique was applied to synthetic and field data. Images of 2-D sections were obtained. The efficiency of the backprojection technique for 2-D sections is demonstrated for 1-D and 2-D structures. The tests show that the imaging is better when the bodies are approximatively perpendicular to the boreholes and that their

thickness is sufficient relatively to the borehole spacing.

The results of the backprojection technique applied to field data obtained at the Selbaie and McConnell sites generally fit the geological sections.

Imagery with the backprojection technique is fast. Processing time for a set of 768 potential data and 4941 backprojection cells on a Pentium 133 MHz PC is of about 10 minutes.

Table des matières

Dédicace iv

Remerciements v

Résumé vi

Abstract viii

Table des matières x

Liste des figures xiii

Liste des tableaux xxi

Liste des sigles et abréviations xxii

Liste des annexes xxiv

Introduction 1

1 Principes de base des méthodes de résistivité et de polarisation

provoquée **4**

1.1 Définitions 4

1.2 Revue de la littérature 9

2 Propriétés physiques des cibles **18**

3 Modélisation **24**

3.1 Modèles simples 24

3.1.1 Trous verticaux 24

3.2 Modèles complexes 38

3.2.1 Sulfures massifs 38

3.2.2 Or disséminé 41

3.2.3 Gisements de nickel et cuivre d'extensions latérales variables 44

4 Rétroprojection **49**

4.1 Calcul des coefficients de sensibilité 55

4.2 Distribution des sensibilités 59

4.2.1 Sensibilités totales pour un milieu homogène 59

4.2.2 Coefficients de sensibilité totaux pour des milieux non-homogènes 62

4.3 Programme de rétroprojection 65

4.4 Résultats de rétroprojection 68

4.4.1 Modèles simples 68

4.4.2 Modèles complexes 77

4.5 Discussion des résultats de rétroprojection 85

5 Applications aux sites de Selbaie et McConnell 89

5.1 Cas Selbaie 89

5.2 Cas McConnell 98

Discussion et conclusions 109

Liste des figures

1.1 Illustration des distances r et r'. 5

1.2 Combinaisons de mesures effectuées lors d'un levé tomographique entre trous de forage. 8

3.1 Grille et configuration pour neuf premiers modèles simples: la résitivité du corps est de 1 Ωm et sa chargeabilité de 50 mV/V, le fond étant fixé à 1000 Ωm et 0 mV/V. 25

3.2 Courbes des résistivités apparentes pour une couche conductrice et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90. 26

3.3 Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche conductrice et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90. 26

3.4 Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 2-D conducteur et chargeable. 27

3.5 Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D conducteur et chargeable. 27

3.6 Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D conducteur et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous). 28

3.7 Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D conducteur et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous). 28

3.8 Courbes des résistivités apparentes pour une couche résistante et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90 ayant une résistivité de 1000 Ωm dans un milieu de 100 Ωm. 29

3.9 Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche résistante et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90 ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V. 29

3.10 Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 2-D résistant et chargeable ayant une résistivité de 1000 Ωm dans un milieu de 100 Ωm. . . 30

3.11 Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D résistant et chargeable ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V. 30

3.12 Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D résistant et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous) ayant une résistivité de 1000Ωm dans un milieu de 100 Ωm. 31

3.13 Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 3-D résistant et chargeable (extension latérale de 100 m, placé symétriquement entre les trous) ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V. 31

3.14 Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité située entre les profondeurs 60 et 90. 32

3.15 Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité. 32

3.16 Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 3-D chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous). 33

3.17 Courbes des résistivités apparentes pour une couche résistante et chargeable de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m. 34

3.18 Courbes de chargeabilités apparentes pour une couche résistante chargeable de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m. 34

3.19 Courbes des résistivités apparentes pour une couche mince conductrice et chargeable inclinée avec des trous séparés de 100 m. 35

3.20 Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche mince conductrice et chargeable inclinée avec des trous séparés de 100 m. 35

3.21 Modèle représentant un gisement de sulfures massifs. 39

3.22 Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de sulfures massifs. 40

3.23 Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de sulfures massifs. 40

3.24 Modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée. 42

3.25 Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée. 43

3.26 Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée. 43

3.27 Modèle représentant un gisement de nickel et cuivre. 45

3.28 Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 84 m. . . . 46

3.29 Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 84 m. . . . 46

3.30 Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 140 m. . . . 47

3.31 Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 140 m. . . . 47

3.32 Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 196 m. . . . 48

3.33 Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 196 m. . . . 48

4.1 Illustration des variables et discrétisation utilisée en rétroprojection. . 56

4.2 Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un milieu homogène. 61

4.3 Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour une couche conductrice (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m). 63

4.4 Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un bloc conducteur 2-D (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m). 64

4.5 Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un bloc conducteur 3-D (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m). 64

4.6 Rétroprojection des résistivités apparentes d'un corps conducteur et chargeable 2-D(courbes de la figure 3.4). 70

4.7 Rétroprojection des chargeabilités apparentes d'un corps conducteur et chargeable 2-D(courbes de la figure 3.5). 70

4.8 Rétroprojection des résistivités apparentes d'une couche conductrice et chargeable. (courbes de la figure 3.2) 71

4.9 Rétroprojection des chargeabilités apparentes d'un couche conductrice chargeable (courbes de la figure 3.3). 71

4.10 Rétroprojection des résistivités apparentes du bloc 3-D conducteur et chargeable (courbes de la figure 3.6). 72

4.11 Rétroprojection des résistivités apparentes du bloc 3-D conducteur et chargeable (courbes de la figure 3.7). 72

4.12 Rétroprojection des résistivités apparentes du corps conducteur et chargeable 2-D mais avec les électrodes 10 à 80 seulement. 73

4.13 Rétroprojection des chargeabilités apparentes du corps conducteur chargeable 2-D mais avec les électrodes 10 à 80 seulement. 73

4.14 Rétroprojection des résistivités apparentes pour une couche résistante de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m. 75

4.15 Rétroprojection des chargeabilités apparentes pour une couche résistante de 80 m d'épaisseur des trous séparés de 100 m. 75

4.16 Rétroprojection des résistivités apparentes pour une couche mince conductrice inclinée avec des trous séparés de 100 m. 76

4.17 Rétroprojection des chargeabilités apparentes pour une couche mince conductrice inclinée avec des trous séparés de 100 m. 76

4.18 Rétroprojection des résistivités apparentes. 78

4.19 Rétroprojection des chargeabilités apparentes. 78

4.20 Rétroprojection des résistivités apparentes. 80

4.21 Rétroprojection des chargeabilités apparentes. 80

4.22 Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 84 m). 82

4.23 Rétroprojection des chargeabilités apparentes (extension latérale de 84 m). 82

4.24 Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 140 m). 83

4.25 Rétroprojection des chargeabilités apparentes (extension latérale de 140 m). 83

4.26 Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 196 m). 84

4.27 Rétroprojection de chargeabilités apparentes (extension latérale de 196 m). 84

5.1 Section géologique à Selbaie des trous où le levé a été réalisé. 91

5.2 Résultats du levé de résistivité effectué à Selbaie. 92

5.3 Résultats du levé de chargeabilité effectué à Selbaie. 93

5.4 Rétroprojection des résultats du levé de résistivité effectué à Selbaie. 94

5.5 Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité effectué à Selbaie. 95

5.6 Section géologique à McConnell où le levé a été réalisé. 99

5.7 Résultats du levé de résistivité avec injection dans le trou 78929 et mesure du potentiel dans le trou 78930 effectué au site de McConnell. 100

5.8 Résultats du levé de chargeabilité avec injection dans le trou 78929 et mesure du potentiel dans le trou 78930 effectué au site de McConnell. 100

5.9 Résultats du levé de résistivité avec injection dans le trou 78930 et mesure du potentiel dans le trou 80578 effectué au site de McConnell. 101

5.10 Résultats du levé de chargeabilité avec injection dans le trou 78930 et mesure du potentiel dans le trou 80578 effectué au site de McConnell. 101

5.11 Rétroprojection des résultats du levé de résistivité pour les trous 78929 et 78930. 102

5.12 Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité pour les trous 78929 et 78930. 102

5.13 Rétroprojection des résultats du levé de résistivité pour les trous 78930 et 80578. 103

5.14 Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité pour les trous 78930 et 80578. 104

5.15 Rétroprojection combinée des résultats du levé de résistivité du site McConnell. 105

5.16 Rétroprojection combinée des résultats du levé de chargeabilité du site McConnell. 106

Liste des tableaux

2.1 Synthèse des propriétés électriques des gisements. 19

2.2 Résistivités des roches encaissantes (Ωm). 22

2.3 Chargeabilités des roches encaissantes (mV/V). 22

2.4 Résistivités des recouvrements (Ωm). 23

2.5 Chargeabilités des recouvrements (mV/V). 23

4.1 Résumé des résultats de modélisation et rétroprojection 87

Liste des sigles et abréviations

FE : effet fréquence

$\mathbf{H}$: inverse généralisée de $\mathbf{J}$

I : intensité du courant

$\mathbf{j}$: densité de courant

$\mathbf{J}$: matrice Jacobienne des dérivée partielles

$\mathbf{H}$: inverse généralisée de $\mathbf{J}$

K_g : constante géométrique fonction des distances source-récepteur

m : chargeabilité

m_a : chargeabilité apparente

m_i : chargeabilité d'une cellule i

Φ : sensibilité en courant direct

ρ : résistivité

ρ_a : résistivité apparente

ρ'_a : résistivité apparente calculée à partir du voltage secondaire

ρ_{ca} : résistivité apparente mesurée en hautes fréquences

ρ_{cd} : résistivité apparente mesurée en courant direct

r : distance à la source

r' : distance à la source-image

σ : conductivité

σ_i : conductivité d'une cellule i

σ' : conductivité en présence d'un voltage secondaire

τ_i : volume perturbé

V : voltage ou potentiel

V' : voltage secondaire

V^* : position de l'électrode de potentiel "image"

V_c : voltage observé lors de l'injection de courant

$\mathbf{W}$: matrice diagonale de pondération

Liste des annexes

A Résultats des diagraphies effectuées à McConnell 123

Introduction

L'exploration de nouveaux gisements de sulfures disséminés et d'or nécessitent le développement de nouvelles méthodes géophysiques adaptées aux conditions géologiques d'exploration contemporaine. En effet, les gisements situés en grande profondeur à l'intérieur des camps miniers offrent désormais un plus grand potentiel économique que les gisements à plus faible profondeur déjà largement exploités.

Le mot tomographie est dérivé du grec tomos qui signifie tranche ou coupe. Ce terme veut donc dire "imager les tranches d'un objet". Le but de la tomographie est donc l'imagerie des propriétés d'un médium à partir de séries de mesures effectuées autour et à l'intérieur de celui-ci. La tomographie électrique de résistivité et de polarisation provoquée est une méthode utilisée pour déterminer la distribution de ces propriétés dans un volume à partir de mesures de voltage et de temps de décharge à l'intérieur ou à la surface de ce volume.

En tomographie électrique on veut imager le sous-sol. Les cibles courantes en méthodes électriques sont les gisements de minerais métalliques ou des nappes d'eau souterraines contaminées. Ces cibles ont des particularités intéressantes, elles sont

conductrices, et même, dans le cas des gisements métallifères, chargeables. En tomographie entre trous de forage, on augmente la profondeur d'investigation, on peut ainsi obtenir des gains appréciables en termes de coûts d'exploration car on augmente la rentabilité des trous de forage qui ont manqué leur cible. De plus, la tomographie entre les trous de forage augmente la résolution en s'affranchissant des problèmes de recouvrements conducteurs (mort-terrain, tourbières et latérites par exemple).

Mon projet est constitué de quatre principaux volets: en un premier temps, j'ai effectué une étude sur les propriétés physiques des cibles qui me permet ensuite d'effectuer une modélisation géologiquement plausible et qui peut servir d'outil aidant à l'interprétation. Le second volet de mon projet consiste en la modélisation de réponses en levé tomographique en forage de cas simples et de cas plus complexes et plus réalistes à l'aide d'un logiciel de modélisation par différences finies développé par Klaus Spitzer (1995). Le volet suivant consiste dans le développement d' un programme qui utilise la distribution des contributions en milieu homogène pour effectuer une rétroprojection des résistivités apparentes et des chargeabilités apparentes. La rétroprojection effectue, en sorte, une pondération statistique de l'importance (contribution) d'une cellule dans un volume investigué d'après sa position par rapport aux électrodes sur la valeur de résistivité ou de chargeabilité mesurée. La contribution de la cellule est déterminée à l'aide des principes de distribution de courant dans un demi-espace homogène. Avec la rétroprojection, on peut effectuer une imagerie approximative du volume entre les trous de forage de façon très rapide et nécessitant

peu de mémoire informatique. Finalement, le dernier volet du projet est l'étude de levés tomographiques réels effectués aux sites de la Mine Selbaie et de McConnell pour fins d'interprétation.

Chapitre 1

Principes de base des méthodes de résistivité et de polarisation provoquée

1.1 Définitions

Les méthodes électriques de résistivité et de polarisation provoquée utilisent une injection dans le sol de courant à l'aide d'électrodes.

La résistivité apparente mesurée au point P lorsque la source est en surface est:

$$\rho_a = \frac{2\pi V_P r}{I} \tag{1.1}$$

où V_P est le voltage mesuré en volts, I est le courant injecté en ampères, r est la distance entre le point P et le point d'injection de courant en mètres et ρ_a s'exprime en Ωm.

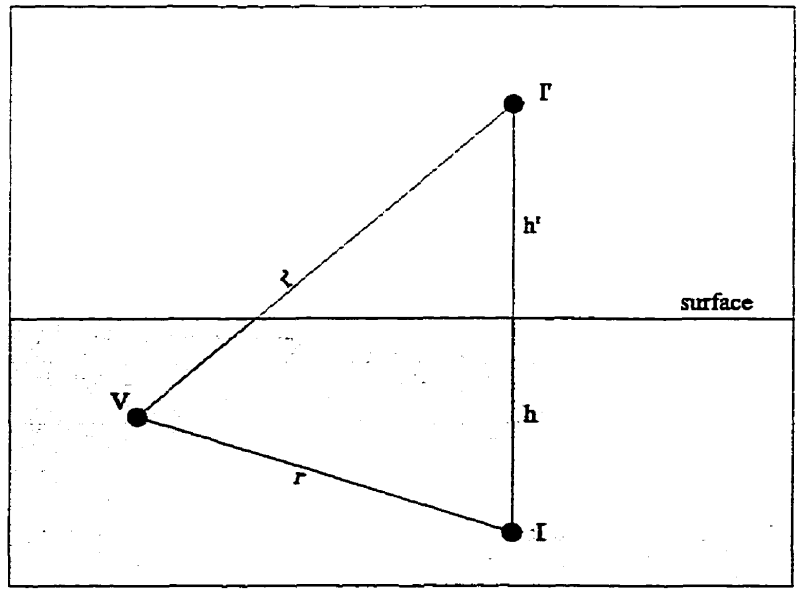


Figure 1.1: Illustration des distances r et r'.

Lorsque la source est en profondeur:

$$\rho_a = \frac{4\pi V_P}{I}\left(\frac{1}{1/r + 1/r'}\right) \tag{1.2}$$

r' étant la distance du point P à une source imaginaire qui serait réfléchie par l'interface crée par la surface où $h = h'$ tel qu'illustré à la figure 1.1 (Parasnis, 1986).

L'effet de polarisation provoquée est généré lorsqu'un courant ionique est transformé en courant d'origine électronique à l'interface de minéraux métalliques présents et en contact avec le fluide dans les pores de la roche. Lorsque l'émetteur injecte un courant dans le sol, les ions se collent sur les parois métalliques, ne pouvant les traverser. Après la coupure du courant les ions reprennent leur état d'équilibre puisque le courant qui les retenait sur la surface métallique est coupée. Le récepteur mesure la variation dans le temps de ce phénomène, lors de la décharge (Sumner, 1976).

La chargeabilité est un paramètre mesuré en polarisation provoquée qui correspond à la capacité du sol à retenir l'énergie sous forme électrochimique. Ce phénomène appelé polarisation d'électrode sera d'autant plus important que la surface totale des interfaces entre les grains conducteurs et l'électrolyte sera grande. C'est ce qui explique les fortes réponses en polarisation provoquée de la minéralisation disséminée. Notons également que si la roche est très peu fracturée (roches granitoïdes très saines par exemple) aucun effet de polarisation provoquée ne sera perçu, même en présence de minéraux métalliques puisqu'il y a absence de voies d'accès pour l'électrolyte.

Les mesures de polarisation provoquée peuvent être faites en domaine transitoire ou en domaine fréquentiel. Le voltage est alors mesuré respectivement en fonction du temps ou de la fréquence.

Mesures en domaine transitoire

1. La méthode la plus simple de mesurer la chargeabilité en domaine transitoire est de comparer le voltage résiduel $V(t)$ existant à un temps t suivant l'interruption du courant avec le voltage total V_c observé lors de l'injection de courant. Puisque $V(t)$ est beaucoup plus petit que V_c, cette mesure est exprimée en mV/V.

2. L'équipement disponible permet également de mesurer le potentiel intégré sur un intervalle de la décharge. Le temps d'intégration est court et la courbe est échantillonnée en plusieurs points. Ceci est comparable à la mesure obtenue en (1); de plus, on peut observer la forme de la courbe de décharge.

La chargeabilité est alors définie comme:

$$m = \frac{1}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt \tag{1.3}$$

Mesures en domaine fréquentiel

En polarisation provoquée fréquentielle, on mesure la résistivité apparente à deux fréquences différentes. On définit l'effet fréquence comme:

$$FE = \frac{\rho_{cd} - \rho_{ca}}{\rho_{ca}} \tag{1.4}$$

où ρ_{cd},ρ_{ca} sont les résistivités apparentes mesurées en courant direct et à haute fréquence.

En tomographie électrique en forage, on effectue plusieurs injections de courant à différentes profondeurs dans un trou de forage et on mesure la résistivité et la chargeabilité (voir figure 1.2) dans un trou avoisinant en divers points de réception. Par la suite, on tente d'interpréter ce qu'il y a entre les deux trous à l'aide de cette série de mesures.

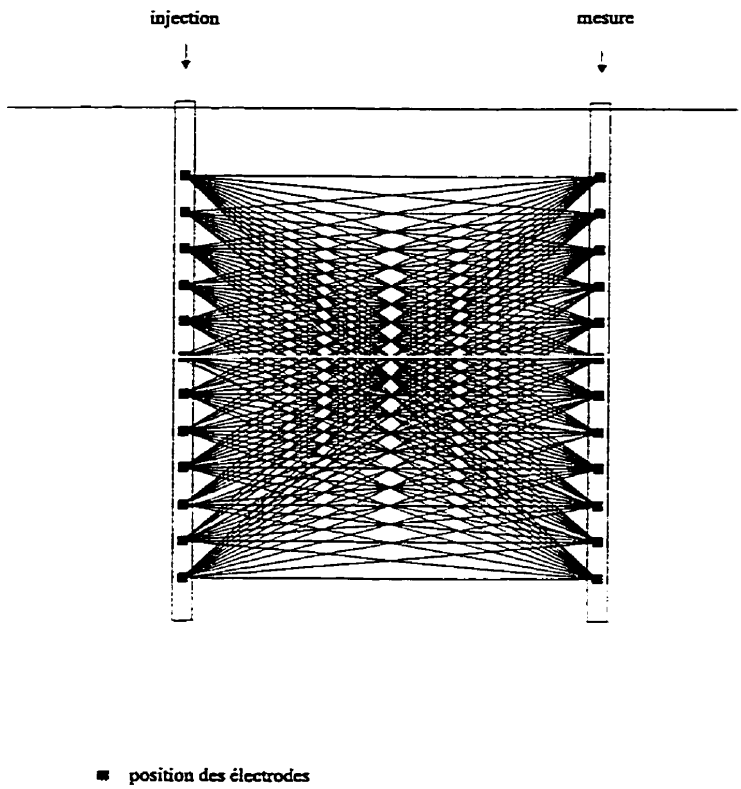


Figure 1.2: Combinaisons de mesures effectuées lors d'un levé tomographique entre trous de forage.

1.2 Revue de la littérature

L'imagerie tomographique est une technique qui a révolutionné le génie biomédical dans le début des années soixantes. Depuis, ces principes ont été appliqués dans plusieurs domaines scientifiques dont la géophysique. En effet, l'imagerie tomographique a été utilisée en sismique et en électromagnétisme (Dines et Lytle, 1979). La méthode simple d'inversion tomographique est la rétroprojection des données par intégration sur une trajectoire rectiligne. Toutefois, les courants électriques ne se propagent pas de façon rectiligne. Le problème de l'imagerie électrique exacte est donc non-linéaire.

Différentes techniques d'imagerie par inversion ont été utilisées pour interpréter les levés tomographiques électriques. Auparavant toutefois, il est primordial de s'attarder à l'étape de modélisation pour comprendre les principes qui régissent les méthodes de géophysique électrique, sans lesquels il est impossible d'effectuer l'inversion.

La modélisation consiste à calculer la réponse à un modèle comportant certains paramètres préalablement définis lorsque l'on soumet le système à certaines conditions. En géophysique électrique, on introduit un courant direct ou alternatif dans le système. La réponse géophysique peut se calculer de deux façons principales. On peut dériver une solution analytique ou une solution numérique.

La solution analytique est possible seulement pour des modèles uni-dimensionnels (1-D); soit des couches horizontales, un cylindre ou une sphère, selon le type de coordonnées (cartésiennes, cylindriques ou sphériques) utilisées. Le potentiel est alors

exprimé comme une fonction mathématique. En résistivité, de nombreux modèles à couches superposées ont été calculés analytiquement soit en résolvant l'équation de Laplace ou en utilisant la méthode d'image des sources (en analogie avec la physique optique). Plusieurs courbes ont été calculées pour différentes configurations d'électrodes en surface qui sont compilées sous forme d'abaques qui ont longtemps été utilisés pour l'interprétation. La formulation mathématique en polarisation provoquée pour une sphère polarisable et pour un cas bi-couche a été présentée par Seigel(1959). Toutefois, pour l'interprétation des levés de terrain, la modélisation par méthode analytique est plutôt limitée.

Les méthodes numériques offrent la possibilité de trouver des solutions pour des modèles plus complexes en deux ou trois dimensions depuis l'avènement du calcul par ordinateurs rapides avec de larges capacités de mémoire.

Il existe trois principales techniques de modélisation numérique soit: la méthode par différences finies (Dey et Morrison, 1979)(Mufti, 1976), la méthode par éléments finis (Coggon, 1971) et la méthode par équation intégrale (Hohmann, 1975). Ces méthodes sont utilisées dans plusieurs algorithmes de modélisation de la résistivité ou de la polarisation provoquée.

Dey et Morrison (1979) ont développé une technique pour résoudre la distribution du potentiel en trois dimensions autour d'une source ponctuelle située à la surface ou à l'intérieur d'un demi-espace ayant une distribution des conductivités arbitraires également en trois dimensions. L'algorithme par différences finies a été choisi pour la

simplicité des formes d'approximation que l'on assujettit facilement aux conditions de Neumann, Dirichlet ou mixtes. L'équation de Poisson est discrétisée en éléments de volume sur une grille tri-dimensionnelle irrégulière. On évalue le potentiel à chacun des noeuds de la grille en utilisant une sur-relaxation successive, la décomposition partielle de Choleski et le gradient conjugué ainsi que des techniques de décomposition matricielle directes afin d'obtenir des solutions stables et précises.

Spitzer (1995) a développé un algorithme de modélisation 3-D par différences finies pour calculer la résistivité en courant direct et la polarisation provoquée. Les équations différentielles gouvernant le problème de résistivité sont discrétisées en utilisant les différences finies centrées qui sont dérivées par expansion avec séries de Taylor du deuxième ordre. Le modèle consiste en un demi-espace dans lequel on peut distribuer les conductivités électriques de façon arbitraire. Les conductivités à chaque noeud sont calculées par une moyenne arithmétique pondérée volumiquement des conductivités assignées aux cellules adjacentes. On peut utiliser une grille à espacement variable. L'algorithme permet un grand nombre de sources et de configurations. Les équations de la matrice sont symétrisées, ce qui rend la méthode du gradient conjugué ordinaire applicable. La matrice est pré-conditionnée par sur-relaxation successive symétrique (SSOR) qui accélère la convergence sans utiliser de mémoire supplémentaire. De plus, une méthode de storage compact réduit l'espace mémoire nécessaire et accélère les opérations matricielles.

L'approche par les élément finis utilisée par Coggon (1971) est basée sur le principe

d'Hamilton de minimisation d'une fonction d'énergie. Dans ce cas, il s'agit de minimiser l'énergie électromagnétique. La représentation d'un espace volumique par un nombre d'éléments finis et la description du champ ou la distribution des potentiels par un ensemble fini d'inconnues rendent possible le remplacement de l'équation de variation d'énergie par des équations matricielles. Il est démontré qu'une solution pour les champs secondaires plutôt que pour le champ total peut être directement obtenue. Des approximations sont nécessaires dans l'utilisation d'éléments non-infinitésimaux et d'une grille finie d'éléments. Il est habituellement nécessaire d'accorder plus d'importance à la dimension de la grille qu'à celle des éléments. L'auteur présente des exemples d'anomalies en polarisation provoquée pour des modèles 2-D. Cette méthode peut tenir compte des effets d'irrégularités topographiques.

Les recherches d'Hohmann (1975) ont conduit à la description d'une solution numérique pour le calcul de réponses en polarisation provoquée et en électromagnétisme de corps tri-dimensionnels enfouis. La solution théorique sous forme d'intégrale est réduite sous forme d'équation matricielle qui est solutionnée numériquement pour les courants dispersés à l'intérieur du corps. Par la suite, les champs électriques et électromagnétiques en tout points à l'extérieur du corps peuvent être calculés en intégrant dans le demi-espace la fonction dyadique de Green appropriée sur le volume de courants dispersés.

Plus récemment, Weller, Seichter et Kampke (1996) ont développé une technique de modélisation numérique en polarisation provoquée pour des distributions 2-D ou

3-D arbitraires de conductivités électriques. Cette technique est basée sur la prémisse que la conductivité est complexe dû à l'effet de polarisation provoquée. Des équations de différences finies complexes sont obtenues pour les potentiels complexes avec une discrétisation par éléments de volume. Les résultats de phase et d'amplitude peuvent être comparés directement avec les résultats de levés de polarisation provoquée spectrale.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur le problème de l'inversion. Celui-ci est souvent complexe car les matrices à inverser sont quasi-singulières.

Les travaux de Zhang, Mackie et Madden (1995) avaient pour but de produire un algorithme de modélisation et d'inversion tomographique de résistivité en 3-D rapide et efficace. Les auteurs utilisent une analogie avec un réseau de transmission (Madden et Swift, 1969; Madden, 1990) pour le problème de modélisation 3-D. La méthode de relaxation du gradient conjugué est utilisée tant en modélisation qu'en inversion. Pour le calcul du modèle, l'algorithme fait appel à la décomposition partielle de Choleski pour le pré-conditionnement. En inversion, l'utilisation de la technique de relaxation du gradient conjugué permet d'éviter le calcul des matrices de coefficients de sensibilité. Les auteurs ont effectué des tests sur des données réelles provenant d'un site sur un étang d'évaporation au Névada dans le but de surveiller les écoulements. L'imagerie tomographique a été effectuée sur des données de résistivité recueillies en pôle-pôle. La solution obtenue est comparable avec les résultats préalablement obtenus par Park et Van (1991), mais montrent plus clairement les variations latérales

et verticales.

Loke et Barker (1995,1996a,b) ont développé des algorithmes d'inversion (2-D et 3-D) de levés tomographiques de résistivité en surface basés sur la méthode des moindres-carrés avec contrainte de lissage. À la première itération, un modèle homogène est utilisé comme point de départ pour lequel les valeurs des dérivées partielles des résistivité apparentes (coefficients de sensibilité) peuvent être calculées analytiquement. Pour les itérations subséquentes, une méthode quasi-newtonienne est utilisée pour estimer les dérivées partielles, ce qui réduit le temps de calcul et l'espace mémoire requis.

Beard, Hohmann et Tripp (1996) ont proposé de tenir compte seulement des termes de la diagonale de l'équation intégrale du volume pour le problème de modélisation (3-D) en résistivité et en polarisation provoquée afin d'obtenir une solution ultra-rapide dans le cas de contrastes de résistivité faibles à modérés. Cette rapidité de modélisation étant utilisée à profit dans un algorithme d'inversion. En contraignant les résistivités et les chargeabilités sur une rangée de cellules dans la direction de l'extension latérale, les auteurs réalisent une inversion de la résistivité 2-D qui contient les corrections pour les extrémités. Lorsque l'on atteint un modéle de résistivité satisfaisant, on dérive ce modèle à l'aide de la formulation de Seigel (1959) pour calculer la solution inverse pour la chargeabilité (linéaire) en une seule itération.

Park et Van (1991) ont également développé une procédure d'inversion 3-D utilisant la théorie d'estimation de vraisemblance maximale et l'algorithme de différences

finies de Dey et Morrison (1979). Toutefois, leurs inversions sont limitées à de petits modèles puisque des méthodes standard d'inversion matricielle sont utilisées pour solutionner les équations d'inverse à plus vraisemblance maximale (maximum likelihood).

Oldenburg et Li (1994) ont également utilisé l'algorithme de différences finies de Dey et Morrison (1979) sans calculer la matrice 3-D des coefficients de sensibilité et son inverse. Les auteurs ont réalisé des inversions linéaires 1-D dans le domaine du nombre d'onde (λ) et obtenu une solution 3-D approximative par transformation de Fourier des résultats d'inversion 1-D.

Ellis et Oldenburg (1994) ont présenté une approche à l'inverse de résistivité 3-D qui utilise la méthode du gradient conjugué afin de minimiser une fonction objective non-linéaire qui s'applique à l'équation adjointe pour calculer le gradient de la fonction objective.

Plusieurs auteurs se sont concentrés sur l'interprétation de levés tomographiques de résistivité entre forages en utilisant différentes méthodes d'inversion.

Les travaux de Shima (1989, 1990, 1992) présentent des reconstructions d'images en résistivité à partir de levés tomographiques en forage 2-D et 3-D. L'imagerie est obtenue en combinant deux algorithmes d'inversion. Le premier algorithme utilise la méthode des alpha-centres pour l'étape de modélisation et reconstruit ensuite un modèle de résistivité par une inversion non-linéaire des moindres-carrés. Les alpha-centres définissent un modèle de résistivité qui varie continuellement et la distribution

des potentiels du modèle peut rapidement être calculée. Le modèle initial est calculé en utilisant la méthode de rétroprojection. Le deuxième algorithme utilise la méthode des élément finis et l'inversion linéaire pour améliorer la résolution du modèle de résistivité. Les essais sur données synthétiques montrent une convergence vers la solution désirée. Les résultats obtenus sur des données réelles semblent également donner de bons résultats.

Daily et Owen (1991) ont utilisé une méthode itérative dérivée de l'inversion par moindres-carrés et basée sur une solution par éléments finis de l'équation de Laplace. Cet algorithme est appliqué à des données synthétiques des résistivités apparentes acquises entre deux trous de forage afin d'imager l'espace entre les deux trous. Des tests ont été effectués sur des modèles simples. L'algorithme convergeait vers la solution désirée pour la première itération, un plus grand nombre d'itération cause éventuellement une divergence. La résolution spatiale dépend de facteurs tels que la géométrie du corps et les erreurs dans les données initiales.

Labrecque *et al.* (1996) utilisent et discutent un algorithme d'inversion Occam qui utilise la méthode des éléments finis. La technique d'inversion utilisée tente d'obtenir le modèle le plus lisse s'ajustant aux données selon une valeur du Khi-carré (χ^2) pré-déterminée. Le processus s'effectue en trois étapes:

1. Une première modélisation est effectuée et ensuite la matrice de coefficients de sensibilité est calculée ainsi que la différence avec les données initiales.

2. La matrice des coefficients de sensibilité et la différence avec les données sont

utilisées pour estimer un multiplicateur de Lagrange qui contrôle la pondération relative du lissage et l'ajustement des données dans la fonction objective.

3. Un algorithme de Marquardt modifié est utilisé pour déterminer les paramètres minimisant la fonction objective.

Des données synthétiques servent à démontrer les effets du bruit dans l'image de résistivité 2-D résultant. On observe que la résolution des images décroit avec l'augmentation du bruit.

Sasaki (1992) a étudié la résolution des tomographies de résistivités déduites de simulations numériques. La méthode d'inversion utilisée est basée sur la technique des moindres-carrés avec contrainte de lissage et la méthode des éléments finis. La discrétisation appropriée de la grille est obtenue en utilisant des cellules ayant une dimension de la moitié du plus petit espacement entre les électrodes. L'auteur conclut que la résolution ne dépend pas beaucoup du bruit aléatoire en autant que l'on choisisse un facteur d'atténuation approprié. L'auteur souligne également que la configuration pôle-dipôle offre un bon compromis entre la résolution et l'amplitude du signal (pénétration du courant). L'effet d'hétérogénéités situées à l'extérieur de la zone cible (entre les trous) peut s'avérer très faible si la grille est construite pour représenter les variations de résistivité dans une zone plus grande que simplement celle entre les deux trous.

Chapitre 2

Propriétés physiques des cibles

Le présent chapitre résulte d'une recherche principalement bibliographique sur les propriétés électriques de résistivité et de chargeabilité associées aux principaux types de gisements. Le but d'une telle recherche étant d'aider à la modélisation et à l'interprétation de résultats de levés tomographiques électriques.

Le tableau 2.1 présente une synthèse des propriétés associées aux types de dépôt classifiés selon le type de roches encaissantes. La classification des gisements est inspirée du rapport de la Commission Géologique du Canada présentant un bref exposé géologique des types de gisements minéraux du Canada (Ekstand, 1986).

Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent les résistivités et les chargeabilités des principaux types de roches, telles que compilées par Ballantyne (1989). Les tableau 2.4 et 2.5 présentent les propriétés électriques des principaux types de recouvrement également tirées de Ballantyne (1989).

Tableau 2.1: Synthèse des propriétés électriques des gisements.

type de gisement	forme générale	résistivité (Ωm)			chargeabilité (mV/V)		
		typique	inférieur	supérieur	typique	inférieur	supérieur
Gisements associés à des roches intrusives et extrusives mafiques et ultramafiques							
Nickel et cuivre dans les komatiites	corps tabulaires ou lenticulaires basaux concordants	1	0.01	300	50	18	120
Nickel et cuivre associés aux gabbros	couche ou lentille concordante	5	0.1	10	10		
Gisements associés à des roches intrusives felsiques							
Gisements dans les skarns (W, Cu, Zn, Pb, Fe, Ag)	contact d'intrusion ou stockwork	50	1	200	30	5	80
Gisements de type porphyrique (Cu, Mo, Pb, Zn)	10^3m d'étendue et 10^2 m d'épaisseur	250	20	1200	50	5	160
Gisements par remplacement polymétallique (Ag, Pb, Zn, Cu, Ni)	lentilles, veines ou cheminées	1	0.1	500	40	15	100
Veines polymétalliques (Au, Ag, Cu, Pb, Ni)	veines discordantes, groupes de filons	0.5	0.05	500	40	20	60

Tableau 2.1: Synthèse des propriétés électriques des gisements (suite).

type de gisement	forme générale	résistivité (Ωm)			chargeabilité (mV/V)		
		typique	inférieur	supérieur	typique	inférieur	supérieur
Gisements associés à des roches felsiques subaériennes à mafiques extrusives							
Veines épithermales (Pb, Cu, Ni, Ag, Au)		300	10	2500	30	5	150
Or et argent dans les carbonates	corps stratoides, généralement tabulaires, irréguliers à petite échelle	20	10	50	30	20	40
Gisements associés à des roches felsiques marines							
Sulfures massifs (Kuroko) (Cu, Zn, Pb)	massif au contact, filonets ou remplissage de brèche	1	0.1	6	45	16	125
Gisements associés à des roches sédimentaires clastiques							
Gisements SEDEX (Pb, Ba, Cu)	lentilles tabulaires de plus de 1000 m de quelques dizaines de m d'épaisseur	100	0.1	400	20	10	135
Gisements de barytine sédimentaire	tabulaires, lenticulaires de 0.1 m à plusieurs m d'épaisseur, plusieurs centaines de m de long		850	1400	60		

Tableau 2.1: Synthèse des propriétés électriques des gisements (suite).

type de gisement	forme générale	résistivité(Ωm)			chargeabilité (mV/V)		
		typique	inférieur	supérieur	typique	inférieur	supérieur
Gisements associés à des roches carbonatées							
Gisements type Vallée du Mississippi (Appalaches) (Pb, Zn)	irrégulière souvent discordante à l'échelle du gisement, mais stratoide à l'échelle du district	100	0.1	7000	55	30	100
Gisements associés au métamorphisme							
Veines de quartz aurifères faibles en sulfures	déterminée par des failles individuelles, zones de cisaillement ou réseaux de veines en échelon	3000	1000	12000	25	10	80
Gisements d'uranium de type discordance	le conducteur défini par le graphite est souvent tabulaire	0.1			50		
Gisements associés à des processus supergènes							
Placers d'or et éléments du groupe platine	1-30 m de large 10-1000 m de long, à la base des dépressions		10	800		1	4

Tableau 2.2: Résistivités des roches encaissantes (Ωm).

roche	typique	inférieur	supérieur
ultramafique	3000	100	6500
mafique	500	10	10000
intermédiaire	7000	1000	60000
felsiques	4000	300	20000
carbonates	1500	350	6000
grès	300	50	4000
shale	500	20	2000
shale graphitique	5	0.1	10
gneiss	5000	1000	7000
schiste	5000	20	1000

Tableau 2.3: Chargeabilités des roches encaissantes (mV/V).

roche	typique	inférieur	supérieur
ultramafique	30	20	200
mafique	20	5	
intermédiaire	15	8	20
felsiques	10	2	
carbonates	5	2	20
grès	5	3	12
shale	5		
shale graphitique	50		
gneiss	10	6	30
schiste	5	5	20

Tableau 2.4: Résistivités des recouvrements (Ωm).

mort-terrain	typique	inférieur	supérieur
sables et alluvions	40	10	1200
argile	50	1	500
gravier	600	480	900
loam	90	20	160
loess	30	25	40
marl	20	3	70
dunes de sable	7000	6200	7700
silts glaciaires	15	13	20
sols organiques	700	10	
permafrost	1000	500	100000

Tableau 2.5: Chargeabilités des recouvrements (mV/V).

mort-terrain	typique	inférieur	supérieur
sables et alluvions	8	3	20
argile	10	5	30
gravier	2	1	
loam	2	1	
loess	2	1	
marl	2	1	
dunes de sable	2	0	
silts glaciaires	2	2	9
sols organiques	2	1	4
permafrost	2	0	

Chapitre 3

Modélisation

La modélisation a été faite à l'aide du programme de modélisation par différences finies 3ddc de Klaus Spitzer(1995).

3.1 Modèles simples

Une série de modèles simples a été calculée dans le but d'illustrer les principaux types de réponses auquelles on peut s'attendre dans le cas de tomographies simples où il y a injection dans un trou vertical et mesure dans un second trou également vertical et où un corps se trouve entre les deux trous.

3.1.1 Trous verticaux

La figure 3.1 illustre la configuration des électrodes et la position du corps pour la série des neuf modèles simples qui suivent. Pour la couche, le corps est situé à la même profondeur mais s'étend à l'infini (sur toute la grille) en x et en y, le corps 2-D

s'étend sur toute la grille en y et le corps 3-D a une extension latérale de 100 m centré à y=0 (la section sur laquelle sont situés les trous).

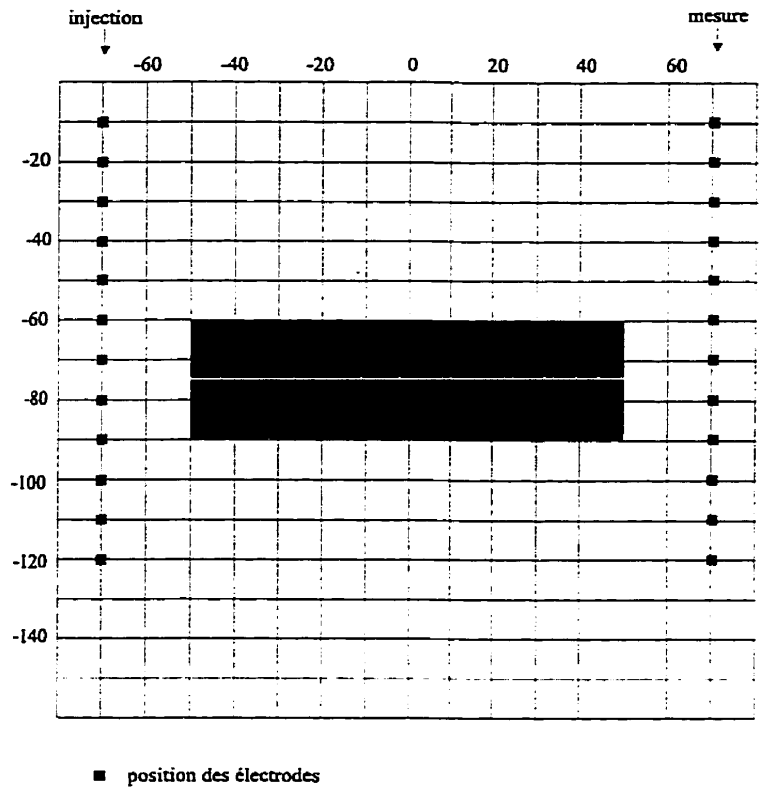


Figure 3.1: Grille et configuration pour neuf premiers modèles simples: la résitivité du corps est de 1 Ωm et sa chargeabilité de 50 mV/V, le fond étant fixé à 1000 Ωm et 0 mV/V.

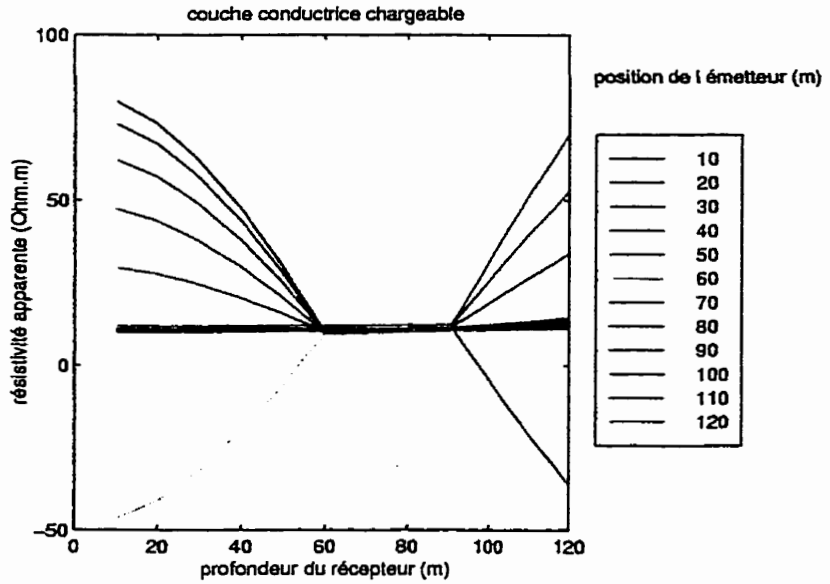


Figure 3.2: Courbes des résistivités apparentes pour une couche conductrice et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90.

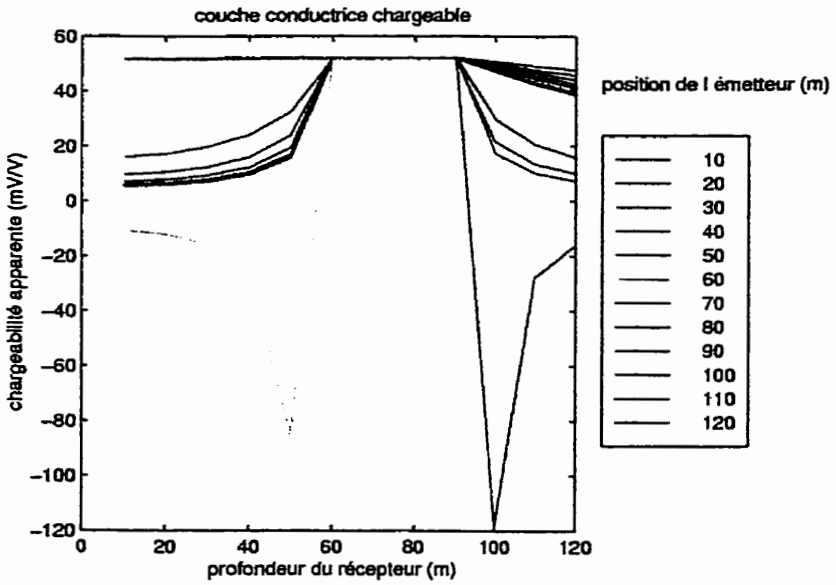


Figure 3.3: Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche conductrice et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90.

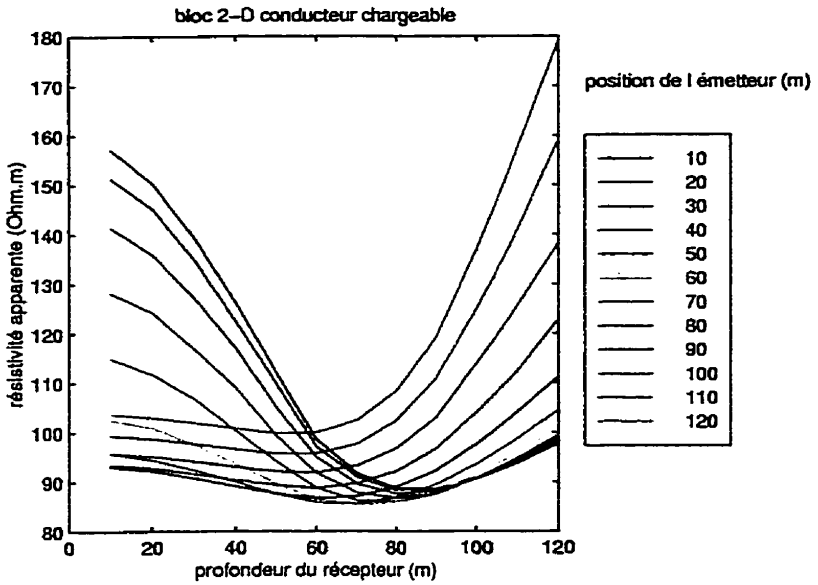


Figure 3.4: Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 2-D conducteur et chargeable.

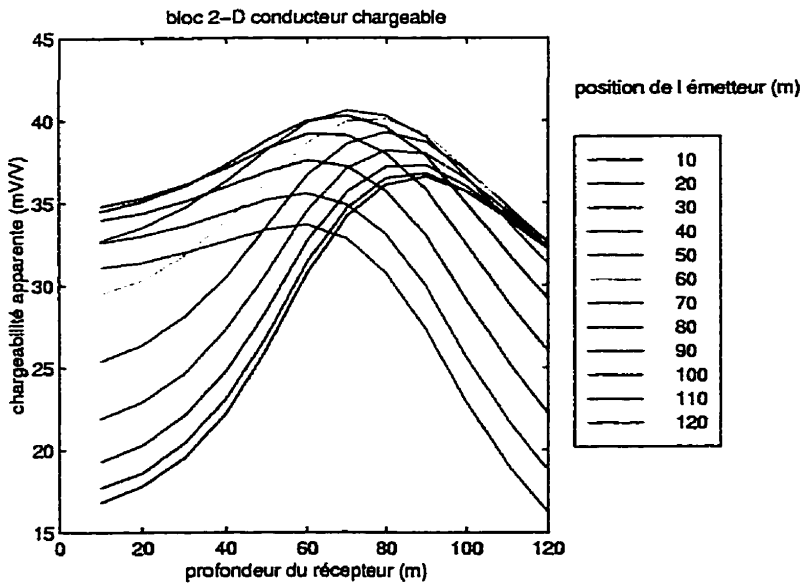


Figure 3.5: Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D conducteur et chargeable.

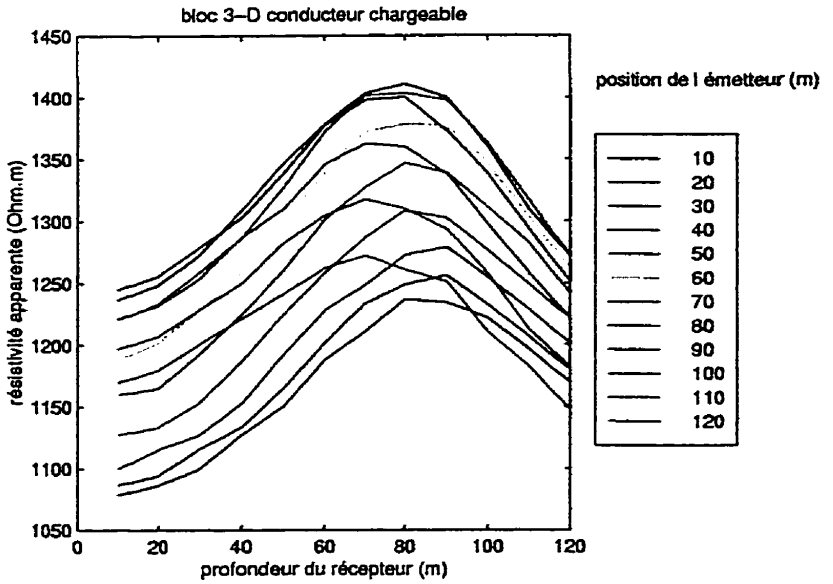


Figure 3.6: Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D conducteur et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous).

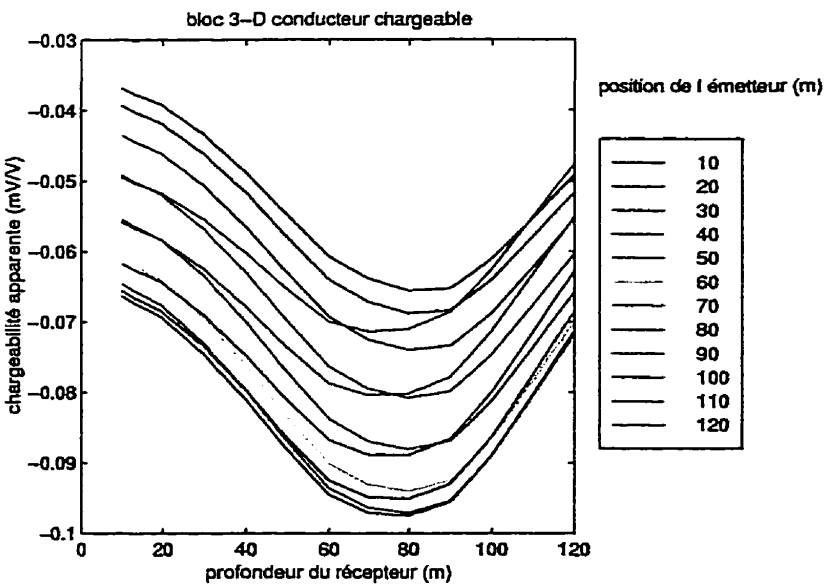


Figure 3.7: Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D conducteur et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous).

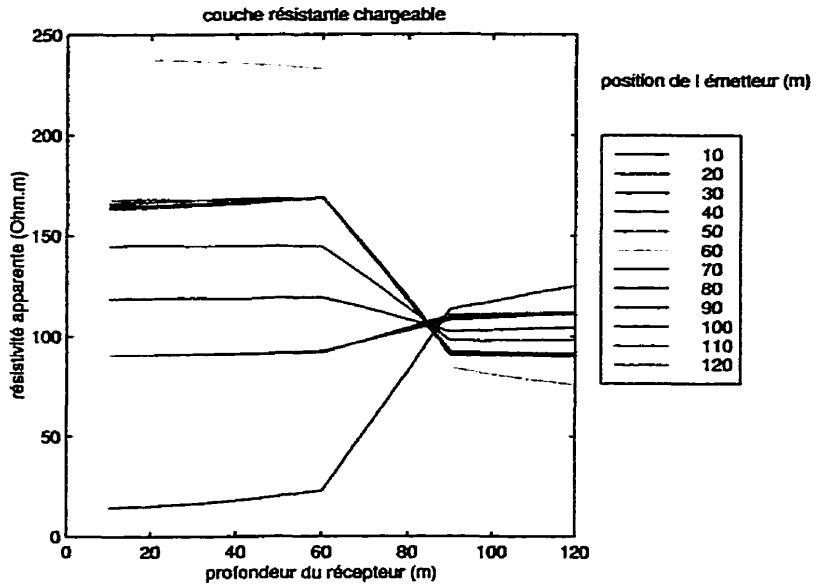


Figure 3.8: Courbes des résistivités apparentes pour une couche résistante et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90 ayant une résistivité de 1000 Ωm dans un milieu de 100 Ωm.

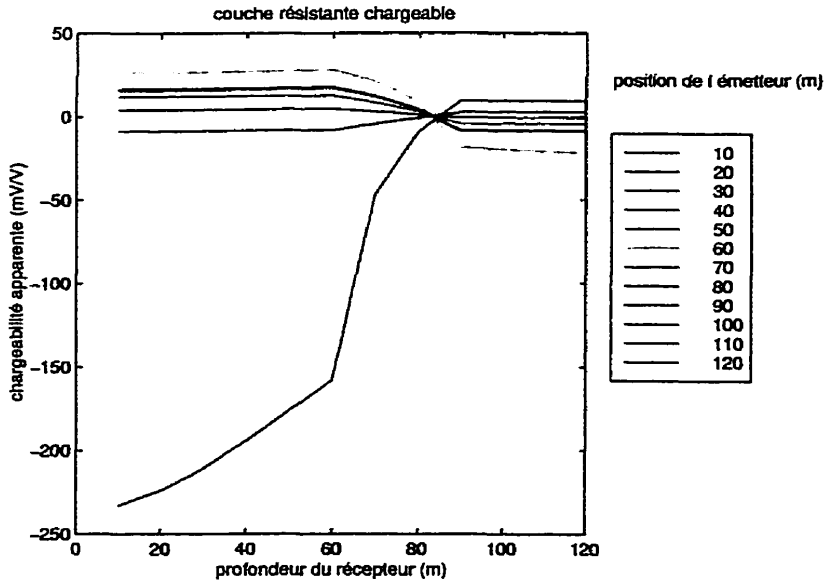


Figure 3.9: Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche résistante et chargeable située entre les profondeurs 60 et 90 ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V.

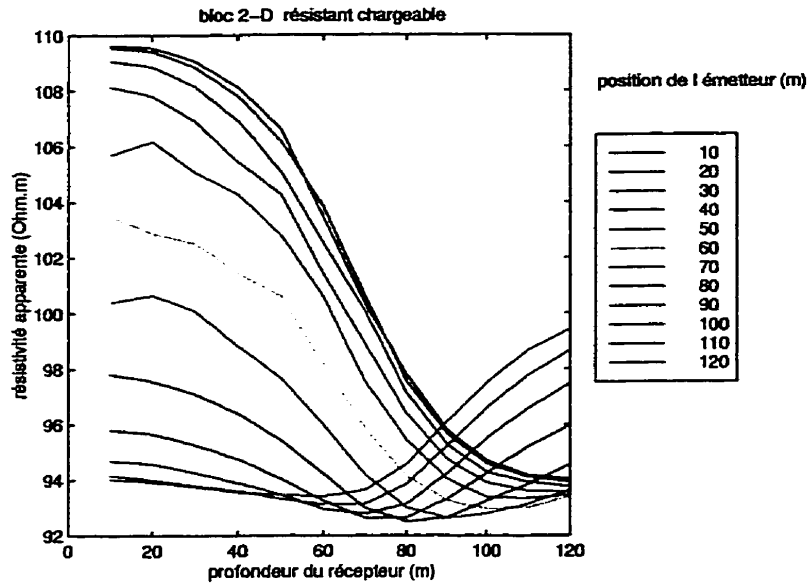


Figure 3.10: Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 2-D résistant et chargeable ayant une résistivité de 1000 Ωm dans un milieu de 100 Ωm.

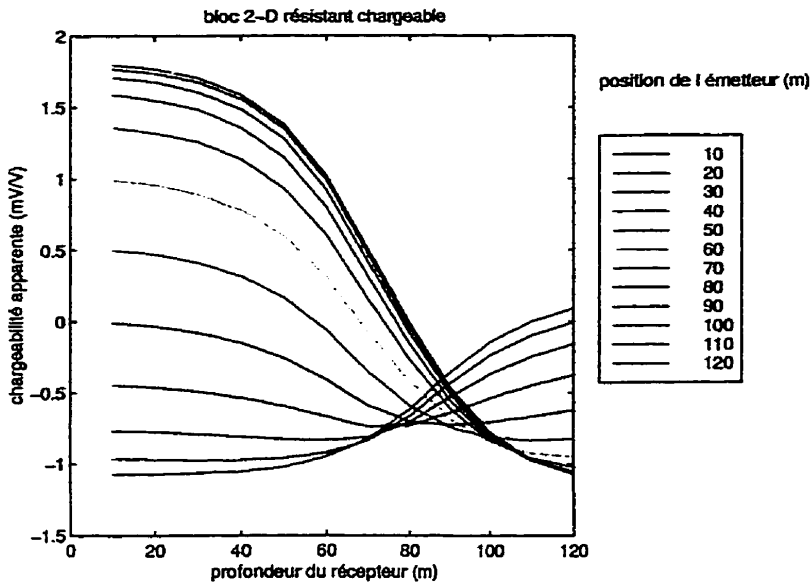


Figure 3.11: Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D résistant et chargeable ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V.

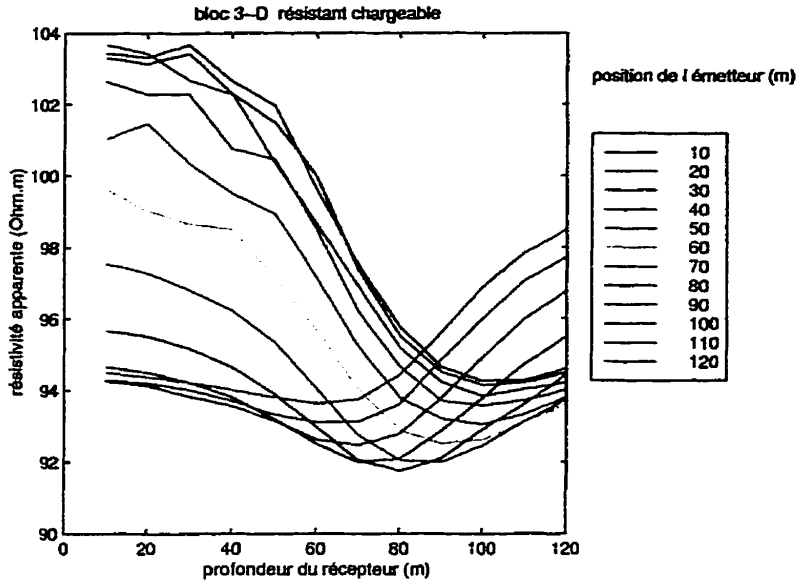


Figure 3.12: Courbes des résistivités apparentes pour un bloc 3-D résistant et chargeable (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous) ayant une résistivité de 1000Ωm dans un milieu de 100 Ωm.

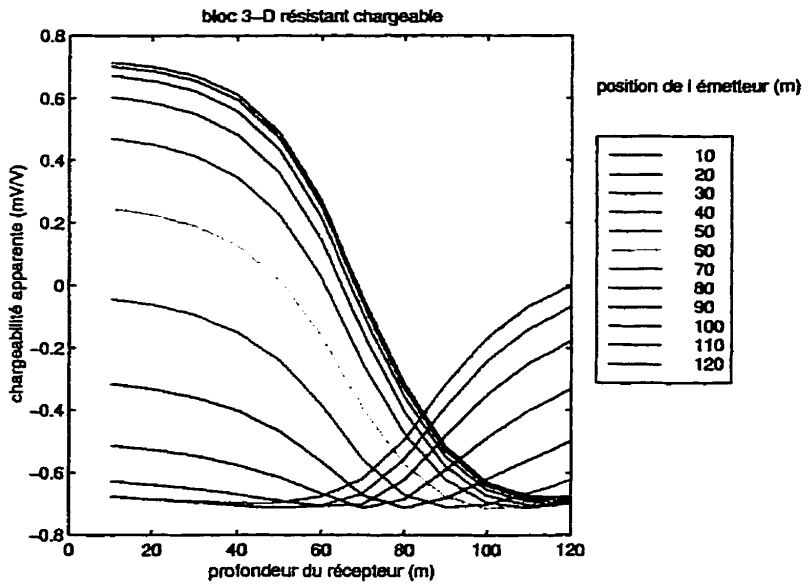


Figure 3.13: Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 3-D résistant et chargeable (extension latérale de 100 m, placé symétriquement entre les trous) ayant une résistivité de 1000 Ωm et une chargeabilité de 50 mV/V dans un milieu de 100 Ωm et de 0 mV/V.

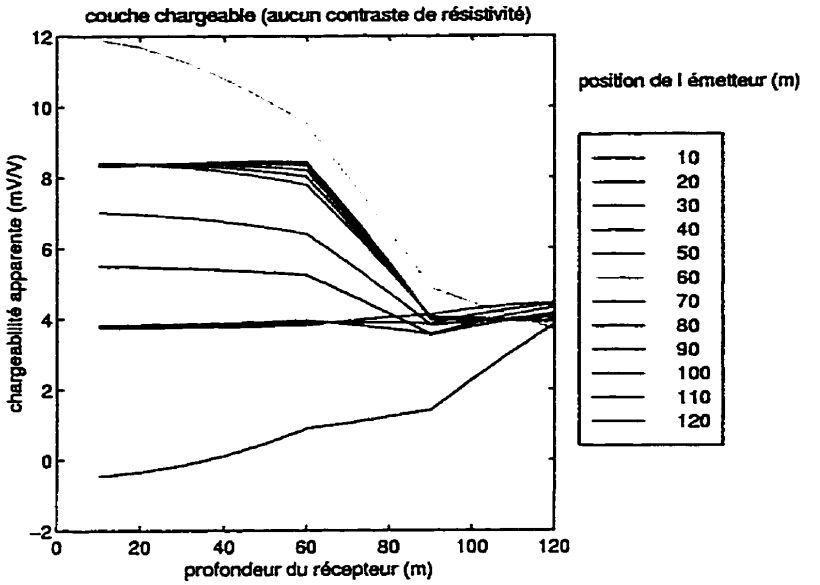


Figure 3.14: Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité située entre les profondeurs 60 et 90.

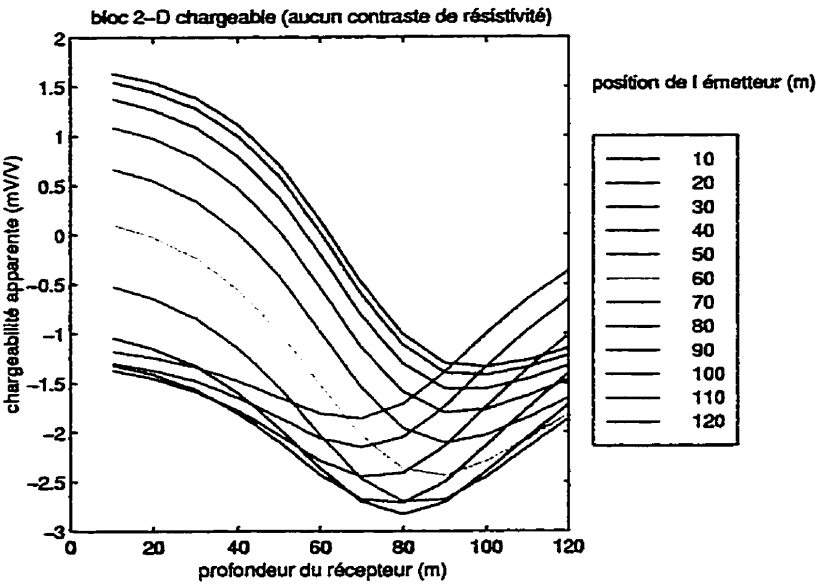


Figure 3.15: Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 2-D chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité.

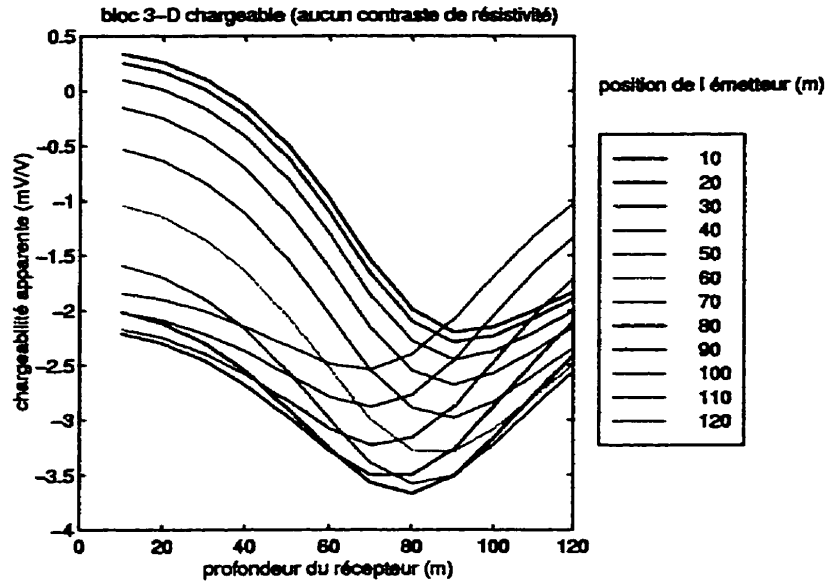


Figure 3.16: Courbes des chargeabilités apparentes pour un bloc 3-D chargeable de 50 mV/V sans aucun contraste de résistivité (extension latérale de 100 m placé symétriquement entre les trous).

Les deux modèles suivants illustrent la réponse tomographique obtenue dans le cas d'une couche conductrice inclinée (constituée en réalité de 11 blocs de 20m de largeur et 10m de hauteur empilés en escalier, ce qui donne une inclinaison approximative de 45°) et pour une couche résistante chargeable avec une épaisseur de même ordre de grandeur que l'espacement entre les trous. Les contrastes pour le cas de la couche inclinée sont de 1 Ωm et 50mV/V dans un milieu de 3000 Ωm et 0 mV/V. Pour la couche résistante de 80 m d'épaisseur les contrastes sont de 10000 Ωm et 50mV/V dans un milieu de 500 Ωm et 15 mV/V.

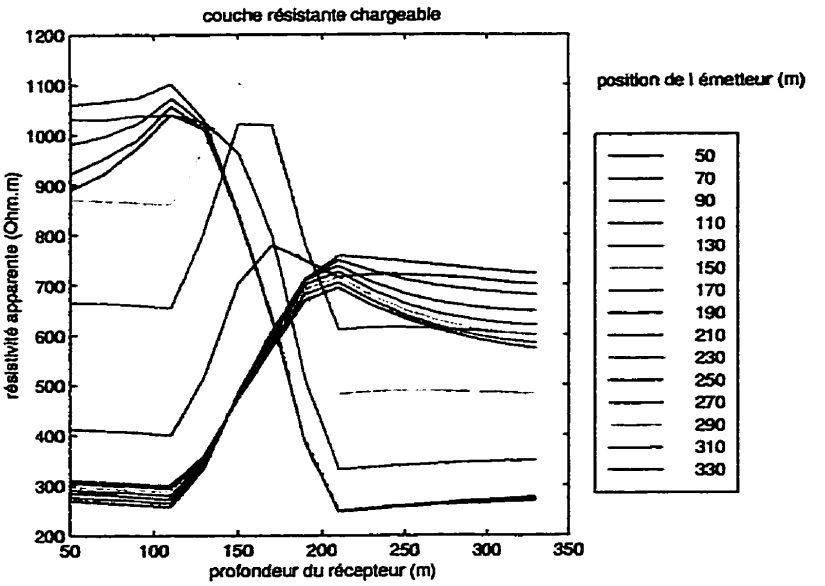


Figure 3.17: Courbes des résistivités apparentes pour une couche résistante et chargeable de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m.

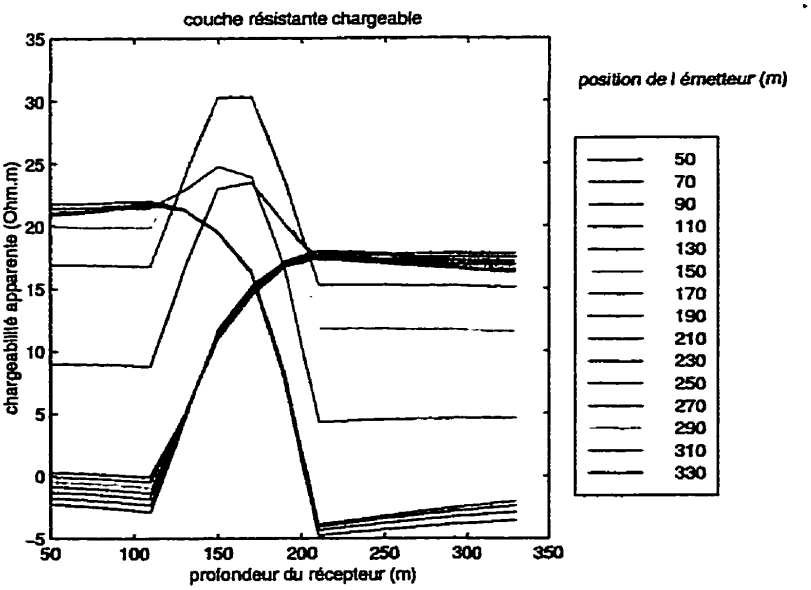


Figure 3.18: Courbes de chargeabilités apparentes pour une couche résistante chargeable de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m.

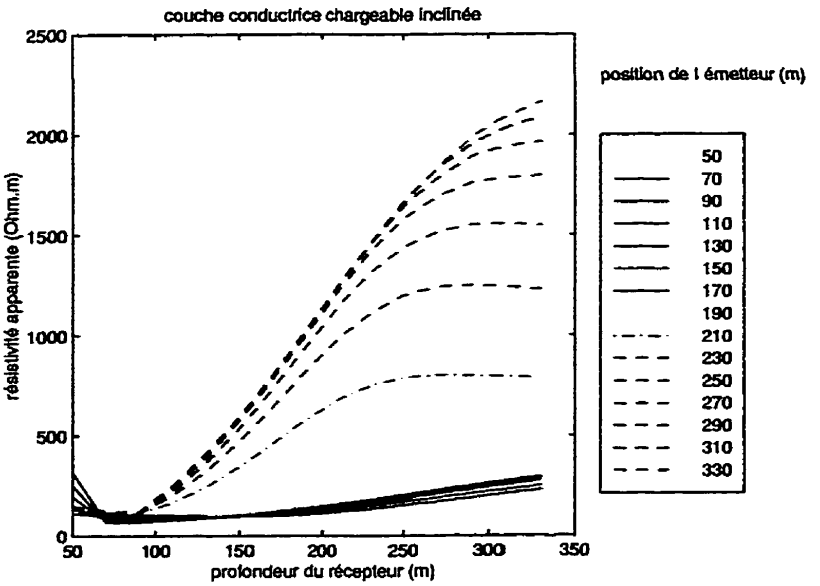


Figure 3.19: Courbes des résistivités apparentes pour une couche mince conductrice et chargeable inclinée avec des trous séparés de 100 m.

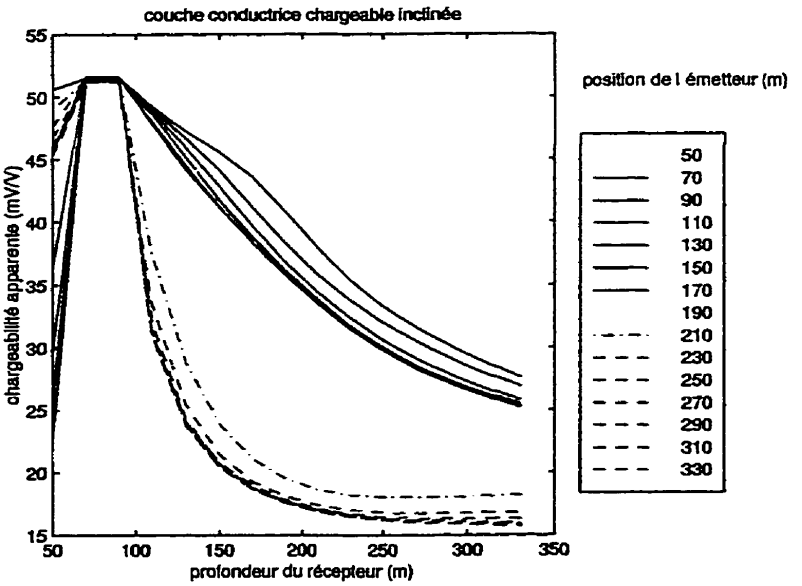


Figure 3.20: Courbes des chargeabilités apparentes pour une couche mince conductrice et chargeable inclinée avec des trous séparés de 100 m.

On observe dans le cas de la couche conductrice chargeable (figures 3.2 et 3.3) une baisse de résistivité et une hausse de chargeabilité qui est bien définie sur l'épaisseur de la couche. Il est à noter que les courbes qui présentent des valeurs négatives sont celles où le point d'injection est situé sur une des limites de la couche (profondeurs 60 et 90 m). Le potentiel calculé par l'algorithme présente des singularités à la position de la source (Spitzer, 1995), alors si on ajoute la limite d'un corps à cette même position, tous les potentiels calculés pour cette source en semblent affectés. Ce problème peut être contourné en changeant la discrétisation de la grille pour éviter que des positions de sources ne coïncident avec des limites de corps.

Dans le cas du bloc conducteur et chargeable d'extension latérale très longue (sur la totalité de la grille) s'apparentant au cas 2-D (figures 3.4 et 3.5), on peut également voir une diminution de résistivité et une augmentation de chargeabilité correspondant à la position du bloc. Toutefois, celle-ci est beaucoup moins bien définie que dans le cas de la couche conductrice et chargeable.

Les figures 3.6 et 3.7 présentent les courbes de résistivité et de chargeabilité dans le cas d'un bloc tri-dimensionnel conducteur et chargeable. Dans ce cas, on observe l'inverse de la réponse espérée, c'est-à-dire une augmentation de la résistivité et une diminution de la chargeabilité. Ceci s'explique par le fait que le corps est entièrement inclu dans la zone comprenant les coefficients de sensibilité négatifs (voir section 4.2).

Pour ce qui est des modèles avec des corps résistants dans des milieux conducteurs (figures 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13), on voit que la hausse de résistivité est

impossible à déceler de même que la hausse de chargeabilité dans le cas où l'épaisseur du corps est faible (30 m) par rapport à la séparation des trous (140 m). Dans le cas illustré aux figures 3.17 et 3.18 les trous sont espacés de 100 m et le corps a 80 m d'épaisseur. On remarque alors que les courbes montrent une hausse de résistivité et une hausse de chargeabilité. Ceci s'explique par le fait que la pénétration maximale du courant dans un milieu résistant est plus faible (Roy et Apparao, 1971) et que la couche résistante agit comme frontière quasi-imperméable au courant dans le cas de contrastes élevés. La hausse de résistivité sera donc plus facilement observable dans les cas où la séparation des trous sera équivalente à l'épaisseur de la couche résistante et où les contrastes ne sont pas trop élevés. La réponse en chargeabilité est contrôlée par celle de résistivité. Elle est toutefois plus symétrique.

Quant aux figures 3.19 et 3.20 elles illustrent les courbes de résistivité et de chargeabilité apparentes dans le cas d'une couche mince conductrice et chargeable inclinée, les trous étant séparés de 100 m. On remarque que la hausse de résistivité et de chargeabilité est localisée à l'endroit où les récepteurs coïncident avec la couche.

3.2 Modèles complexes

Les modèles proposés dans cette section représentent des situations courantes en exploration minière. En effet, on utilise souvent, pour la tomographie, des trous déjà forés qui sont orientés plus ou moins perpendiculairement à la stratification géologique. Puisqu'il y a des limites à l'angle auquel on peut forer à partir de la surface, il est courant que l'on utilise des forages à 45° pour investiguer un terrain à stratification subverticale. Les cas illustrent des cibles typiques: le conducteur chargeable et le résistant chargeable, des cas que l'on observe couramment en exploration minière sur le bouclier canadien.

3.2.1 Sulfures massifs

La figure 3.21 illustre la grille utilisée pour calculer la réponse en résistivité et en chargeabilité d'un modèle hypothétique d'un gisement de sulfures massifs. Les mailles de la grille ont une dimension de 7 X 7 X 7 m et la séparation des électrodes est donc de 9.9 m, les trous étant orientés à 45°. L'injection de courant se fait dans le trou à l'ouest (gauche) et la mesure se fait dans le trou à l'est. La séparation des trous à la surface est de 147 m. Le gisement de sulfures massifs est constitué de pyrite, pyrrhotine, chalcopyrite, sphalérite. Il est très conducteur et très chargeable. Son extension latérale est étendue et il est encaissé dans un empilement de roches effusives intermédiaires qui sont résistantes et peu chargeables.

Les courbes de résistivité et de chargeabilité sont facilement interprétables dans

ce cas. La zone de baisse de résistivité et de hausse de chargeabilité sont très bien définies.

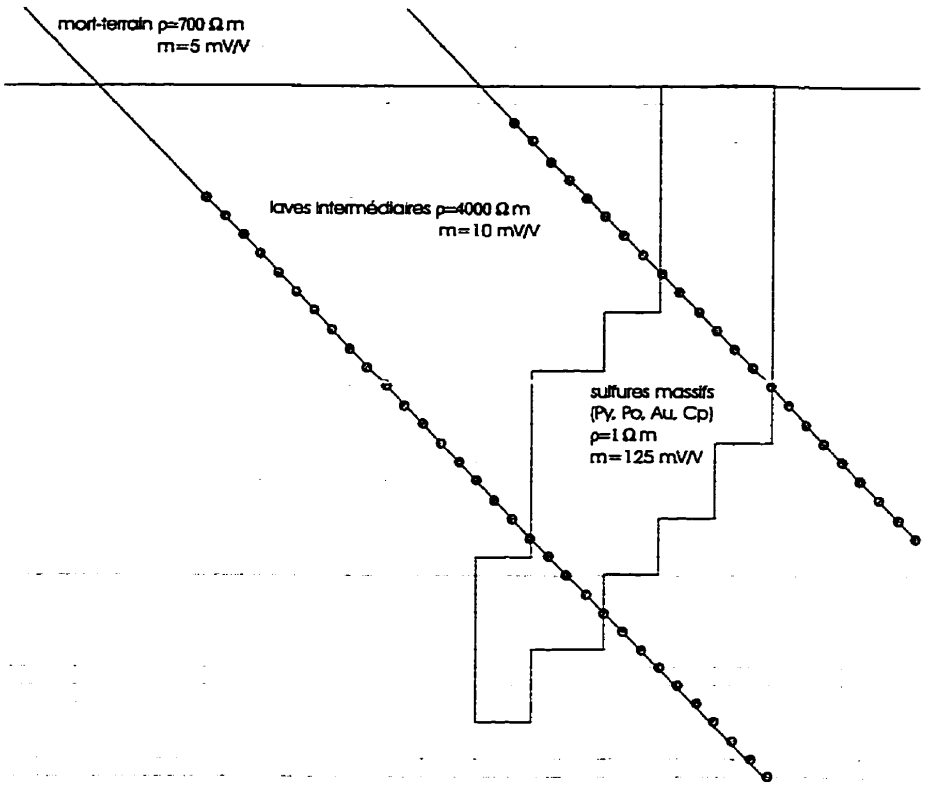


Figure 3.21: Modèle représentant un gisement de sulfures massifs.

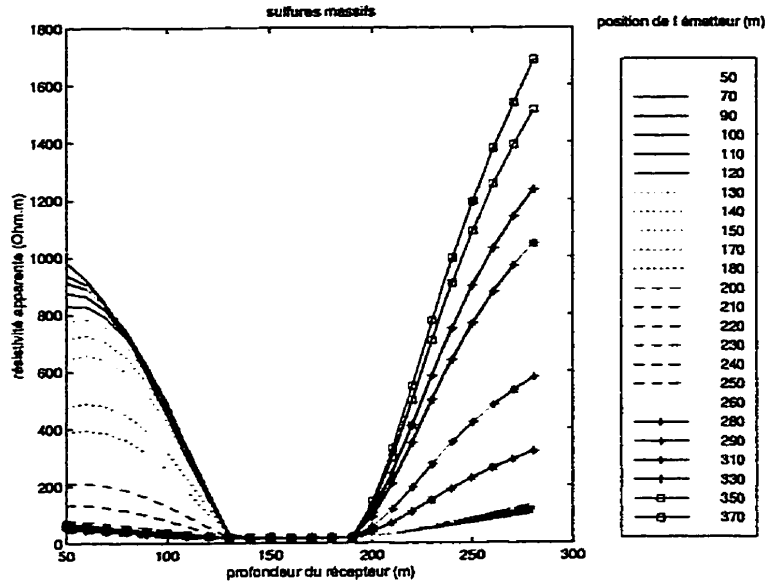


Figure 3.22: Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de sulfures massifs.

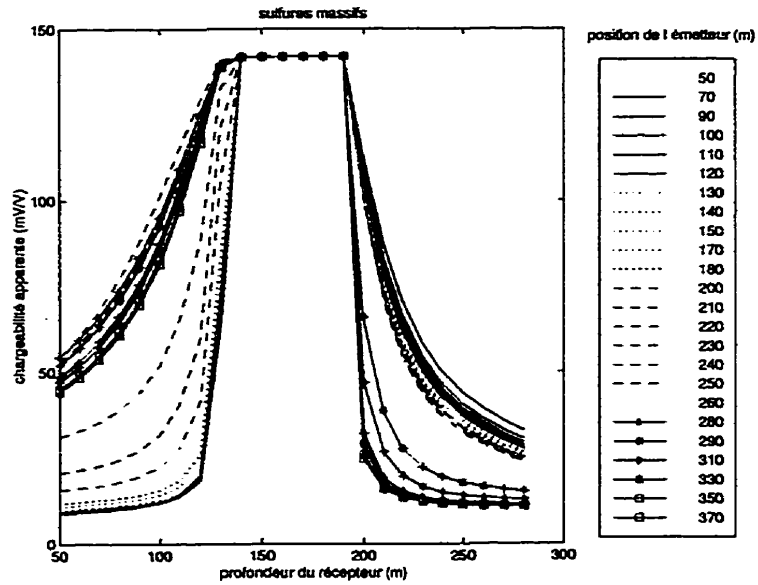


Figure 3.23: Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de sulfures massifs.

3.2.2 Or disséminé

Le modèle illustré à la figure 3.24 représente un gisement d'or disséminé hypothétique. La grille utilisée est également de 7 X 7 X 7 m. L'injection de courant se fait dans le trou à l'ouest et la mesure dans le trou à l'est. La minéralisation aurifère serait du type épithermale associée à une altération de silicification, donc dans une zone fortement résistante mais toutefois chargeable. La séparation des trous est de 56 m à la surface et la zone silicifiée verticale est d'une largeur de 54 m.

Dû à la géométrie du problème (zone résistante à angle par rapport aux trous) les courbes de résistivités apparentes sont assez difficiles à interpréter d'un premier coup d'oeil. Quant à la chargeabilité apparente, on observe une hausse marquée, mais celle-ci semble décalée également à cause de la géométrie des trous.

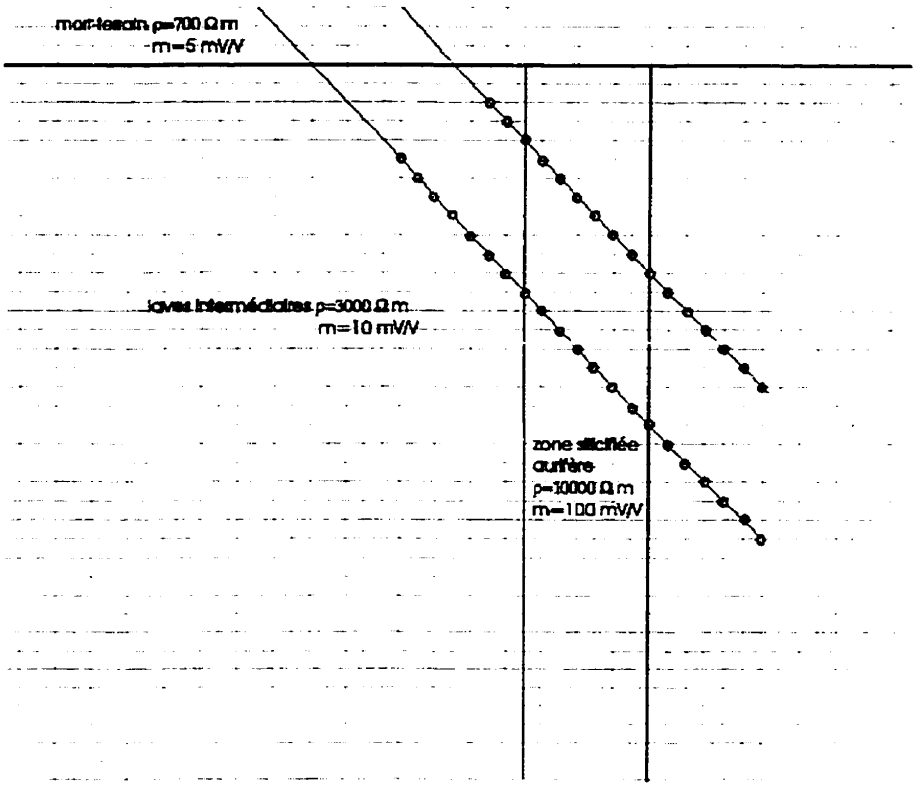


Figure 3.24: Modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée.

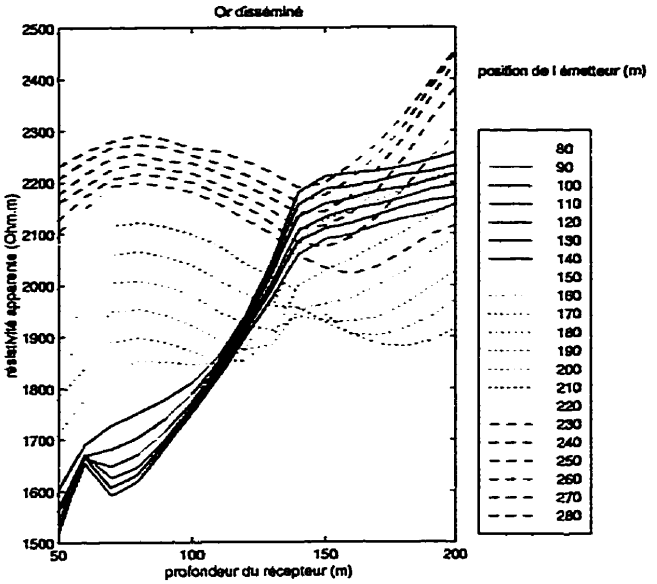


Figure 3.25: Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée.

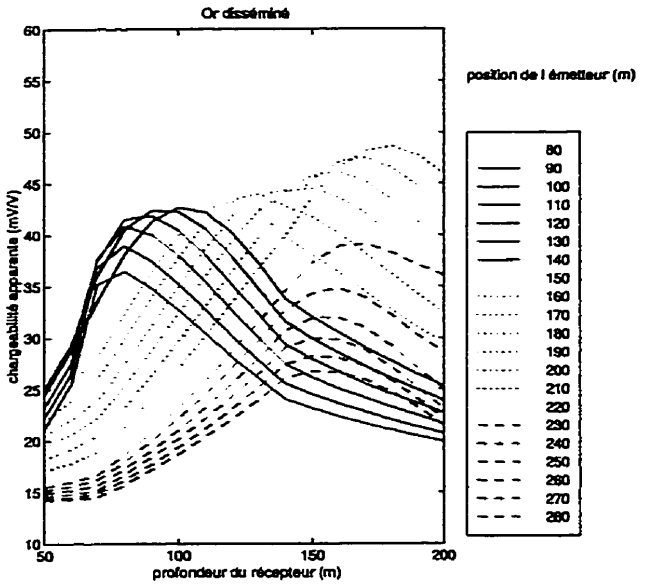


Figure 3.26: Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement d'or disséminé associé à un zone silicifiée.

3.2.3 Gisements de nickel et cuivre d'extensions latérales variables

La figure 3.27 représente une section théorique d'un gisement de nickel et cuivre encaissé dans des laves intermédiaires. Les valeurs de résistivité et de chargeabilité ont été déterminées à partir de diagraphies effectuées au site McConnell. La grille utilisée est également de 7 X 7 X 7 m et les trous sont orientés à 45°. L'épaisseur de la couche minéralisée est de 26 m.

Trois modèles ont été calculés avec des extensions latérales du gisement variables de 84 m, 140 m et 196 m. Le but de cette étude est d'observer l'effet de la variation de l'extension latérale sur les résultats.

On remarque que pour les points d'injection dans le milieu résistant (électrodes 80 à 210) la baisse de résistivité correspond aux positions des récepteurs situés à l'intérieur du gisement. Cette baisse est plus marquée lorsque l'extension latérale augmente. Pour les points d'injection qui suivent, on observe le contraire, c'est-à-dire une hausse de résistivité dans la zone correspondant aux récepteurs à l'intérieur du gisement.

Quant aux courbes de chargeabilité apparente, elles correspondent mieux au résultat escompté, c'est-à-dire une hausse vis-à-vis des récepteurs situés à la profondeur du gisement et la chargeabilité augmente également avec l'extension latérale.

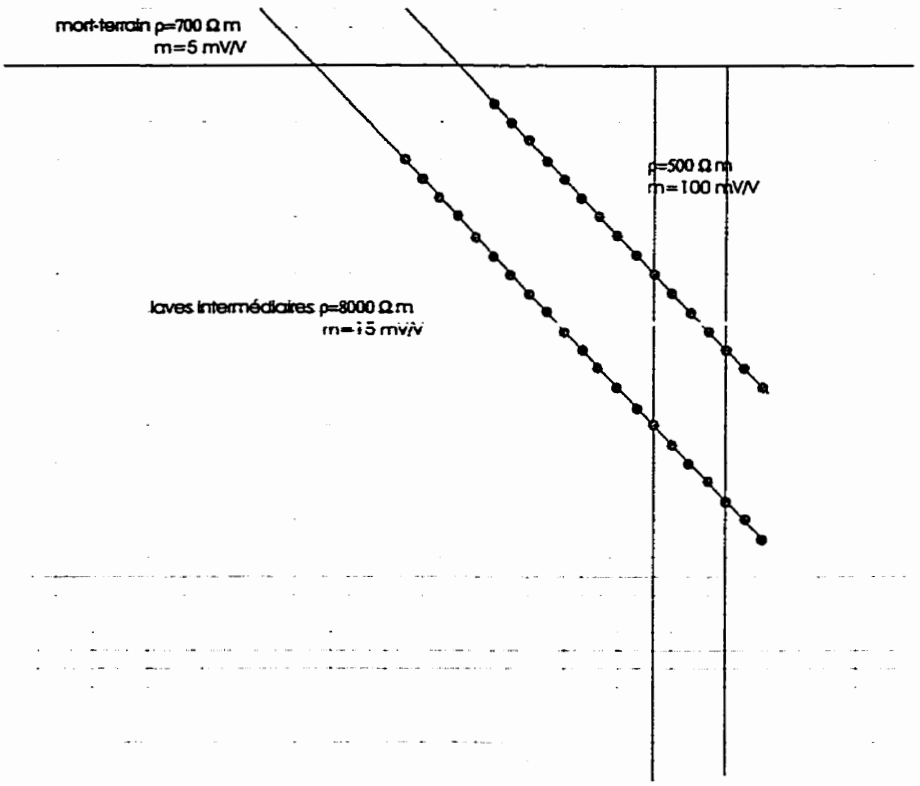


Figure 3.27: Modèle représentant un gisement de nickel et cuivre.

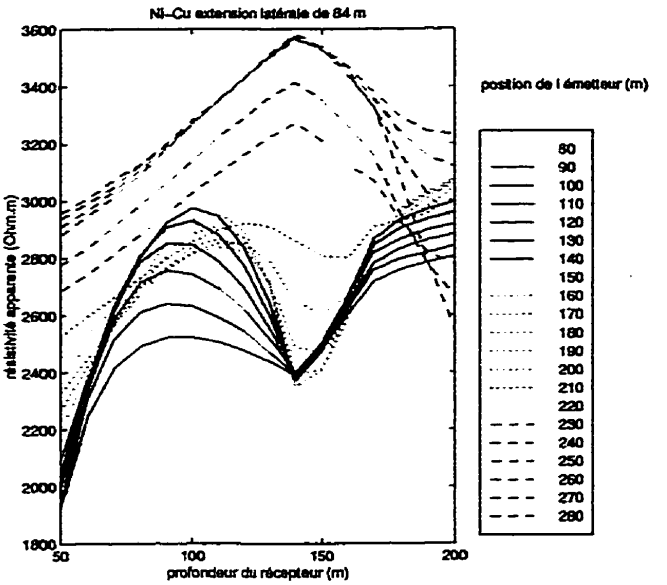


Figure 3.28: Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 84 m.

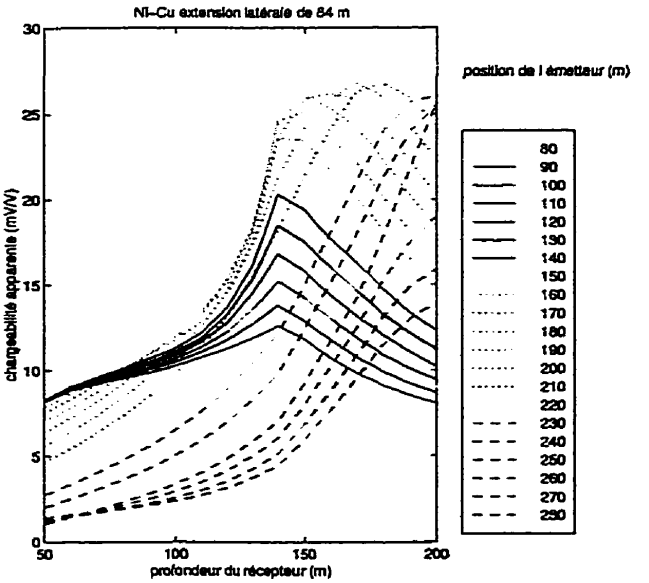


Figure 3.29: Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 84 m.

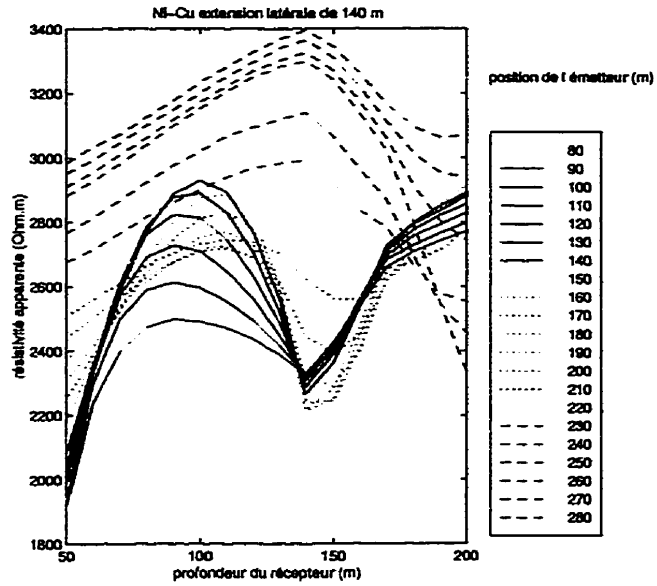


Figure 3.30: Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 140 m.

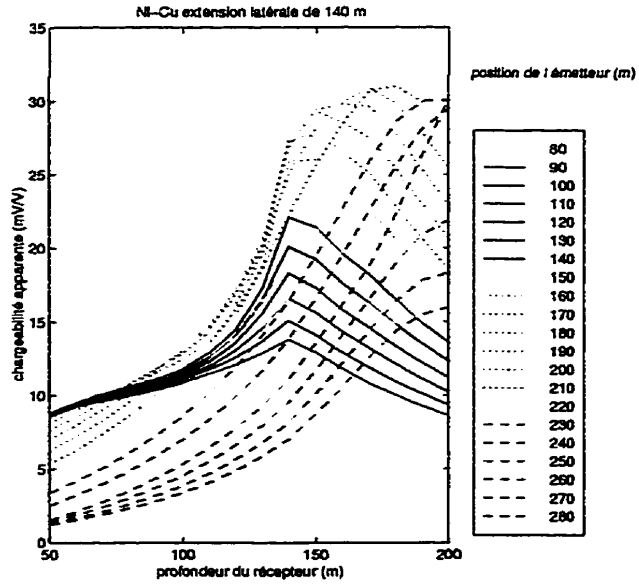


Figure 3.31: Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 140 m.

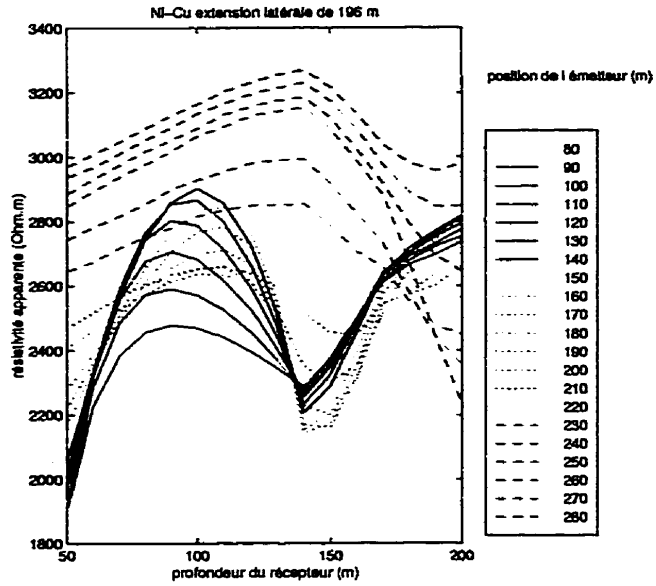


Figure 3.32: Courbes des résistivités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 196 m.

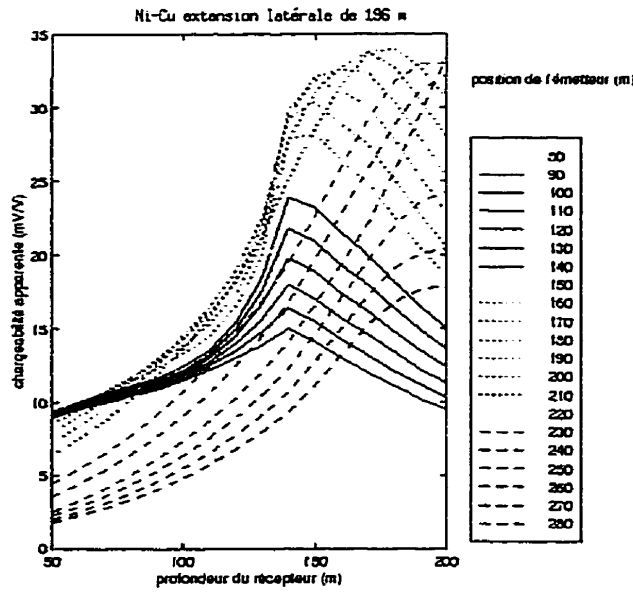


Figure 3.33: Courbes de chargeabilités apparentes calculées pour le modèle représentant un gisement de nickel et cuivre avec extension latérale de 196 m.

Chapitre 4

Rétroprojection

En inversion de résistivité, le sol est paramétrisé en divisant un modèle en un certain nombre de blocs ou cellules de résistivité constante. La réponse électrique est une fonction non-linéaire des paramètres du modèle, le problème est donc linéarisé en utilisant les estimés initiaux de ces paramètres. On peut résumer l'équation résultante sous la forme matricielle suivante:

$$\mathbf{\Delta d} = \mathbf{J}\mathbf{\Delta p} \tag{4.1}$$

où $\mathbf{\Delta d}$ est un vecteur contenant les différences entre la réponse calculée du modèle et les données, $\mathbf{\Delta p}$ est le vecteur de correction des paramètres du modèle et $\mathbf{J}$ est la matrice jacobienne des dérivées partielles des réponses du modèle par rapport aux paramètres du modèle. La solution unique à ce problème existera seulement si $\mathbf{J}$ est carrée et inversible:

$$\mathbf{\Delta p} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{\Delta d} \tag{4.2}$$

Dans tous les autres cas, si $\mathbf{J}$ n'est pas carrée, il faut trouver une matrice $\mathbf{H}$ telle que:

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{H}\Delta\mathbf{d} \tag{4.3}$$

$\mathbf{H}$ est appelée l'inverse généralisé de $\mathbf{J}$ si $\mathbf{HJH} = \mathbf{H}$ et $\mathbf{JHJ} = \mathbf{J}$. La solution par la méthode des moindres-carrés est $\mathbf{H} = (\mathbf{J}^T\mathbf{J})^{-1}\mathbf{J}^T$, toutefois, l'obstacle principal à l'application directe de cette solution est la quasi-singularité de la matrice $(\mathbf{J}^T\mathbf{J})$. Il existe une quantité de méthodes pour parvenir à une solution qui satisfera aux observations à l'intérieur d'une marge d'erreur prédéfinie par conditionnement matriciel. Un processus qui rend le problème plus long et complexe. Les méthodes d'inversion effectuent un ajustement des paramètres de façon itérative. À chaque itération il faut recalculer la réponse du modèle. En résistivité et en polarisation provoquée, puisque la fonction est non-linéaire, l'étape du calcul de la réponse est effectuée numériquement, ce qui rend le processus long et nécessite beaucoup de mémoire car les matrices sont très larges.

Afin de pouvoir interpréter plus rapidement des résultats de tomographie électrique, on utilise une méthode d'inversion approximative: la rétroprojection.

La rétroprojection en résistivité a été utilisée comme première étape en inversion (Shima, 1992). Le principe de cette méthode est basé sur la distribution théorique des sensibilités selon la configuration des électrodes. Cette méthode s'apparente aux techniques de rétroprojection utilisées en tomographie radar. La rétroprojection détermine une valeur de résistivité apparente et de chargeabilité apparente pour une

cellule par une pondération statistique d'après sa position par rapport aux électrodes de courant et de potentiel sur la valeur de résistivité ou de chargeabilité mesurée à ces électrodes.

La rétroprojection s'appuie sur les deux hypothèses suivantes (Shima et Sakayama, 1987):

1. Il y a peu de changements dans la résistivité des cellules, c'est-à-dire que la résistivité d'une cellule n'est pas très différente de celle de ses voisines.

2. Lorsque la première hypothèse est satisfaite, le changement total de résistivité apparente est équivalent à la somme de tous les effets sur la résistivité apparente des changements de résistivité de chaque cellule.

Pour effectuer la rétroprojection, on subdivise la région étudiée en petites cellules et la relation entre la résistivité de la cellule et la résistivité apparente mesurée est approximée linéairement par :

$$\rho_{\mathbf{a}} = \mathbf{J}\rho \tag{4.4}$$

$\rho_{\mathbf{a}}$ est un vecteur qui représente la résistivité mesurée, ρ est un vecteur qui représente la résistivité des cellules et $\mathbf{J}$ est la matrice des dérivées partielles $(\partial V/\partial \rho)$ communément appelée la matrice Jacobienne oú V est le potentiel. En rétroprojection, on utilise une matrice de pondération transposée (Shima, 1992). La solution pour ρ devient

$$\rho = \mathbf{W}(\mathbf{J}^T \rho_{\mathbf{a}}) \tag{4.5}$$

où **W** est une matrice diagonale de pondération définie par :

$$W_{ii} = \frac{1}{\sum_j (\frac{\partial V_j}{\partial \rho_i})} \tag{4.6}$$

En substituant l'équation 4.6 dans l'équation 4.5, on obtient l'expression

$$\rho_i = \frac{\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial \rho_i} \rho_{aj}}{\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial \rho_i}} \tag{4.7}$$

où V_j est le potentiel mesuré en j et ρ_i est la résistivité de la cellule i.

Pour ce qui est de la chargeabilité, on a pour un milieu homogène

$$m = \frac{V' - V}{V'} \tag{4.8}$$

où V est le voltage primaire et V' le voltage secondaire.

Pour un milieu hétérogène composé de n différents matériaux de résistivités $\rho_i (i = 1 : n)$ le voltage primaire en absence de polarisation est fonction de la résistivité ou de la conductivité (σ) pour une configuration donnée (Seigel, 1959):

$$V = V(\sigma_i) \tag{4.9}$$

En présence de dipôles, $V' = V(\sigma_i')$ où $\sigma_i' = \sigma_i(1 - m_i)$ avec $m_i (i = i : n)$ les

chargeabilités des constituants. Alors par développement de Taylor on obtient:

$$V' = V(\sigma_i') = V(\sigma_i) + \sum_i (\sigma_i' - \sigma_i)\frac{\partial V}{\partial \sigma_i} \tag{4.10}$$

Où la série est tronquée, puisque les $\sigma_i' - \sigma_i$ sont petits ($m << 1$) de façon générale la chargeabilité s'exprime en mV/V. De plus, $(\sigma_i' - \sigma_i) = -\sigma_i m_i$ on a donc:

$$V' = V - \sum m_i \sigma_i \frac{\partial V}{\partial \sigma_i}. \tag{4.11}$$

La chargeabilité apparente sera donc donnée par

$$m_a = \frac{V' - V}{V'} = \frac{-1}{V'} \sum_i m_i \sigma_i \frac{\partial V}{\partial \sigma_i}. \tag{4.12}$$

Exprimé en termes de résistivités ($\rho_i = 1/\sigma_i$), on a:

$$\frac{\partial V}{\partial \sigma_i} = \frac{\partial V}{\partial \rho_i}\frac{\partial \rho_i}{\partial \sigma_i} = -\rho_i^2 \frac{\partial V}{\partial \rho_i} \tag{4.13}$$

ce qui nous donne:

$$m_a = \frac{1}{V'} \sum_i m_i \rho_i \frac{\partial V}{\partial \rho_i}. \tag{4.14}$$

La résistivité apparente calculée à partir du voltage secondaire est:

$$\rho_a' = \frac{K_g V'}{I} \tag{4.15}$$

K_g étant une constante géométrique et I l'intensité du courant. En remplaçant ρ'_a dans l'équation 4.14, on obtient:

$$m_a = \frac{K_g}{I\rho'_a} \sum_i m_i \rho_i \frac{\partial V}{\partial \rho_i}. \tag{4.16}$$

puisque m est petit (de l'ordre des 10^{-2}) et que $\rho'_a = \rho_a(1-m)$, on a donc que $\rho_a \approx \rho'_a$. De plus, en rétroprojection, on applique à défaut un modèle homogène ($\rho_a = \rho = constante$). On peut donc sortir ρ_i de la sommation, ce qui donne:

$$m_a \approx \frac{K_g}{I} \sum_i m_i \frac{\partial V}{\partial \rho_i}. \tag{4.17}$$

De façon matricielle, on peut écrire:

$$\mathbf{m_a} = \frac{K_g}{I} \mathbf{J}\mathbf{m} \tag{4.18}$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{W}(\mathbf{J}^T \mathbf{m_a}) \tag{4.19}$$

où $\mathbf{m_a}$ est un vecteur qui représente la chargeabilité mesurée et $\mathbf{m}$ est un vecteur qui représente la chargeabilité des cellules et

$$W_{ii} = \frac{1}{\sum_j \frac{K_g}{I}(\frac{\partial V_j}{\partial \rho_i})} \tag{4.20}$$

alors de la même façon que pour la résistivité:

$$m_i = \frac{\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial \rho_i} m_{aj}}{\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial \rho_i}} \tag{4.21}$$

4.1 Calcul des coefficients de sensibilité

La sensibilité en courant direct (Φ) est la dérivée du potentiel mesuré par rapport à la résistivité assignée à un volume ou bloc à l'intérieur du modèle. Les coefficients de sensibilité calculés pour un modéle homogène serviront à effectuer la rétroprojection.

$$\Phi = \frac{\partial V_j}{\partial \rho_i} \tag{4.22}$$

La sensibilité pour une configuration de source-récepteur donnée peut s'exprimer par le produit des densités de courant $\mathbf{j}^s$ et $\mathbf{j}^r$ où s est la position de la source et r est la position du récepteur, intégrée sur le volume perturbé τ_i, tel que formulé par (Geselowitz, 1971).

$$\Phi_{ji} = \frac{1}{I} \iiint_{\tau_i} \mathbf{j}^s \cdot \mathbf{j}^r d\tau_i \tag{4.23}$$

Pour effectuer la rétroprojection, les contributions sont calculées analytiquement pour un demi-espace homogène.

Le potentiel généré pour une source enfouie est :

$$V = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \tag{4.24}$$

où

$$r = [(xs - x)^2 + (ys - y)^2 + (zs - z)^2]^{1/2}$$

$$r' = [(xs - x)^2 + (ys - y)^2 + (zs + z)^2]^{1/2} \tag{4.25}$$

r' étant la distance de la cellule à une source imaginaire qui serait réfléchie par l'interface crée par la surface (voir figure 4.1). (xs, ys, zs) est la position de la source, (xv, yv, zv) est la position du récepteur et (x, y, z) la position de la cellule (centre).

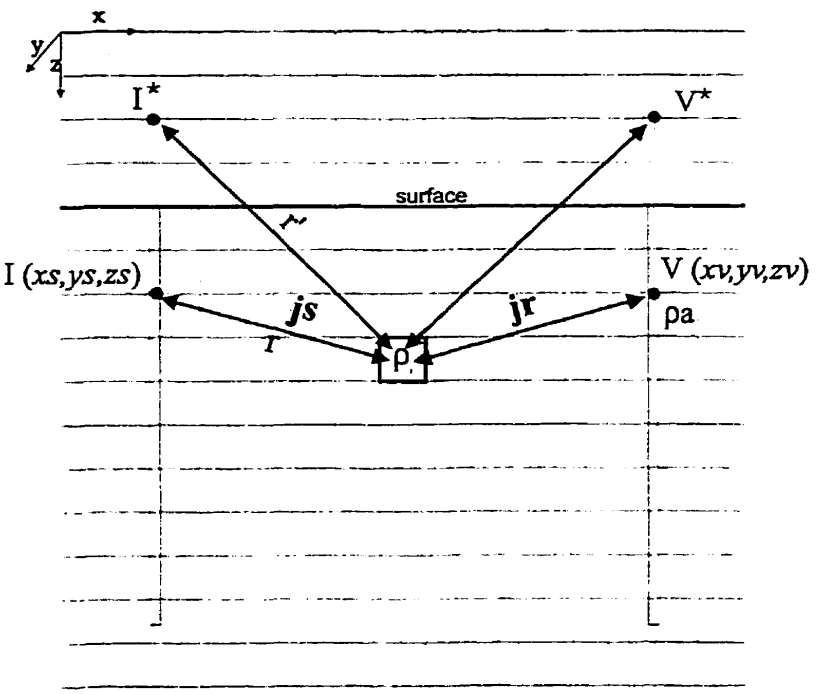


Figure 4.1: Illustration des variables et discrétisation utilisée en rétroprojection.

Si on considère l'équation du champ $\mathbf{E} = -\nabla V$ et la loi d'Ohm $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$, on peut exprimer la densité de courant comme étant $j = -\sigma \nabla V$. Ce qui nous donne donc :

$$\Phi = \frac{1}{\rho^2} \iiint_\tau (\nabla V) \bullet (\nabla V^*) d\tau \tag{4.26}$$

V^* étant le potentiel généré par une source fictive à la position de l'électrode V.

$$\nabla V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned} \nabla V = \frac{\rho I}{2\pi} \Bigg(& -\frac{(xs - x) + (ys - y) + (zs - z)}{[(xs - x)^2 + (ys - y)^2 + (zs - z)^2]^{3/2}} \\ & - \frac{(xs - x) + (ys - y) + (zs + z)}{[(xs - x)^2 + (ys - y)^2 + (zs + z)^2]^{3/2}} \Bigg) \end{aligned} \tag{4.28}$$

pour ∇V^*, on peut écrire de façon similaire:

$$\begin{aligned} \nabla V^* = \frac{\rho}{2\pi} \Bigg(& -\frac{(x - xv) + (y - yv) + (z - zv)}{[(x - xv)^2 + (y - yv)^2 + (z - zv)^2]^{3/2}} \\ & - \frac{(x - xv) + (y - yv) + (z + zv)}{[(x - xv)^2 + (y - yv)^2 + (z + zv)^2]^{3/2}} \Bigg) \end{aligned} \tag{4.29}$$

On aura alors $(\nabla V) \bullet (\nabla V^*) = \frac{\rho^2 I}{4\pi^2} G$

où $G =$

$$\left[\frac{(xs-x)(x-xv)+(ys-y)(y-yv)+(zs-z)(z-zv)}{[(xs-x)^2+(ys-y)^2+(zs-z)^2]^{3/2}[(x-xv)^2+(y-yv)^2+(z-zv)^2]^{3/2}}\right.$$
$$+\frac{(xs-x)(x-xv)+(ys-y)(y-yv)+(zs-z)(z+zv)}{[(xs-x)^2+(ys-y)^2+(zs-z)^2]^{3/2}[(x-xv)^2+(y-yv)^2+(z+zv)^2]^{3/2}}$$
$$+\frac{(xs-x)(x-xv)+(ys-y)(y-yv)+(zs+z)(z+zv)}{[(xs-x)^2+(ys-y)^2+(zs+z)^2]^{3/2}[(x-xv)^2+(y-yv)^2+(z-zv)^2]^{3/2}} \tag{4.30}$$
$$\left.+\frac{(xs-x)(x-xv)+(ys-y)(y-yv)+(zs+z)(z+zv)}{[(xs-x)^2+(ys-y)^2+(zs+z)^2]^{3/2}[(x-xv)^2+(y-yv)^2+(z+zv)^2]^{3/2}}\right]$$

Pour simplifier le calcul, on utilisera des cellules égales et unitaires ainsi que l'approximation de Born en supposant que $E = E_0$ est constant à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule.

$$\Phi = \frac{I}{4\pi^2}[G] \tag{4.31}$$

Cette expression sera utilisée dans les équations 4.7 et 4.21 pour effectuer la rétroprojection.

4.2 Distribution des sensibilités

Dans cette section, la distribution spatiale des coefficients de sensibilité totaux ($\sum \Phi$) pour des configurations tomographiques comprenant deux trous verticaux a été calculée. Ces configurations comportent douzes électrodes d'injection dans un trou vertical et douzes électrodes de mesure dans un second trou (tel qu'illustré à la figure 3.1.1). Les électrodes sont espacées de 10 m.

4.2.1 Sensibilités totales pour un milieu homogène

La figure 4.2 présente la distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un milieu homogène. Ces coefficients ont été calculés pour quatre configurations d'électrodes différentes; soit pôle-pôle, pôle-dipôle, dipôle-pôle et dipôle-dipôle. On remarque que les configurations inter-trous pôle-dipôle, dipôle-pôle et dipôle-dipôle possèdent des coefficients de sensibilité très faibles dans la région que l'on désire investiguer. Ceci est dû à la faible pénétration du courant avec un dipôle d'injection ou de mesure.

Dans la configuration pôle-pôle inter-trou, on observe que la zone entre les deux trous possède des coefficients de sensibilité totaux négatifs et ceux-ci sont positifs à l'extérieur de la zone. L'axe même des trous a un coefficient de sensibilité nul ce qui cause des singularités en rétroprojection. Pour cette configuration, en trois dimensions la surface ayant des coefficients de sensibilité nuls présente une forme tubulaire passant par les trous de forages et fermée au bas (si les premières électrodes sont localisées

suffisamment en profondeur, la surface sera fermée également au sommet). Pour cette configuration, les coefficients de sensibilité totaux à 70m à l'extérieur des trous sont à 1% de la valeur au centre du dispositif. Il faut donc prendre en considération que les valeurs rétroprojetées à l'extérieur des trous ont très peu de valeur à partir d'une certaine distance, généralement équivalente au quart de la distance entre les deux trous; il faut ignorer alors les valeurs rétroprojetées.

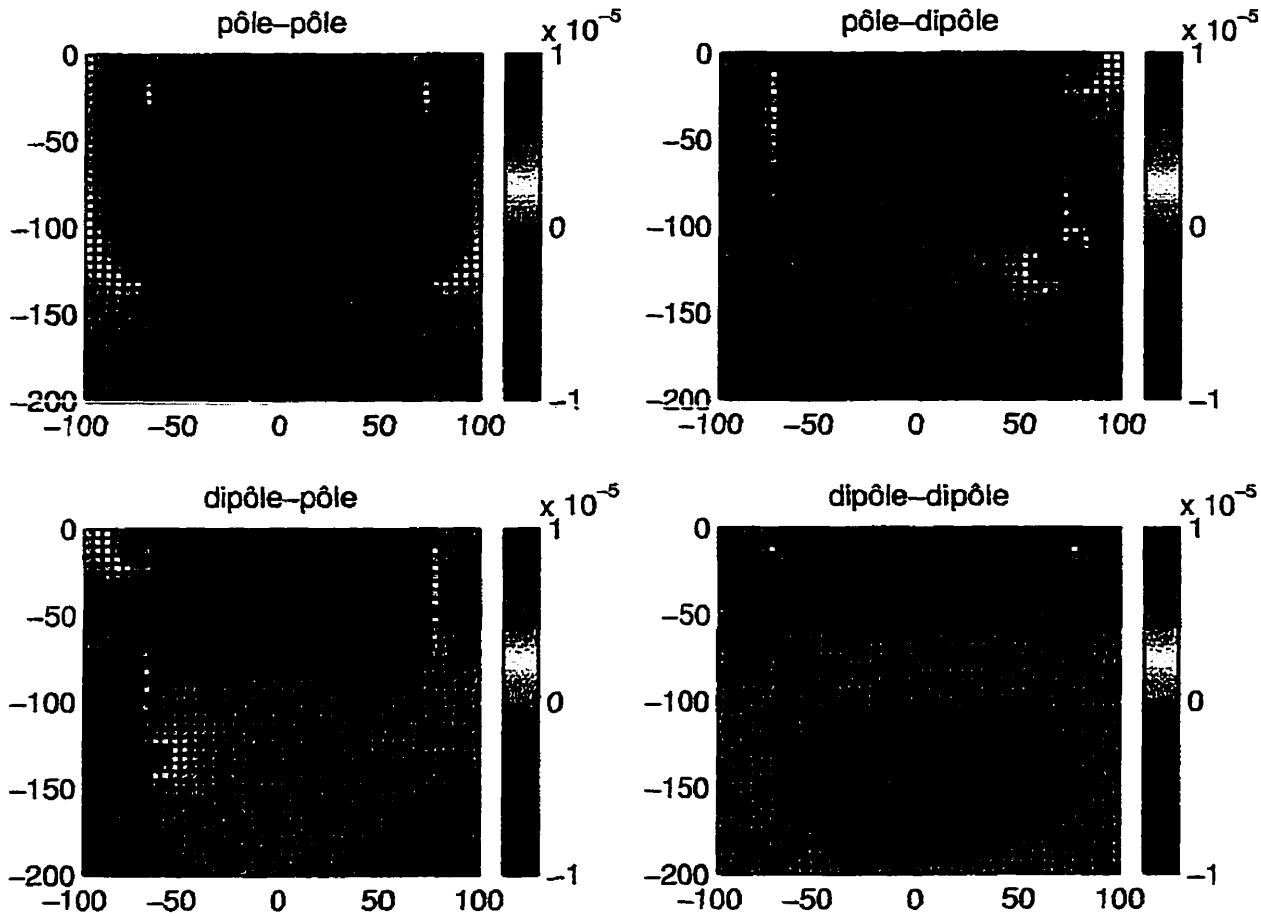


Figure 4.2: Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un milieu homogène.

4.2.2 Coefficients de sensibilité totaux pour des milieux non-homogènes

Les trois figures suivantes présentent la distribution spatiale des coefficient de sensibilité totaux calculés pour des milieux non-homogènes. Les calculs ont été effectués par modélisation avec différences finies à l'aide du programme Fdsens de Klaus Spitzer (1998).

Trois modèles ont été calculés en utilisant une configuration pôle-pôle inter-trou comprenant trois points d'injection et trois points de mesure. Le premier modèle consiste en une couche fortement conductrice (1 Ωm) dans un milieu résistant. Le deuxième consiste en un bloc avec une très grande extension latérale perpendiculaire au plan des trous (2-D) également très conducteur dans un milieu résistant et le troisième est un bloc 3-D (100 X 100 X 30 m) conducteur (1 Ωm) dans un milieu résisitant. Cette modélisation des coefficients de sensibilité pour des milieux non-homogènes a pour but d'évaluer l'erreur engendrée par la rétroprojection où les coefficients de sensibilité sont calculés pour des modèles homogènes.

Dans les cas 1-D et 2-D, on observe que la principale différence causée par la présence d'un corps fortement conducteur est l'apparition d'une région à contribution positive au pourtour de celui-ci. Dans le cas du corps 3-D, le pourtour du corps et principalement à contribution négative sauf au centre du corps (sur le pourtour) où l'on observe une zone fortement positive. Dans un milieu homogène, la contribution est négative partout à l'intérieur de la surface cylindrique passant par les deux trous.

Dans ces cas, l'erreur causée par l'approximation de Born en rétroprojection est substantielle. C'est également le cas dans les exemples de corps fortement résistants. Ceci implique que les résultats de rétroprojection sont meilleurs lorsque les contrastes de propriétés électriques ne sont pas trop brusques.

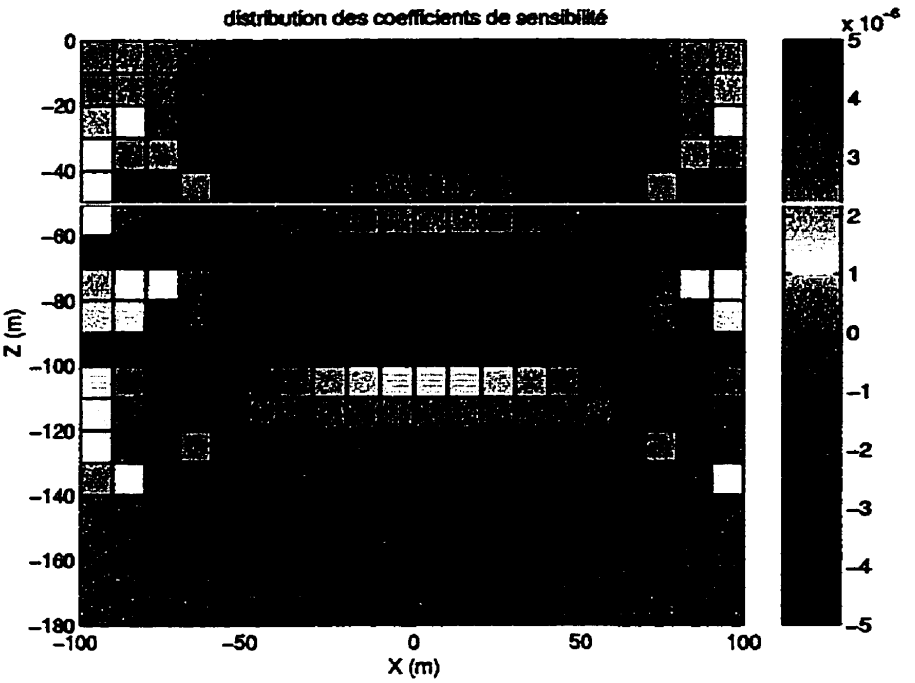


Figure 4.3: Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour une couche conductrice (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m).

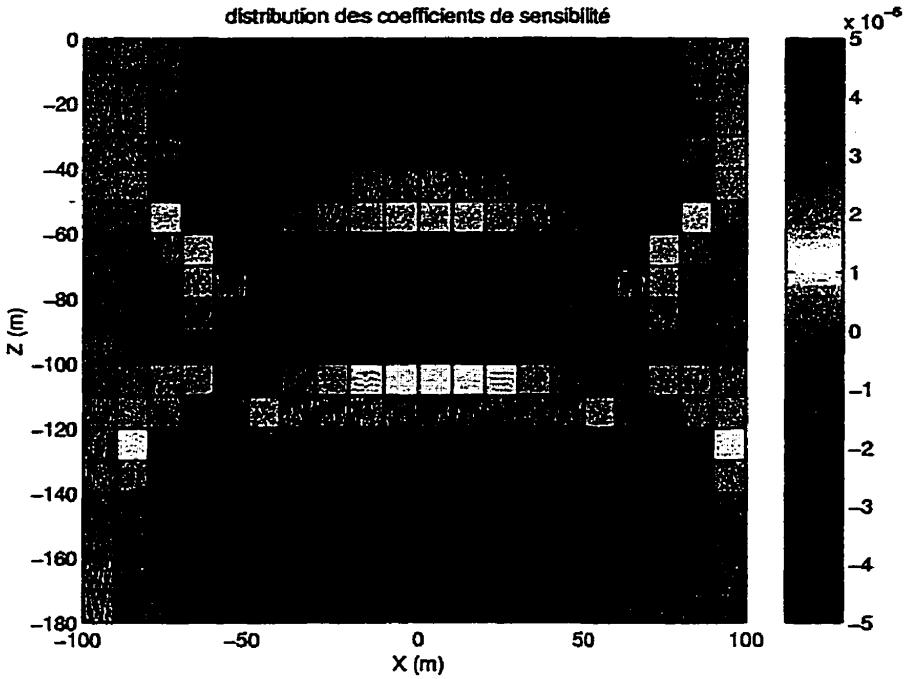


Figure 4.4: Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un bloc conducteur 2-D (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m).

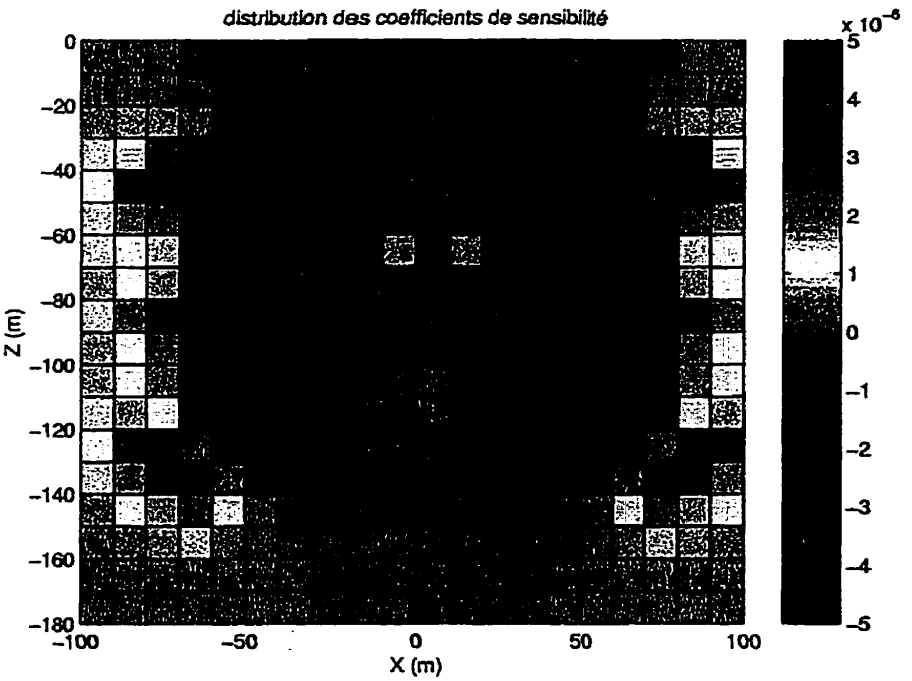


Figure 4.5: Distribution des coefficients de sensibilité totaux pour un bloc conducteur 3-D (1 Ω m) dans un milieu résistant (1000 Ω m).

4.3 Programme de rétroprojection

Le programme de rétroprojection a été élaboré à l'aide du language Visual Basic 5.0 de Microsoft fonctionnant sur Windows 95 et Windows NT également de Microsoft.

Pour utiliser le programme, l'utilisateur doit avoir son fichier de mesures dans un format défini selon le type de données (synthétiques ou de terrain) que l'on désire rétroprojeter. Pour des données synthétiques, le fichier doit contenir 8 colonnes, les trois premières sont les coordonnées du point d'injection et les trois suivantes du point de mesure. La colonne 7 contient les voltages mesurés et la dernière colonne. les chargeabilités apparentes. S'il s'agit de données de terrain, on doit avoir trois fichiers, le premier contient les mesures du levé comprenant 5 colonnes, la première contient la profondeur du point d'injection (par rapport au collet), la deuxième, la profondeur du point de mesure, les trois suivantes contiennent le voltage (en mV), la chargeabilité apparente et le courant(mA). Les deux autres fichiers doivent contenir les renseignements sur chacun des deux trous, c'est à dire trois colonnes contenant la profondeur, l'azimut et le pendage qui ont été mesurés.

Pour lancer le programme, l'utilisateur doit spécifier les paramètres de rétroprojection suivants à l'aide de l'interface:

1. Nom du ficher contenant les données du levé tomographique (ainsi que les noms des lecteur et repertoire).

2. Noms des fichiers qui contiendront les résultats du calcul des résistivités apparentes et des rétroprojections (résistivité, chargeabilité).

3. Position du centre de la première cellule de la grille (Est, Nord, élévation) (pour l'élévation le début de la grille commence vers la surface).

4. Dimensions de la cellule ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$).

5. Nombre de cellules dans chaque direction.

6. Type de données (synthétiques ou de terrain).

7. Configuration du levé (pôle-pôle, pôle-dipôle, dipôle-pôle, dipôle-dipôle).

8. Données à rétroprojecter (résistivité, chargeabilité).

S'il s'agit d'un levé de terrain, une seconde fenêtre apparaîtra. Il faudra y ajouter les coordonnées géographiques des collets des trous, la profondeur de la première électrode, la séparation entre les électrodes ainsi que leur nombre total. Il faut également indiquer les noms des fichiers contenant les renseignement (azimut et pendages) sur les trous.

Une fois le programme lancé, la première étape consiste à calculer les résistivités apparentes pour chaque mesure. Ensuite, on détermine la position de la cellule pour laquelle on calcule la résistivité et la chargeabilité rétroprojetée. On calcule le coefficient de sensibilité de cette cellule par rapport à chacune des combinaisons émetteur-récepteur utilisée que l'on pondère par la valeur de résistivité et de chargeabilité et

divise par la contribution totale (équations 4.7 et 4.21). On obtient une valeur de résistivité et de chargeabilité relative. L'opération est répètée pour la cellule suivante et ainsi de suite sur toute la grille.

Lorsque l'on effectue la rétroprojection des données de terrain, une première étape intermédiaire calcule la position de chacune des électrodes en coordonnées afin de pouvoir calculer les distances.

L'imagerie est ensuite réalisée à l'aide du logiciel Matlab 5.0.

4.4 Résultats de rétroprojection

4.4.1 Modèles simples

Les figures 4.6 et 4.7 présentent le résultat de la rétroprojection des courbes des modèles 3.4 et 3.5, c'est-à-dire un corps fortement conducteur et chargeable 2-D, d'extension infinie en y, non-intercepté par les forages en x . Dans ce cas, on peut discerner une baisse de résistivité et une hausse de chargeabilité qui semble être plus forte près des trous même si le corps ne traverse pas ceux-ci. Ceci s'explique par le fait que les coefficients de sensibilité soient beaucoup plus élevés à proximité des trous. Par contre, ce résultat de rétroprojection est très utile car il indique la présence d'un corps conducteur et chargeable alors qu'à l'analyse géologique des carottes de forage, le conducteur (minéralisation) est passé inaperçu.

Similairement pour les figures 4.8 et 4.9 illustrant le résultat de la rétroprojection des courbes des modélisations 3.2 et 3.3(couche conductrice et chargeable). Toutefois, puisqu'il s'agit d'une couche, celle-ci a été interceptée par les trous de forages et on confirme sa présence. Il est à noter que les valeurs négatives pour les points d'injections 60 et 90 ont été retirés afin de ne pas fausser le résultat. Si on conserve ces valeurs, la rétroprojection présente une certaine asymétrie.

On observe que les valeurs de résistivité et de chargeabilité ne sont pas nécessairement représentatives des valeurs réelles. Pour un même contraste les résistivités rétroprojetés pour la couche sont plus près de la valeur réelle, par contre, la valeur

observée pour le milieu est considérablement plus basse. Toutefois, avec des trous plus long et un nombre plus élevé d'électrodes d'injection et de mesure dans le milieu encaissant, on finit par se rapprocher des valeurs initiales de modélisation.

Pour ce qui est des résultats de rétroprojection (figures 4.10 et 4.11) des courbes de modélisation (3.6 et 3.7) du corps 3-D conducteurs et chargeable , ceux-ci ne sont pas concluants puisque le corps est entièrement inclu dans la zone de coefficients de sensibilité négatifs. Pour réussir à effectuer la rétroprojection d'un corps 3-D. il faudrait avoir des mesures tomographiques prises sur un ou plusieurs plans (levé sur au moins trois trous).

La rétroprojection est également non-concluante dans le cas de blocs ou couches résistantes de trop faible épaisseur par rapport à la séparation des trous. On peut prédire ce résultat en regardant les résultats de modélisation (figures 3.8 à 3.13).

Pour le même corps, si on augmente la séparation des électrodes à 20 m, le corps passe alors inaperçu.

Les rétroprojections présentées aux figures 4.12 et 4.13 sont effectuées pour le modèle du corps 2-D illustré à la figure 3.1 mais en utilisant seulement les points d'injection et les mesures prises aux profondeurs 10m à 80m. On remarque que la définition du corps est beaucoup moins bonne par rapport à la rétroprojection du même corps des figures 4.6 et 4.7 qui possède une meilleure couverture parce que le corps est situé dans une zone où les coefficients de sensibilité sont plus élevés et les électrodes sont bien réparties de part et d'autres du corps.

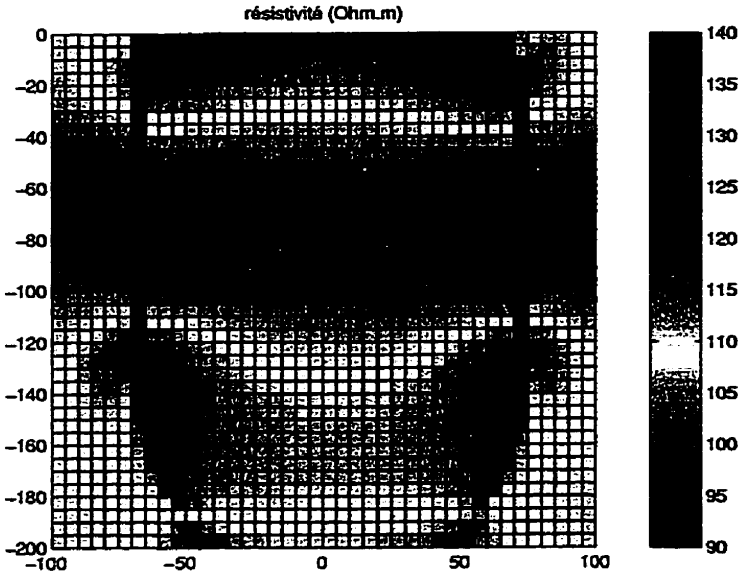


Figure 4.6: Rétroprojection des résistivités apparentes d'un corps conducteur et chargeable 2-D(courbes de la figure 3.4).

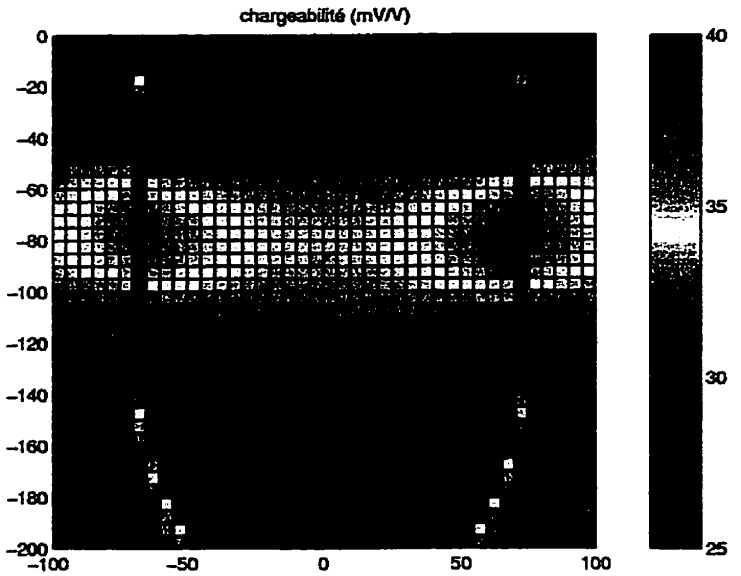


Figure 4.7: Rétroprojection des chargeabilités apparentes d'un corps conducteur et chargeable 2-D(courbes de la figure 3.5).

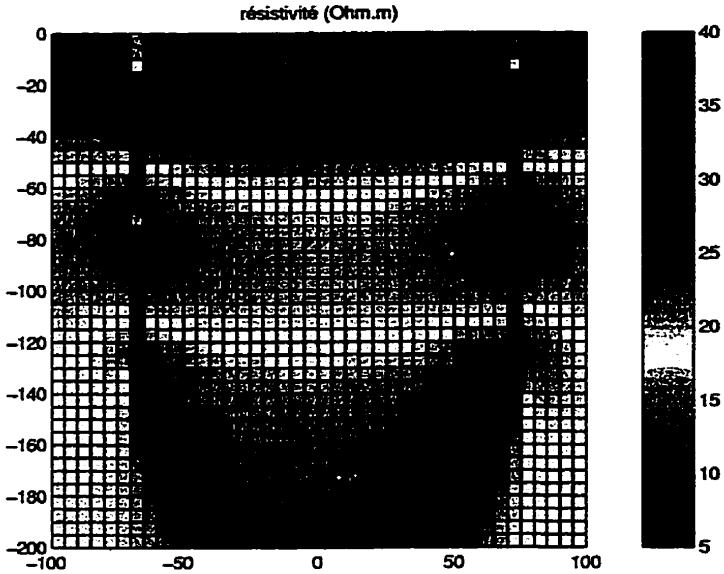


Figure 4.8: Rétroprojection des résistivités apparentes d'une couche conductrice et chargeable. (courbes de la figure 3.2)

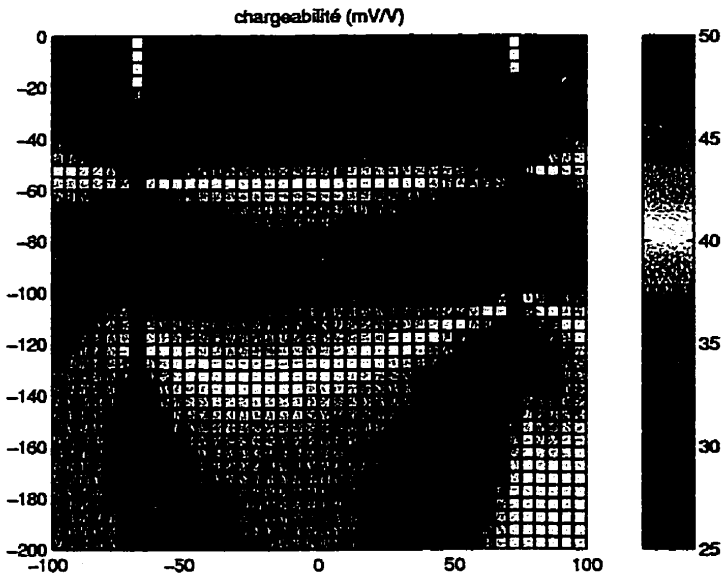


Figure 4.9: Rétroprojection des chargeabilités apparentes d'un couche conductrice chargeable (courbes de la figure 3.3).

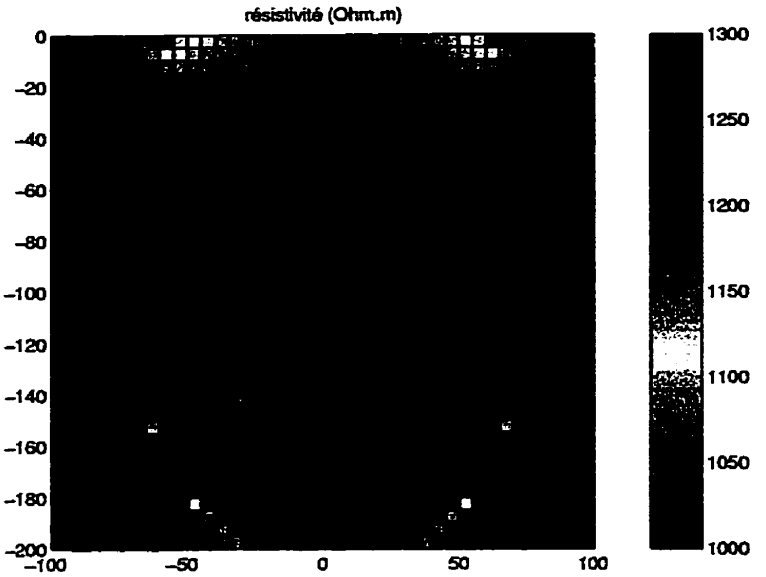


Figure 4.10: Rétroprojection des résistivités apparentes du bloc 3-D conducteur et chargeable (courbes de la figure 3.6).

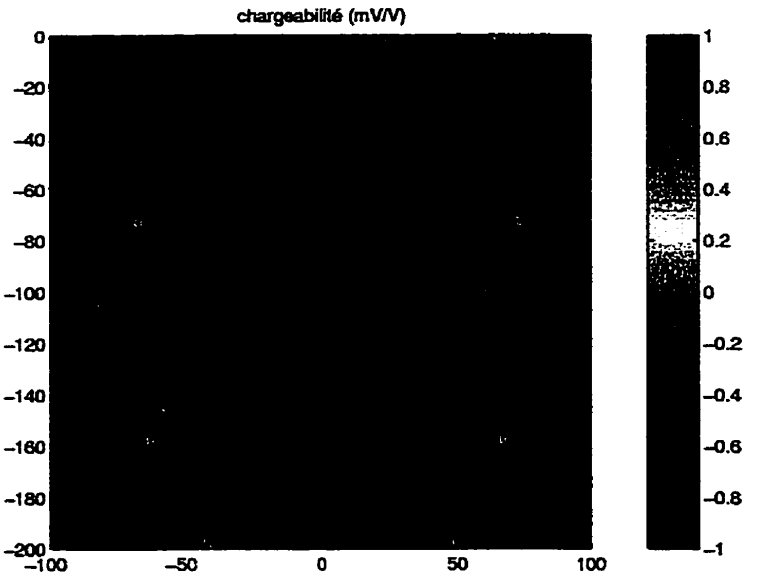


Figure 4.11: Rétroprojection des résistivités apparentes du bloc 3-D conducteur et chargeable (courbes de la figure 3.7).

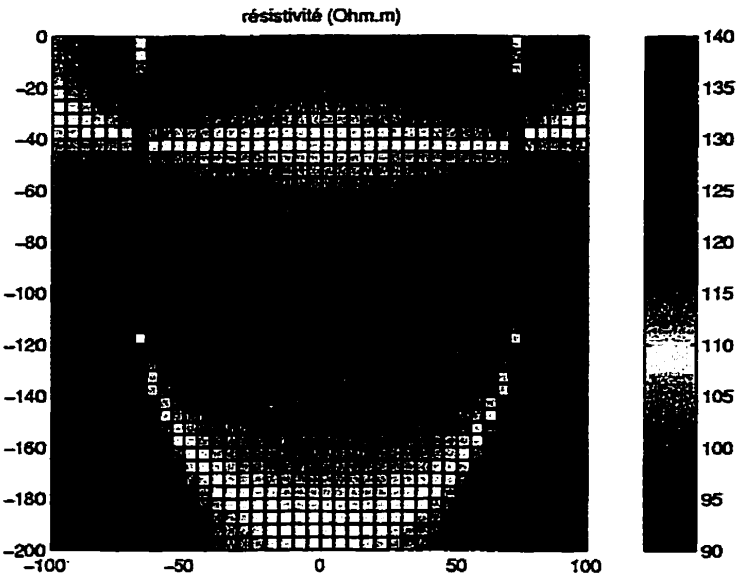


Figure 4.12: Rétroprojection des résistivités apparentes du corps conducteur et chargeable 2-D mais avec les électrodes 10 à 80 seulement.

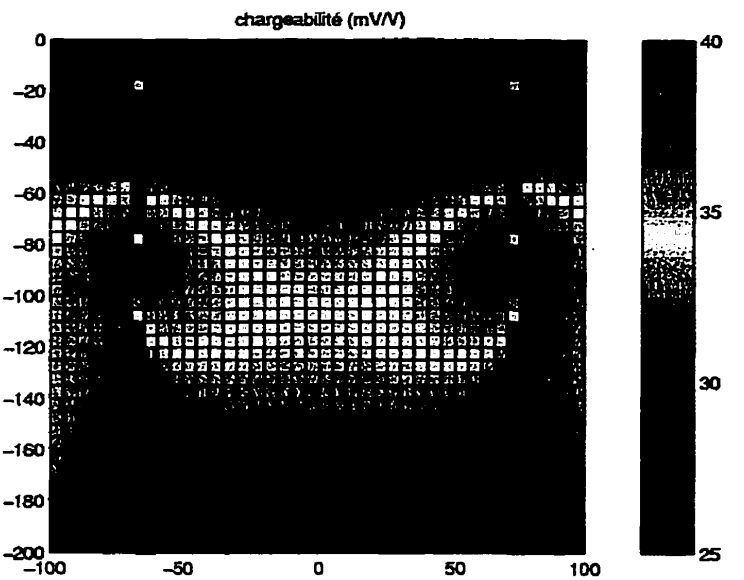


Figure 4.13: Rétroprojection des chargeabilités apparentes du corps conducteur chargeable 2-D mais avec les électrodes 10 à 80 seulement.

Les figures 4.14 et 4.15 illustrent les résultats de rétroprojection pour une couche résistante de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m. Dans ce cas, la couche semble décalée dans la rétroprojection de résistivité, ceci est dû à l'asymétrie des courbes (voir figure 3.17). Pour la rétroprojection des chargeabilités, la hausse est observable vis-à-vis les trous, mais celle-ci demeure faible.

Les figures 4.16 et 4.17 montrent les résultats de la rétroprojection des résistivités et des chargeabilités apparentes calculées à la section 3.1.1 pour une couche mince conductrice inclinée. Les résultats montrent bien l'inclinaison de la couche quoique celle-ci ne soit pas très bien définie. On peut toutefois améliorer la définition de la couche en combinant avec un levé où on met les électrodes d'injection dans le trou dans lequel on a précedemment effectué les mesures et vice-versa pour l'autre trou.

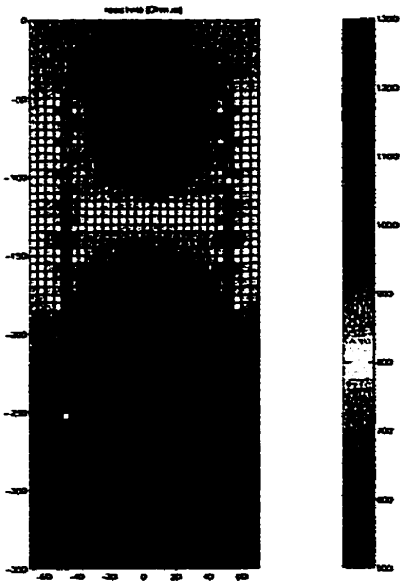


Figure 4.14: Rétroprojection des résistivités apparentes pour une couche résistante de 80 m d'épaisseur avec des trous séparés de 100 m.

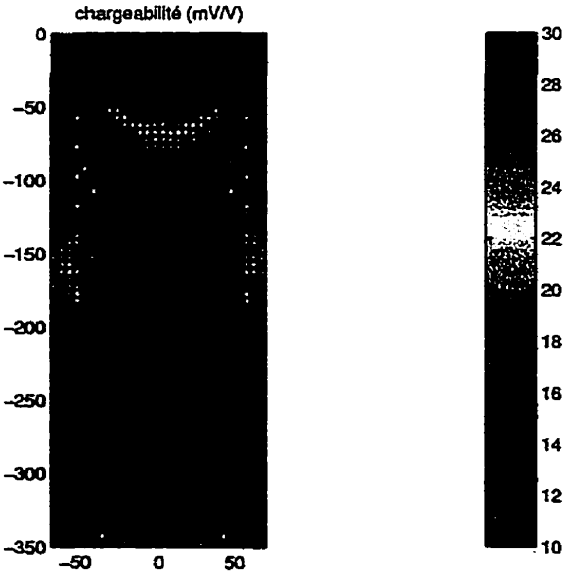


Figure 4.15: Rétroprojection des chargeabilités apparentes pour une couche résistante de 80 m d'épaisseur des trous séparés de 100 m.

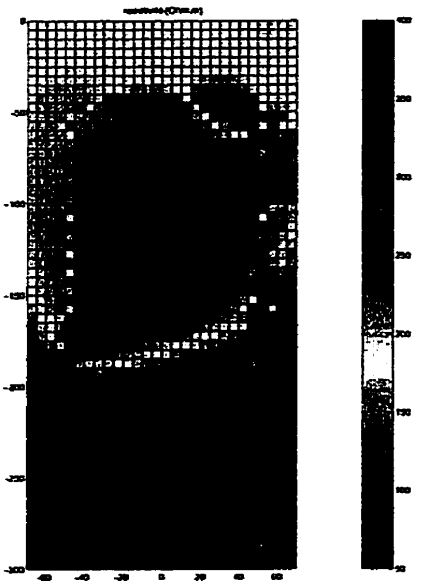


Figure 4.16: Rétroprojection des résistivités apparentes pour une couche mince conductrice inclinée avec des trous séparés de 100 m.

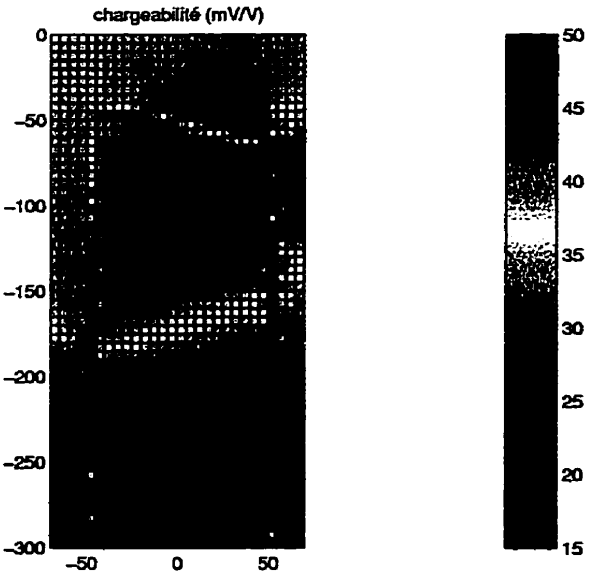


Figure 4.17: Rétroprojection des chargeabilités apparentes pour une couche mince conductrice inclinée avec des trous séparés de 100 m.

4.4.2 Modèles complexes

La section suivante présente les résultats des rétroprojections pour les modèles calculés à la section 3.2

4.4.2.1 Sulfures massifs

Les rétroprojections des figures 4.18 et 4.19 montrent bien la baisse de résistivité et la hausse de chargeabilité associées au gisement de sulfures massifs de la figure 3.21. Il est à noter que les contrastes obtenus pour la rétroprojection des résistivités apparentes sont très près des valeurs initiales du modèle.

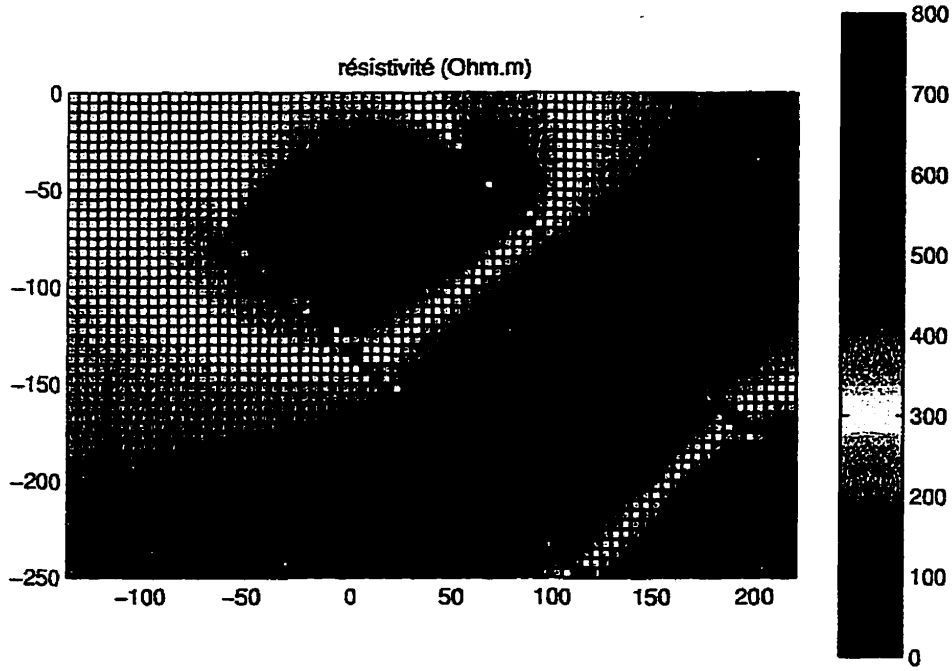


Figure 4.18: Rétroprojection des résistivités apparentes.

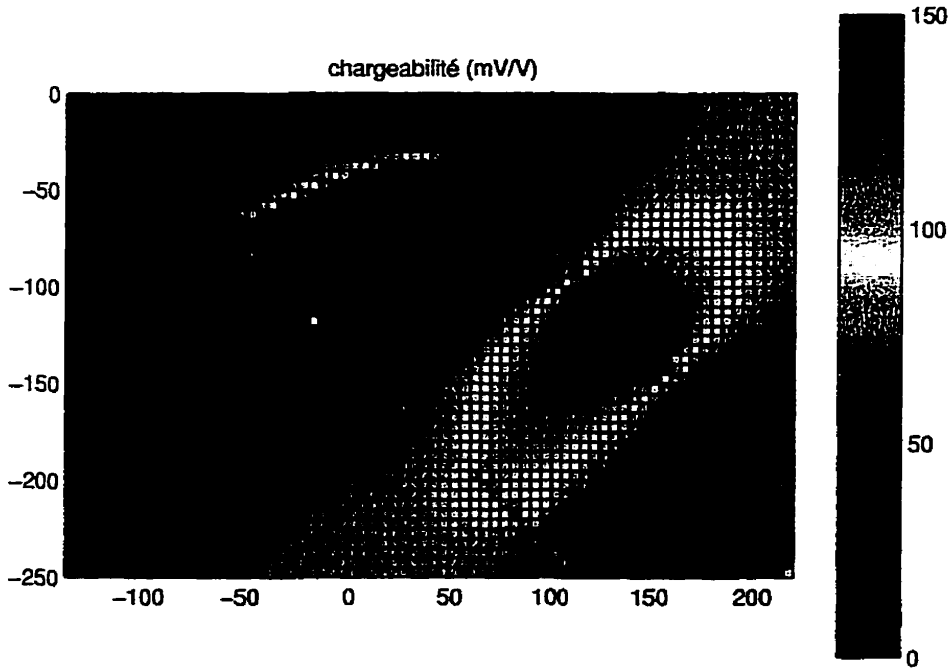


Figure 4.19: Rétroprojection des chargeabilités apparentes.

4.4.2.2 Or disséminé

La rétroprojection des résistivités apparentes (figure 4.20) semble montrer une hausse des résistivités dans la portion où se trouve la zone silicifiée (approximativement au centre). Par contre, les valeurs ne redescendent pas et continuent d'augmenter. De plus, on ne retrouve pas vraiment la géométrie initiale de la couche. Peut-être que si on avait continué le levé plus en profondeur, les valeurs de résistivité seraient redescendues puisqu'éventuellement les mesures de résistivité n'auraient plus été affectées par la présence de la couche résistante et celles-ci auraient plus de poids par rapport à la totalité du levé.

Dans le cas de la rétroprojection des chargeabilités (figure 4.21), on note définitivement une hausse cdans la section centrale du levé. La géométrie de cette zone n'est pas très bien définie, ceci étant dû à l'angle que fait la couche avec les trous. La définition pourrait être améliorée en effectuant un second levé en interchangeant les trous d'injection et de mesure car, comme on a pu voir aux figures 4.16 et 4.17, la réponse lorsque le corps est à angle par rapport aux trous semble souvent plus forte d'un coté (asymétrie).

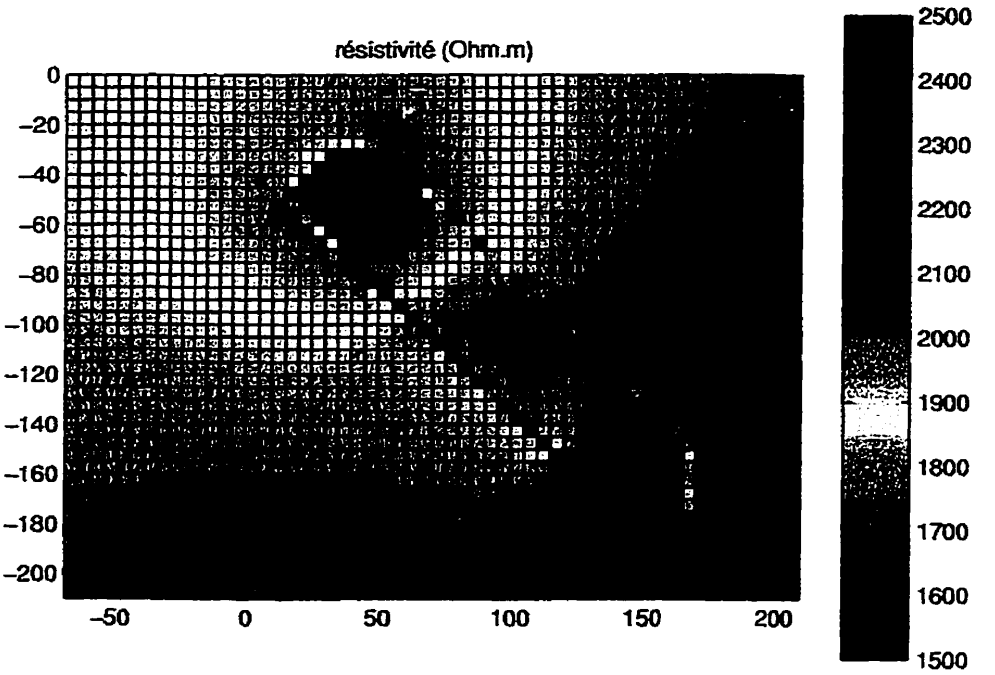


Figure 4.20: Rétroprojection des résistivités apparentes.

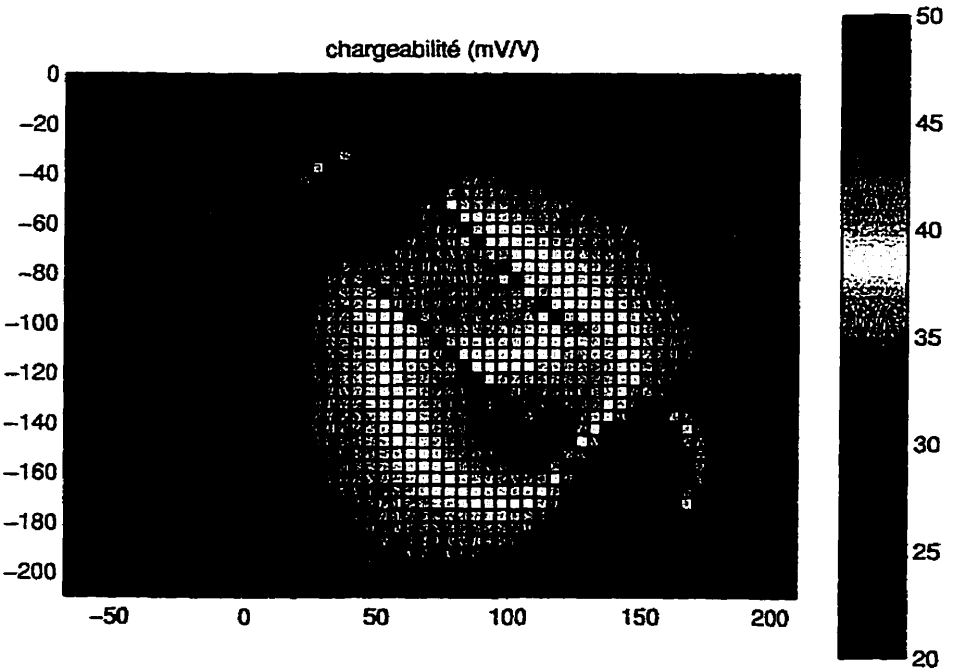


Figure 4.21: Rétroprojection des chargeabilités apparentes.

4.4.2.3 Gisement de nickel et cuivre extension latérales variables

Ces résultats de rétroprojection des résistivités montrent que si l'extension latérale de la couche est limitée, on ne peut l'observer en rétroprojection. Dans ce cas, la séparation réelle entre les trous est de 40 m, ce qui est le diamètre approximatif du cylindre de coefficients de sensibilité négatifs. Il semble que l'on commence à observer une baisse de résistivité (toutefois décalée) lorsque l'extension latérale est environ trois fois la distance entre les trous (dans ce cas-ci).

Pour ce qui est des chargeabilités apparentes, les hausses sont beaucoup plus claires et ce, même lorsque l'extension latérale est seulement le double de la distance entre les trous. Plus l'extension latérale augmente, plus l'intensité du contraste en rétroprojection est important.

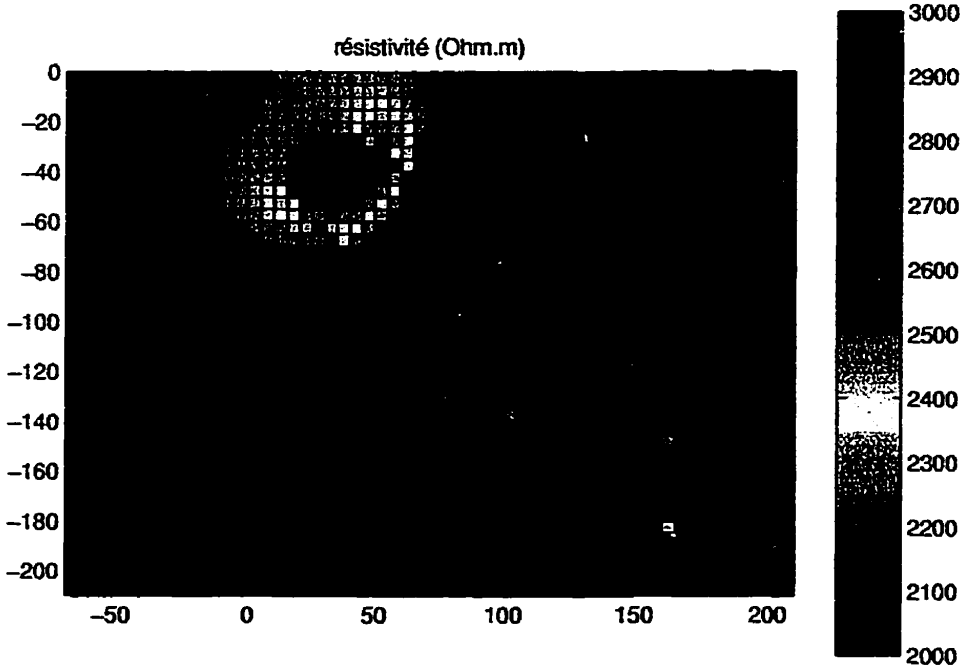


Figure 4.22: Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 84 m).

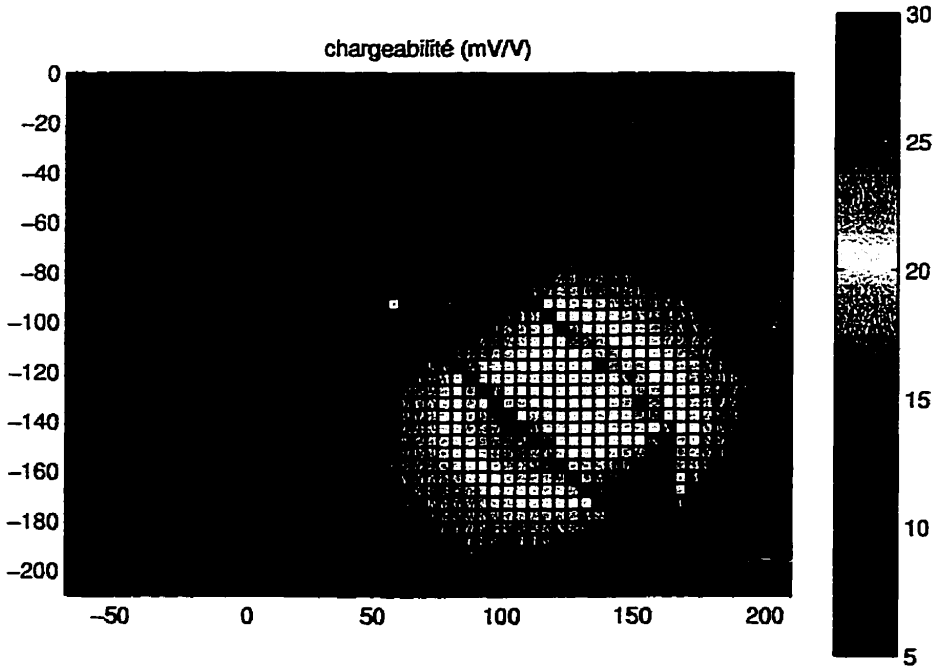


Figure 4.23: Rétroprojection des chargeabilités apparentes (extension latérale de 84 m).

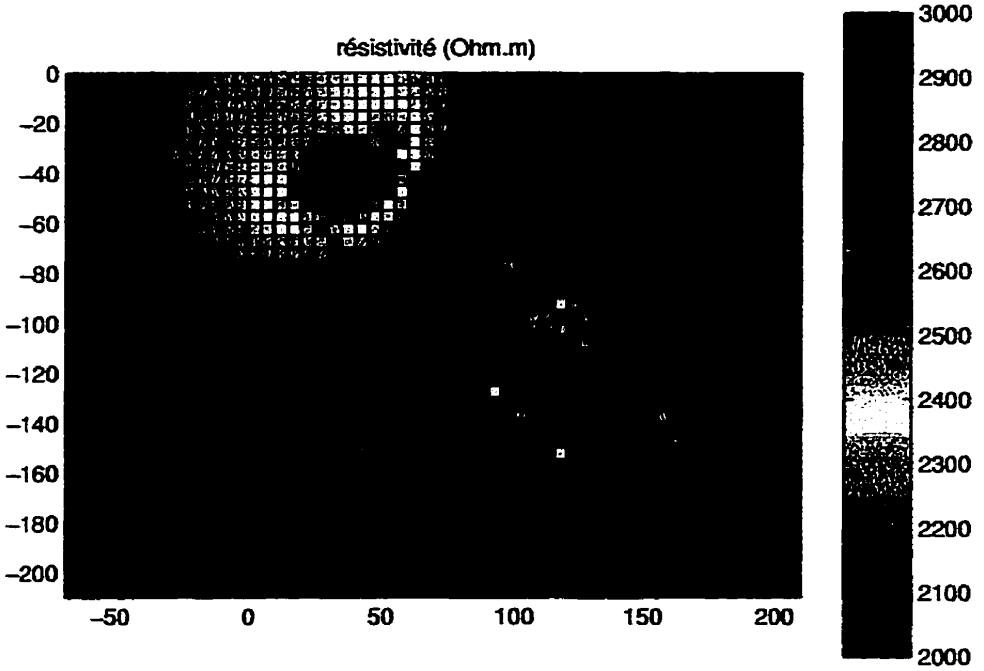


Figure 4.24: Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 140 m).

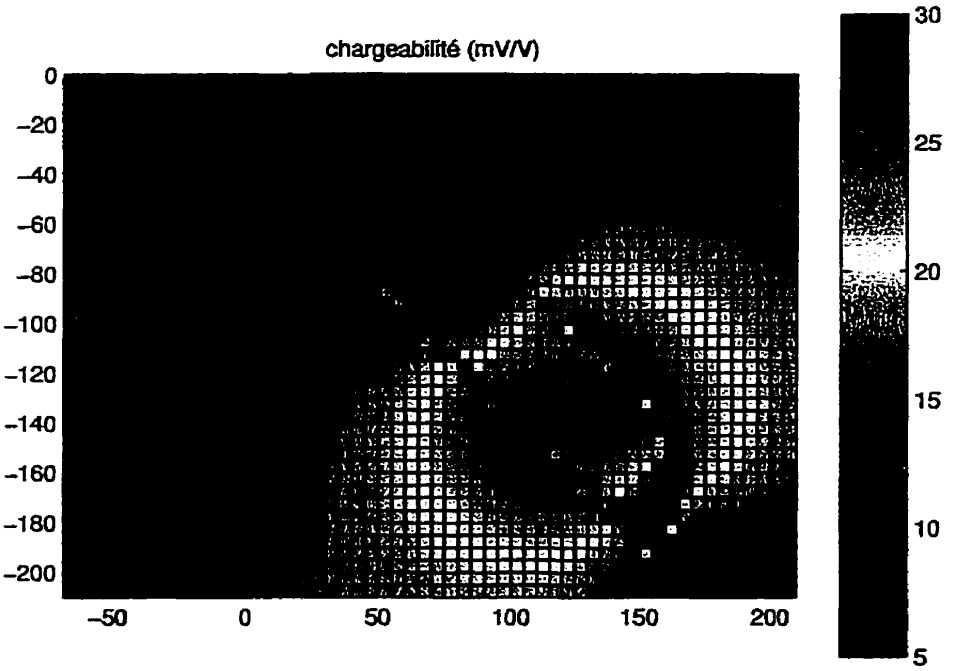


Figure 4.25: Rétroprojection des chargeabilités apparentes (extension latérale de 140 m).

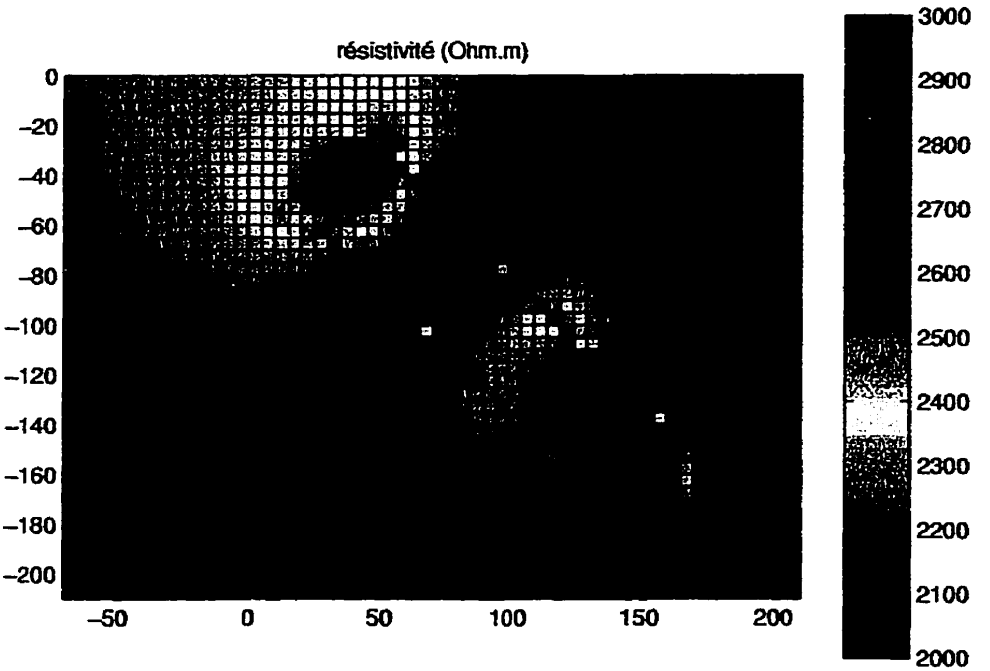


Figure 4.26: Rétroprojection des résistivités apparentes (extension latérale de 196 m).

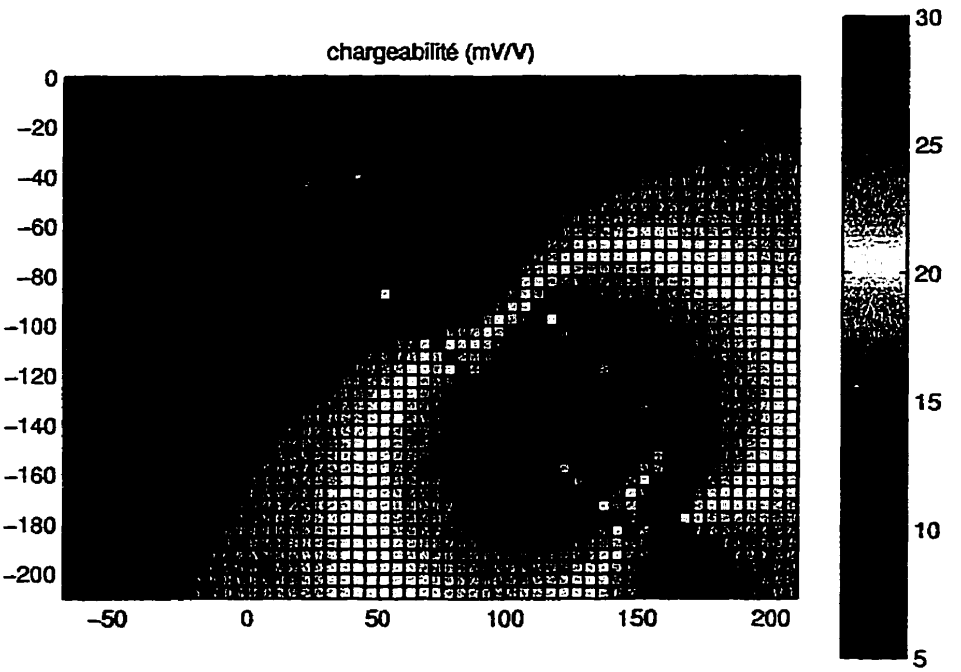


Figure 4.27: Rétroprojection de chargeabilités apparentes (extension latérale de 196 m).

4.5 Discussion des résultats de rétroprojection

De façon générale, on voit que les résultats de rétroprojection de données synthétiques montre l'efficacité de cet outil d'interprétation surtout dans les cas où on se trouve en présence de corps conducteurs qui ont une extension latérale importante mais qui n'ont pas été observés directement lors de l'analyse géologique des forages.

Les résultats semblent même meilleurs pour identifier des zones où il y a une hausse de la chargeabilité et donc une possibilité de minéralisation disséminée. On remarque également dans les rétroprojections effectuées que les réponses en polarisation provoquée semblent plus stables et plus symétriques quand la géométrie des trous n'est pas optimale et que nous sommes en présence de couches résistantes. Ceci pourrait en partie s'expliquer par la forme des réponses observées en modélisation au chapitre 3.

En rétroprojection de résistivité, il est impossible de déterminer en utilisant des coefficients de sensibilité pour un milieu homogène si un corps est uni-dimensionnel (couche), 2-D ou 3-D. La présence d'un corps tri-dimensionnel conducteur entièrement inclus dans la zone de contribution négative apparaîtra comme un résistant et un corps conducteur ayant une extension latérale un peu plus grande pourrait passer complètement inaperçu. Pour déterminer la présence d'un tel corps, il faudrait effectuer un levé tomographique en surface, sur une série de trous formant un plan ou sur trois trous ou plus formant les arêtes d'un volume. (Pour cette dernière solution, il faudrait modifier le programme de rétroprojection afin de réduire l'effet de la zone

de coefficients de sensibilité nuls qui produisent des artéfacts importants.)

Il pourrait également être très intéressant de combiner les résultats inter-trous avec un levé de résistivité et de polarisation provoquée en-trou afin de préciser si le corps est à proximité ou traverse les trous. Puisque dans un levé en-trou la zone d'investigation est limitée à la proximité du trou et que les coefficients de sensibilité dans cette zone sont plus élevés, il est possible de déterminer un peu plus pécisément la position du corps.

L'utilisation de levés diagraphiques permet également une meilleure interprétation des résultats. Parce que l'on connait les valeurs intrinsèques des corps interceptés, il est possible d'évaluer l'extension (couche, 2-D, 3-D) du corps. Par exemple, si un levé diagraphique indique la présence d'un conducteur et que la rétroprojection ne montre aucun conducteur ou même un corps résistant à cet endroit, on pourrait soupçonner que le corps conducteur a une faible extension latérale (en supposant que l'épaisseur du corps est suffisante par rapport à l'espacement des électrodes). De la même façon, si les valeurs de résistivité observées en rétroprojection sont proches des valeurs mesurées en diagraphies, on peut supposer que le corps est continu entre les deux trous. Ce qui est impossible à déterminer en tomographie inter-trous seulement puisque les coefficients de sensibilité sont très fort à proximité des trous, la rétroprojection ne peut montrer la continuité du corps.

Le tableau suivant présente un résumé des principaux résultats de modélisation et de rétroprojection.

Tableau 4.1: Résumé des résultats de modélisation et rétroprojection

modèle	figure illustrant les résultats		figure illustrant la rétroprojection		principales conclusions
	résistivité	chargeabilité	résistivité	chargeabilité	
couche conductrice et chargeable	3.2	3.3	4.8	4.9	• baisse de résistivité; • hausse de chargeabilité; • bonne position.
bloc 2-D conducteur et chargeable	3.4	3.5	4.6	4.7	• baisse de résistivité; • hausse de chargeabilité; • bonne position.
bloc 3-D conducteur et chargeable	3.6	3.7	4.10	4.11	• hausse de résistivité; • baisse de chargeabilité; • faible variation de la chargeabilité apparente; • rétroprojection sur section non-concluante.
couche résistante et chargeable 30m, sép. 140m	3.8	3.9			• impossible d'observer la couche; • pénétration du courant insuffisante.
bloc 2-D résistant et chargeable	3.10	3.11			• très faible variation des résistivités et chargeabilités apparentes.
bloc 3-D résistant et chargeable	3.12	3.13			• très faible variation des résistivités et chargeabilités apparentes.

Tableau 4.1: Résumé des résultats de modélisation et rétroprojection (suite).

modèle	figure illustrant les résultats		figure illustrant la rétroprojection		principales conclusions
	résistivité	chargeabilité	résistivité	chargeabilité	
couche chargeable		3.14			• très faible variation des chargeabilités apparentes.
bloc 2-D chargeable		3.15			•très faible variation des chargeabilités apparentes.
bloc 3-D chargeable		3.1.1			• très faible variation des chargeabilités apparentes.
couche résistante et chargeable 80m, sép. 100m	3.17	3.18	4.14	4.15	• meilleure pénétration du courant: • meilleure position de la couche; • amplitude de l'anomalie en rétroprojection demeure faible.
couche mince conductrice chargeable inclinée	3.19	3.20	4.16	4.17	• baisse de résistivité: • hausse de la chargeabilité: • inclinaison de la couche assez bien reconstruite en rétroprojection.

Chapitre 5

Applications aux sites de Selbaie et McConnell

Jusqu'ici nous avons montré et discuté des résultats de rétroprojection appliquée sur des données synthétiques. Dans le présent chapitre il sera question de l'application du programme sur des données réelles.

Deux cas seront étudiés: un levé effectué aux Mines Selbaie, Québec et le second au site expérimental de McConnell dans la région de Sudbury en Ontario. Dans les deux cas, les mesures ont été effectuées par la firme Val d'Or SAGAX inc.

5.1 Cas Selbaie

La mine Selbaie est localisée 82 km au nord-ouest de la municipalité de Joutel dans le nord-ouest de la province de Québec. Située dans le segment Matagami-Chibougamau de la ceinture de roches vertes abitibienne, la mine exploite un gisement

de cuivre et zinc avec une concentration non-négligeable d'or et d'argent, sous forme de veines et de brèches de sulfures. Les roches associées à la minéralisation sont une brèche rhyodacitique et des tuffs felsiques à l'intérieur d'une séquence volcanoclastique felsique.

La figure 5.1 montre la section sur laquelle a été effectuée le levé tomographique. L'injection s'est faite dans le trou le plus au sud (à gauche) et les mesures dans le trou au nord. Les premiers points d'injection et de mesures sont à 50 m de profondeur dans chaque trou et les stations sont espacées de 10 m. Un pôle d'injection est donc placé à 50 m dans le trou sud et un câble comportant sept pôles de mesures espacés de 20 m est placé dans le trou nord. Pour obtenir des mesures à tous les 10 m, une première série de mesures est effectuée, le câble est ensuite descendu de 10 m pour effectuer une seconde série de mesures, le processus est répété pour obtenir des mesures aux 10 m jusqu'à la fin du trou. On descend ensuite le pôle d'injection de 10 m et on recommence les mesures.

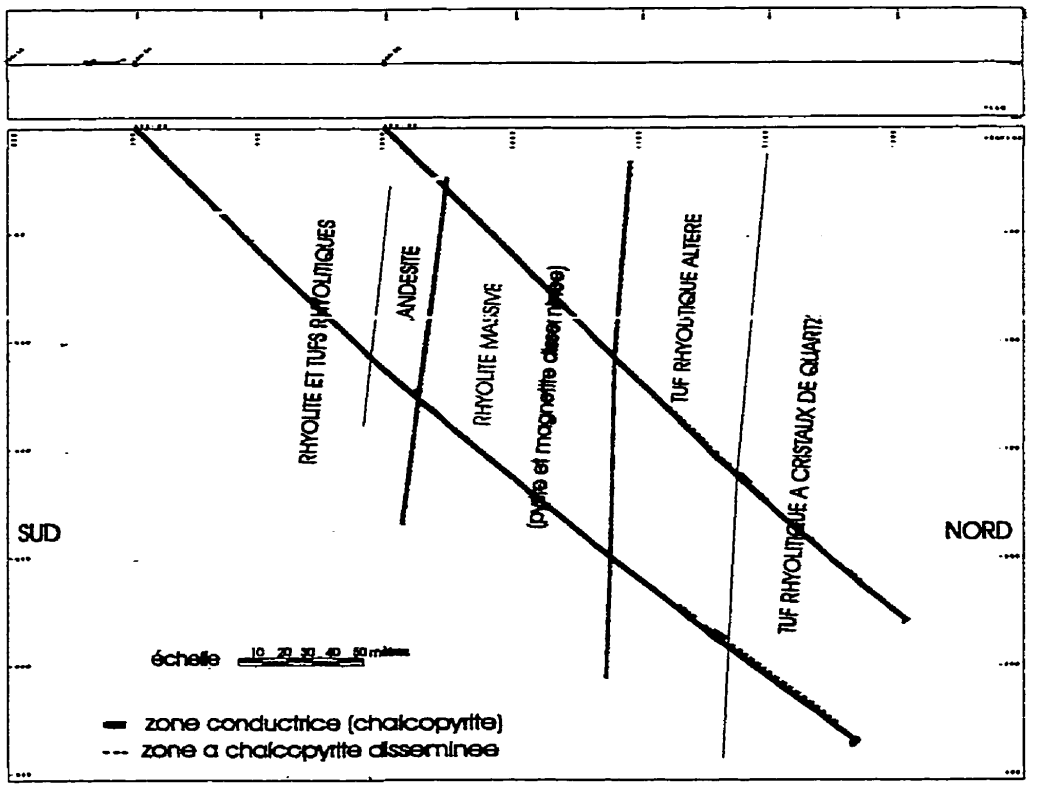


Figure 5.1: Section géologique à Selbaie des trous où le levé a été réalisé.

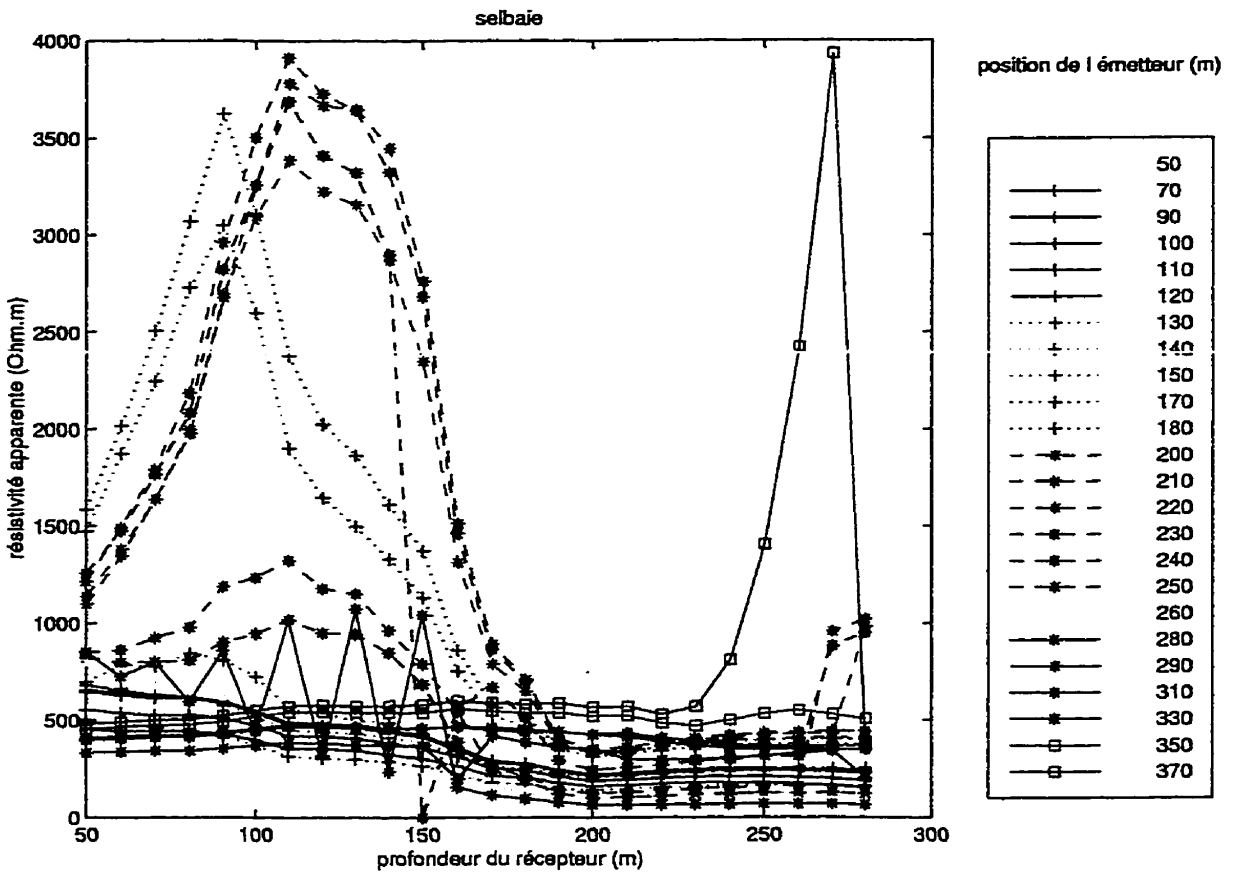


Figure 5.2: Résultats du levé de résistivité effectué à Selbaie.

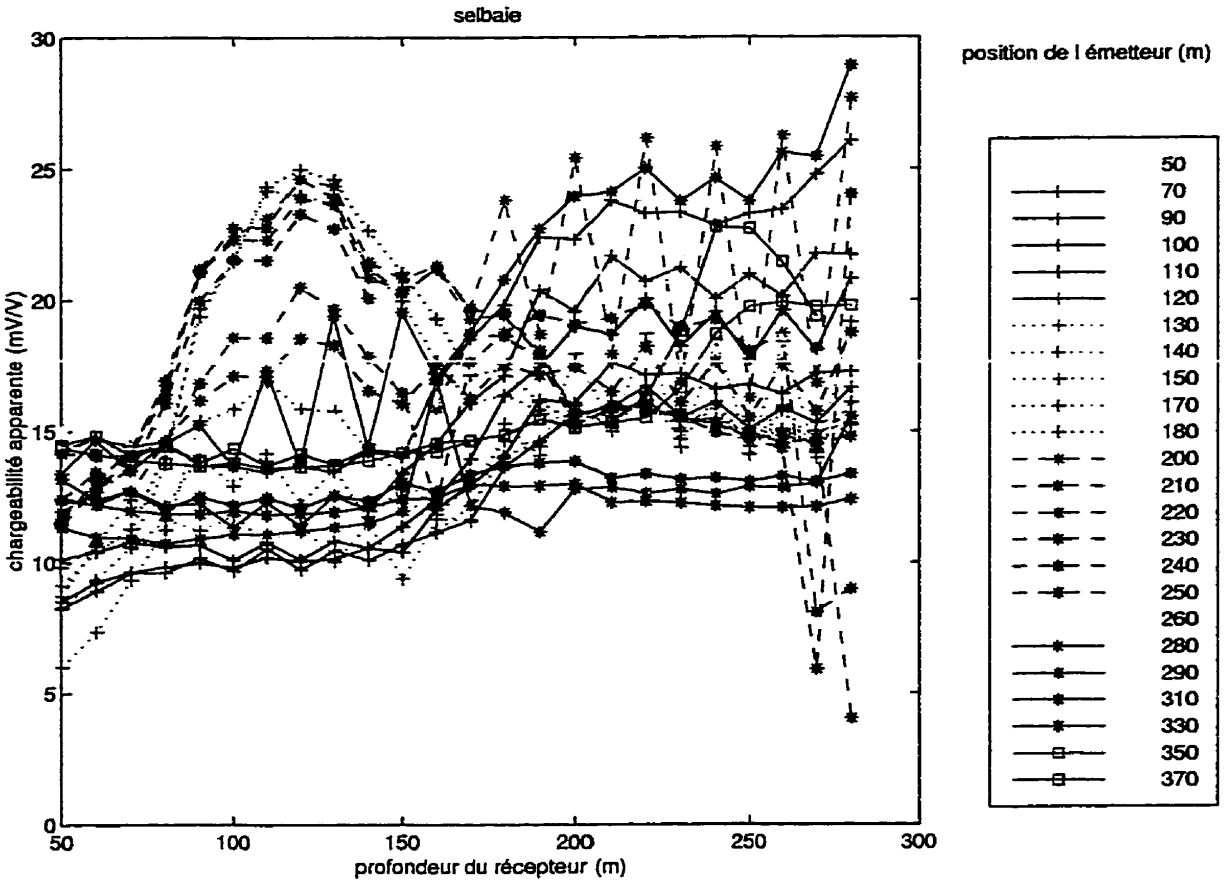


Figure 5.3: Résultats du levé de chargeabilité effectué à Selbaie.

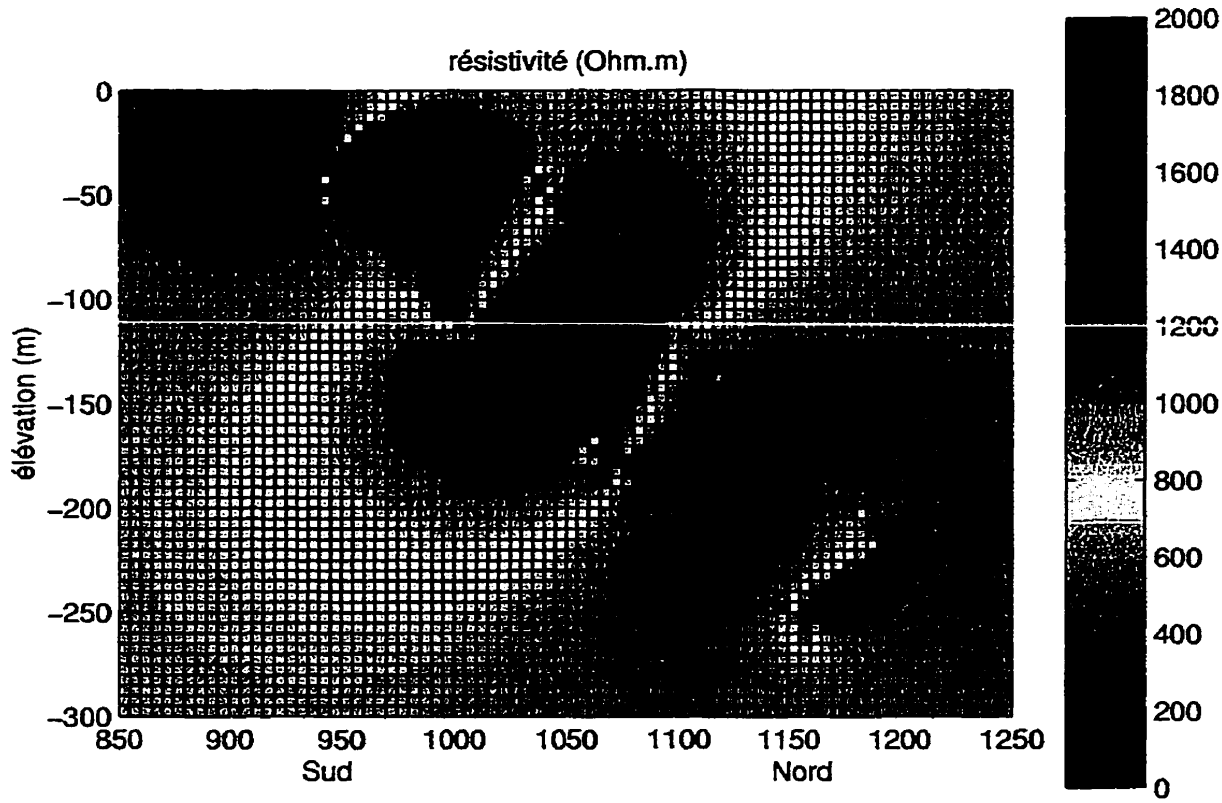


Figure 5.4: Rétroprojection des résultats du levé de résistivité effectué à Selbaie.

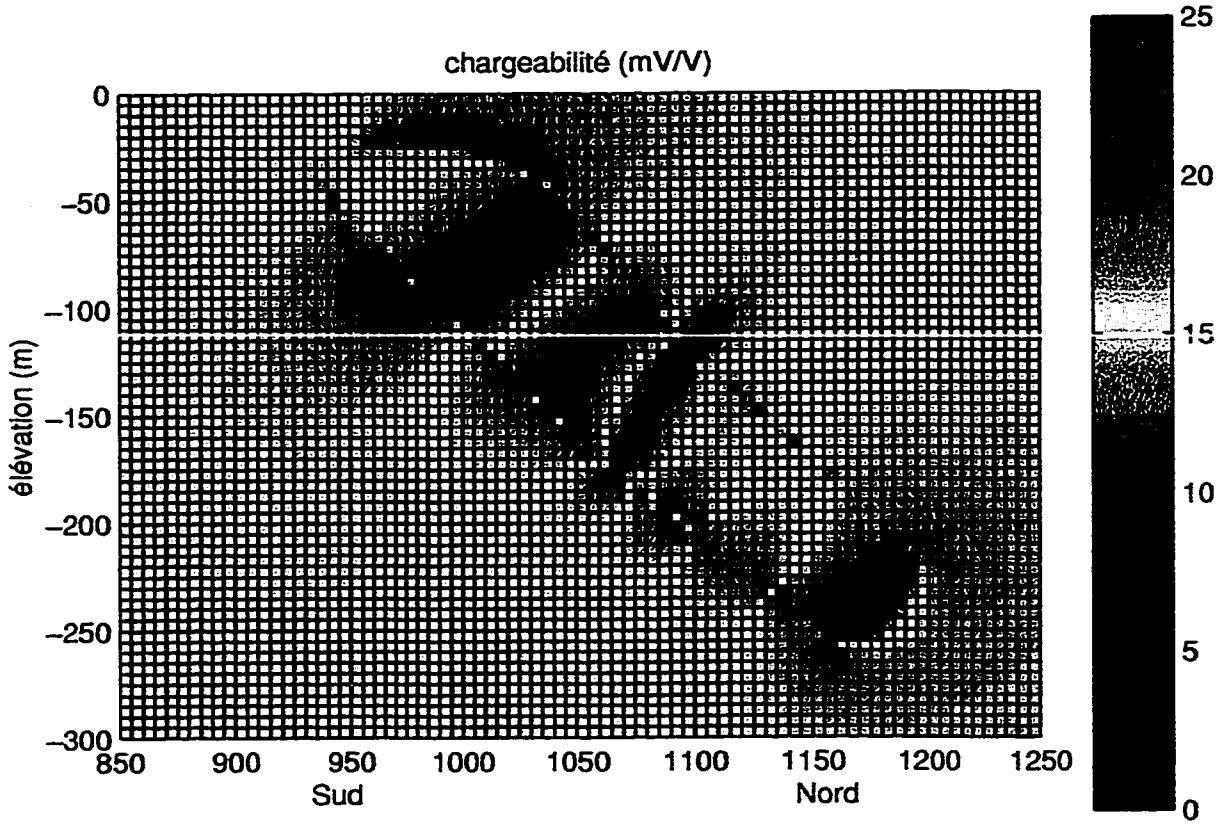


Figure 5.5: Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité effectué à Selbaie.

Les figures 5.2 et 5.3 montrent les résultats des levés de résistivité et de polarisation provoquée. On note une hausse considérable des résistivités apparentes pour les points d'injection 170 à 230 entre les profondeurs de mesure 50 et 170. Pour les chargeabilités, l'interprétation directe est plus complexe. De plus, il y a un effet "dent de scie" causé par la méthode utilisée pour le levé. La prise de mesures en deux temps pour un même segment introduit un certain décalage à quelques endroits dans les données qui pourrait être causé par un niveau de bruit différent entre les deux séries de lecture. Il est également à noter que l'augmentation du bruit observé sur les mesures de chargeabilités apparentes est possiblement attribuable à l'augmentation de la conductivité en profondeur, ce qui aurait entraîné une baisse du voltage et conséquemment du niveau du signal.

Les figures 5.4 et 5.5 montrent le résultat de rétroprojection du levé. En résistivité apparente, on observe une hausse considérable de la résistivité vis-à-vis la zone correspondant aux rhyolites massives, ce qui semble tout-à- fait logique. Dans cette même zone, on observe également une hausse de la chargeabilité causée par la présence de pyrite disséminée (très chargeable) et de magnétite (légèrement chargeable). On remarque la présence de deux autres petites zones chargeables qui pourraient être dues aux zones de pyrite disséminée. La présence du conducteur comme tel passe inaperçue à cause de sa faible épaisseur par rapport à l'espacement entre les électrodes. Les zones très à l'extérieur des deux trous en rétroprojection ont un coefficient de sensibilité très faible (voir chapitre 4.2.1). Puisqu'avec le programme de rétroprojection, il est

difficile d'effectuer un calcul sur une grille asymétrique, des valeurs sont calculées pour ces zones. Toutefois, ces valeurs ne sont pas significatives et il faut les ignorer.

5.2 Cas McConnell

Dans le cadre de la chaire de géophysique en forage, le laboratoire de géophysique appliquée de l'École Polytechnique de Montréal a fait effectuer un levé tomographique en forage au site d'essais du dépôt McConnell (Garson Offset), propriété d'INCO, qui représente un gisement de nickel typique de la région de Sudbury.

Le gisement de McConnell est localisé dans la brèche de Sudbury entre des norites au nord et des métavolcaniques au sud. Le corps minéralisé est tabulaire, subvertical, de 152 m d'extension latérale le sommet est à une profondeur d'environ 25 m et l'extension verticale est de 610 m à son maximum.

Des levés diagraphiques de la Commission Géologique du Canada (Killeen, Mwenifumbo et Elliott, 1995a) ont montré que le dépôt est très conducteur et très chargeable.

L'expérience consistait en deux levés tomographiques effectués sur une même section (voir figure 5.6). Pour le premier levé, les électrodes d'injection étaient dans le trou 78929 et les électrodes de mesures dans le trou 78930. Dans le second levé les électrodes d'injection étaient dans le trou 78930 et les mesures prises dans le trou 80578.

Les trois trous intersectaient les sulfures massifs en fin de trou, dans une géométrie qui n'est pas des plus optimales, comme on l'a vu à la section 3.2.3.

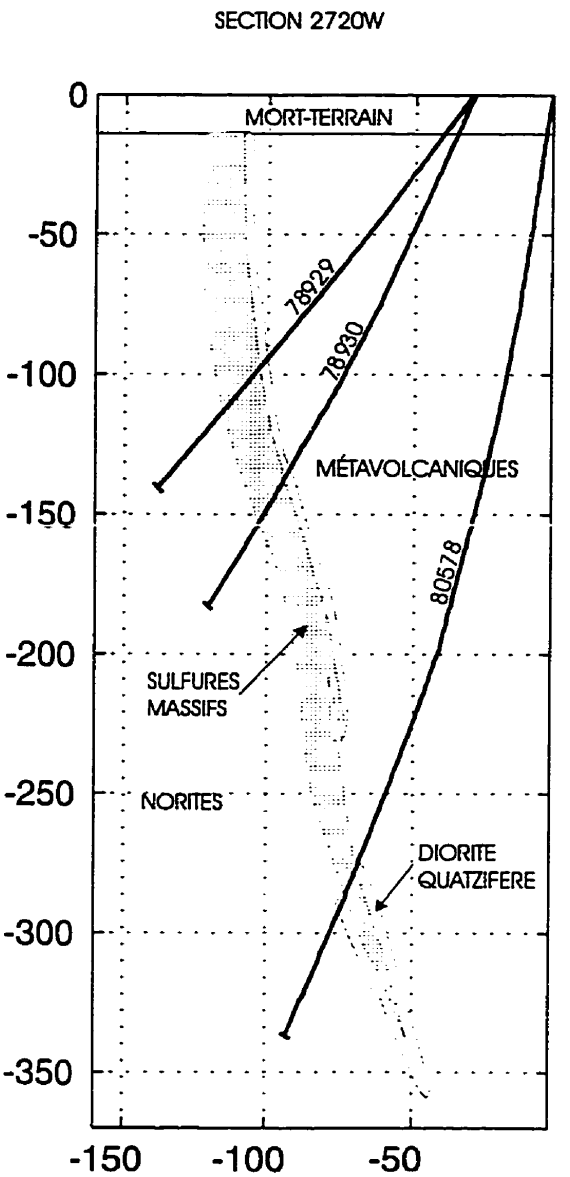


Figure 5.6: Section géologique à McConnell où le levé a été réalisé.

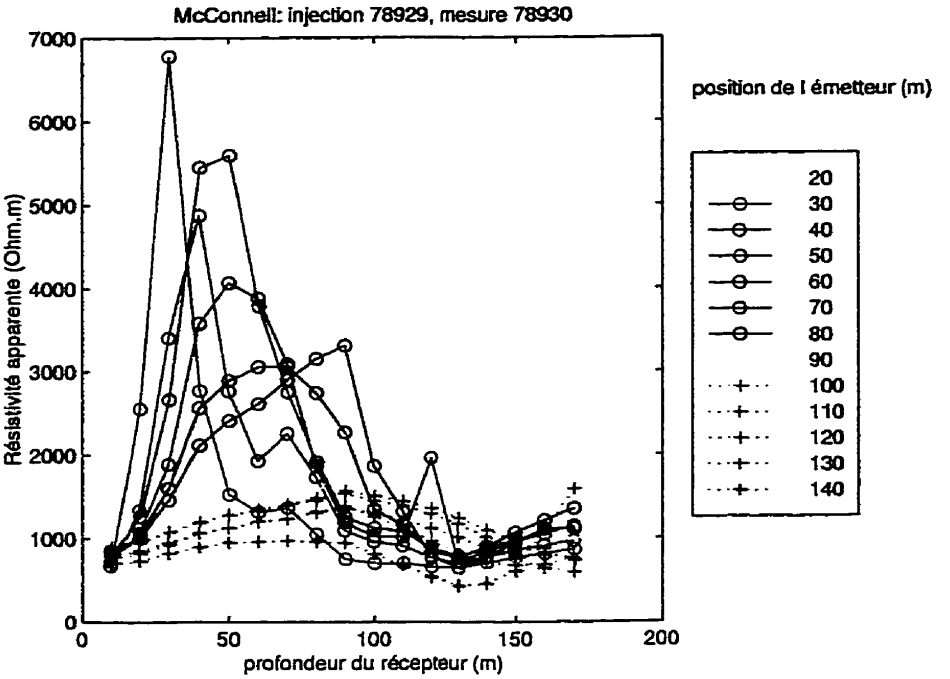


Figure 5.7: Résultats du levé de résistivité avec injection dans le trou 78929 et mesure du potentiel dans le trou 78930 effectué au site de McConnell.

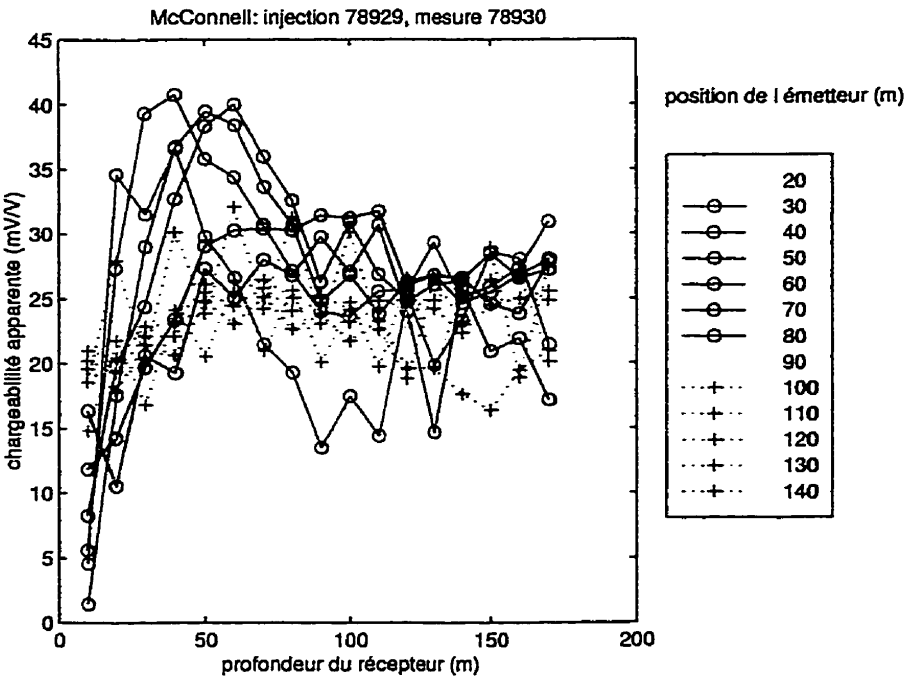


Figure 5.8: Résultats du levé de chargeabilité avec injection dans le trou 78929 et mesure du potentiel dans le trou 78930 effectué au site de McConnell.

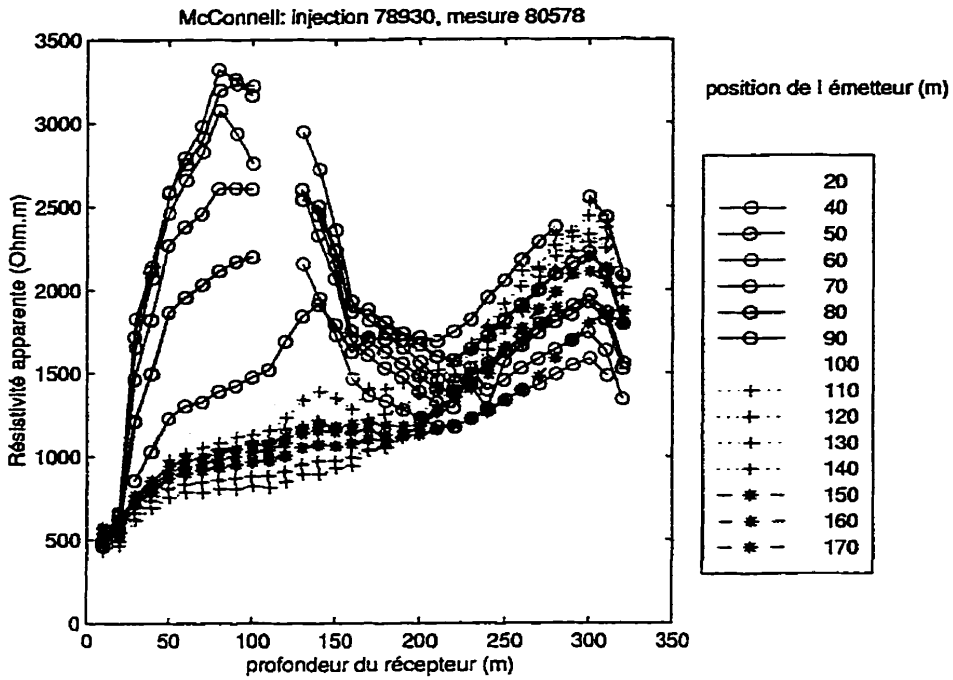


Figure 5.9: Résultats du levé de résistivité avec injection dans le trou 78930 et mesure du potentiel dans le trou 80578 effectué au site de McConnell.

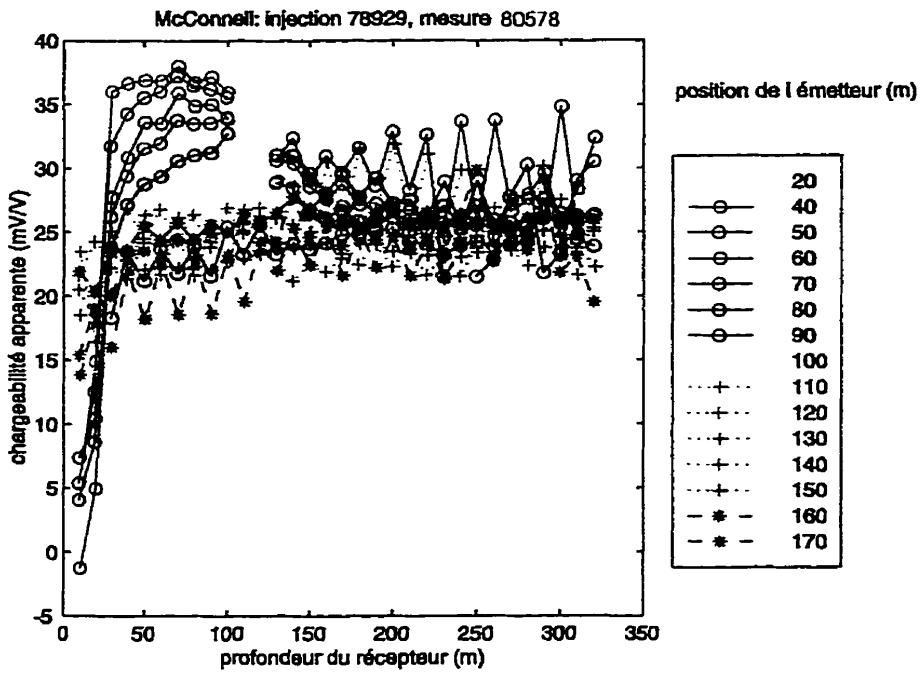


Figure 5.10: Résultats du levé de chargeabilité avec injection dans le trou 78930 et mesure du potentiel dans le trou 80578 effectué au site de McConnell.

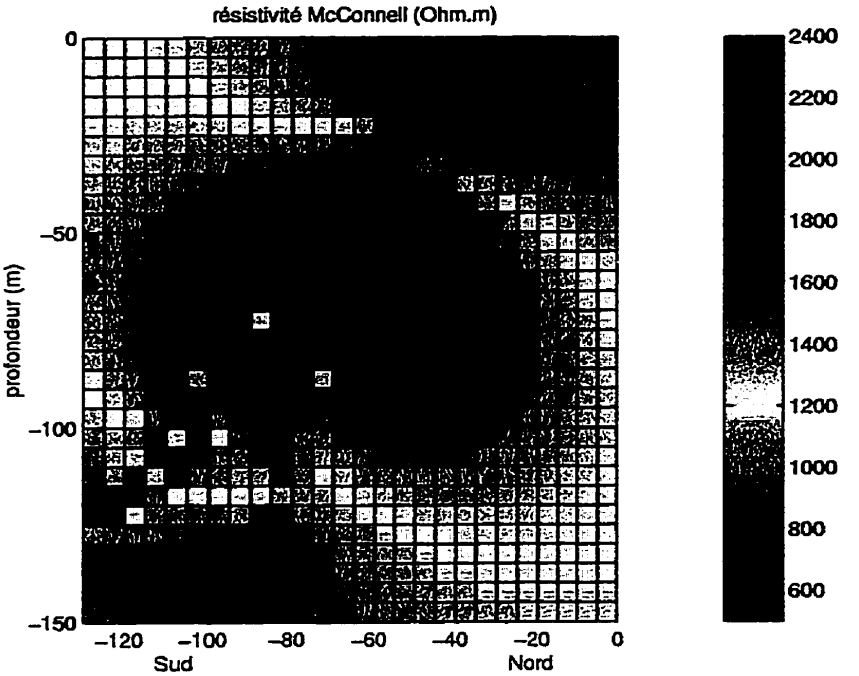


Figure 5.11: Rétroprojection des résultats du levé de résistivité pour les trous 78929 et 78930.

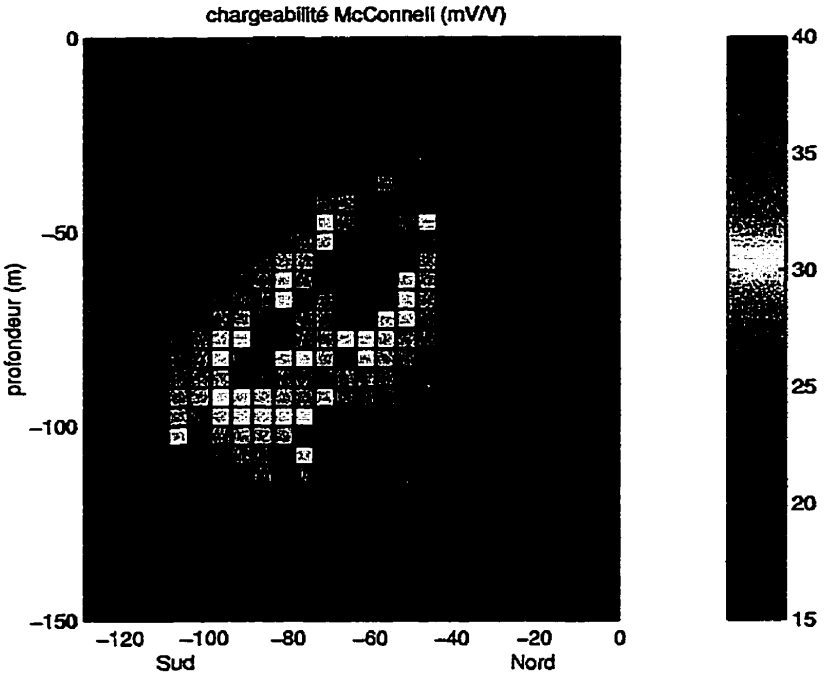


Figure 5.12: Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité pour les trous 78929 et 78930.

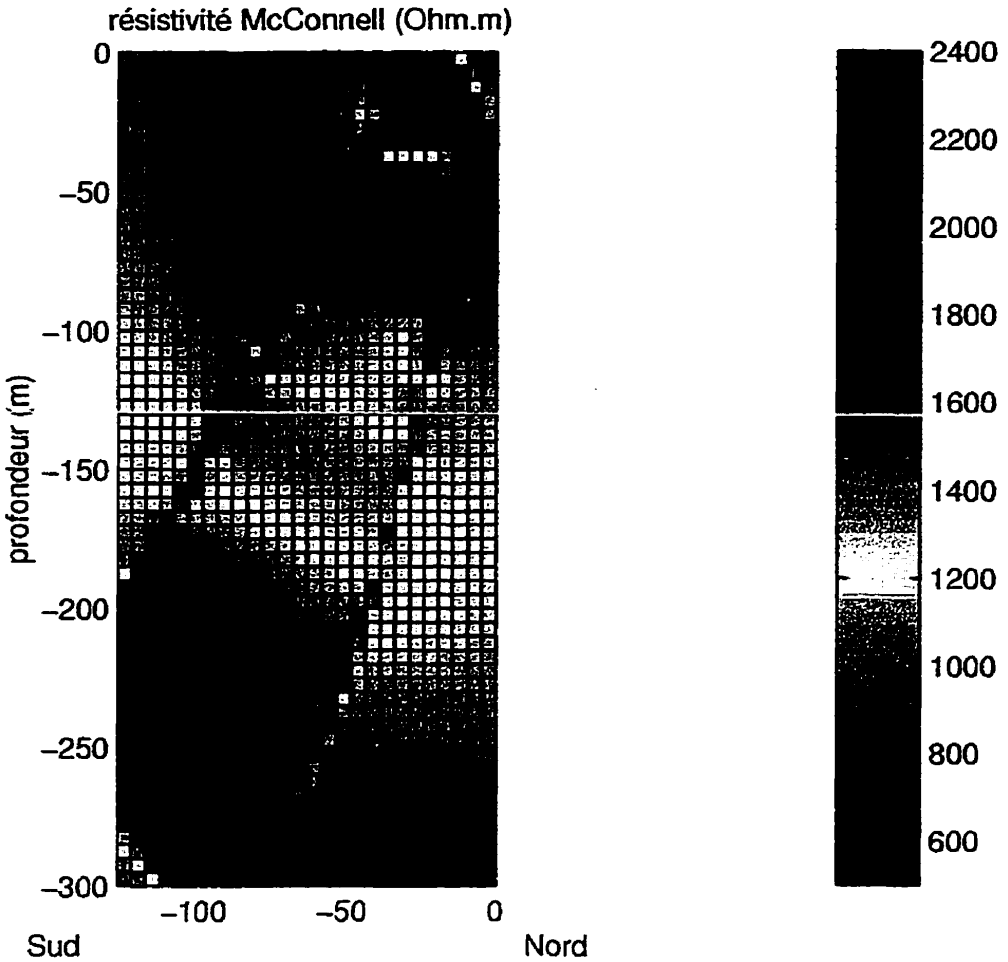


Figure 5.13: Rétroprojection des résultats du levé de résistivité pour les trous 78930 et 80578.

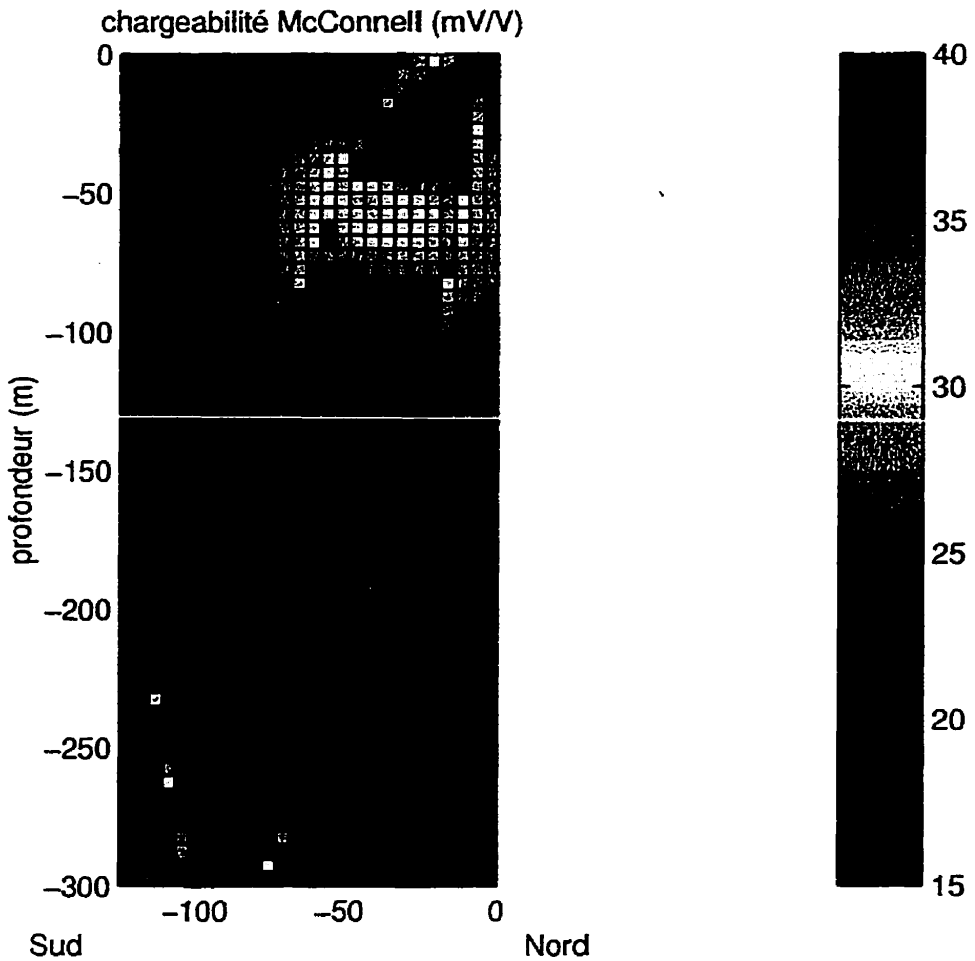


Figure 5.14: Rétroprojection des résultats du levé de chargeabilité pour les trous 78930 et 80578.

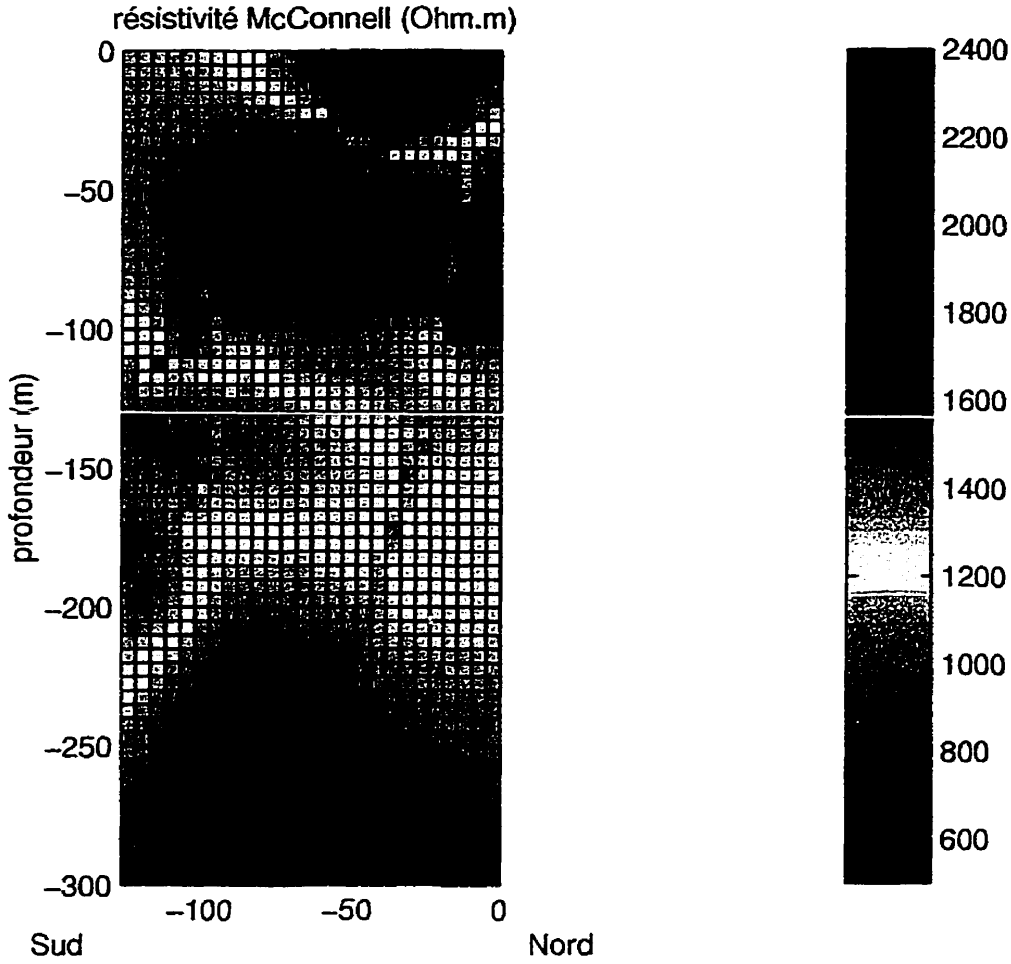


Figure 5.15: Rétroprojection combinée des résultats du levé de résistivité du site McConnell.

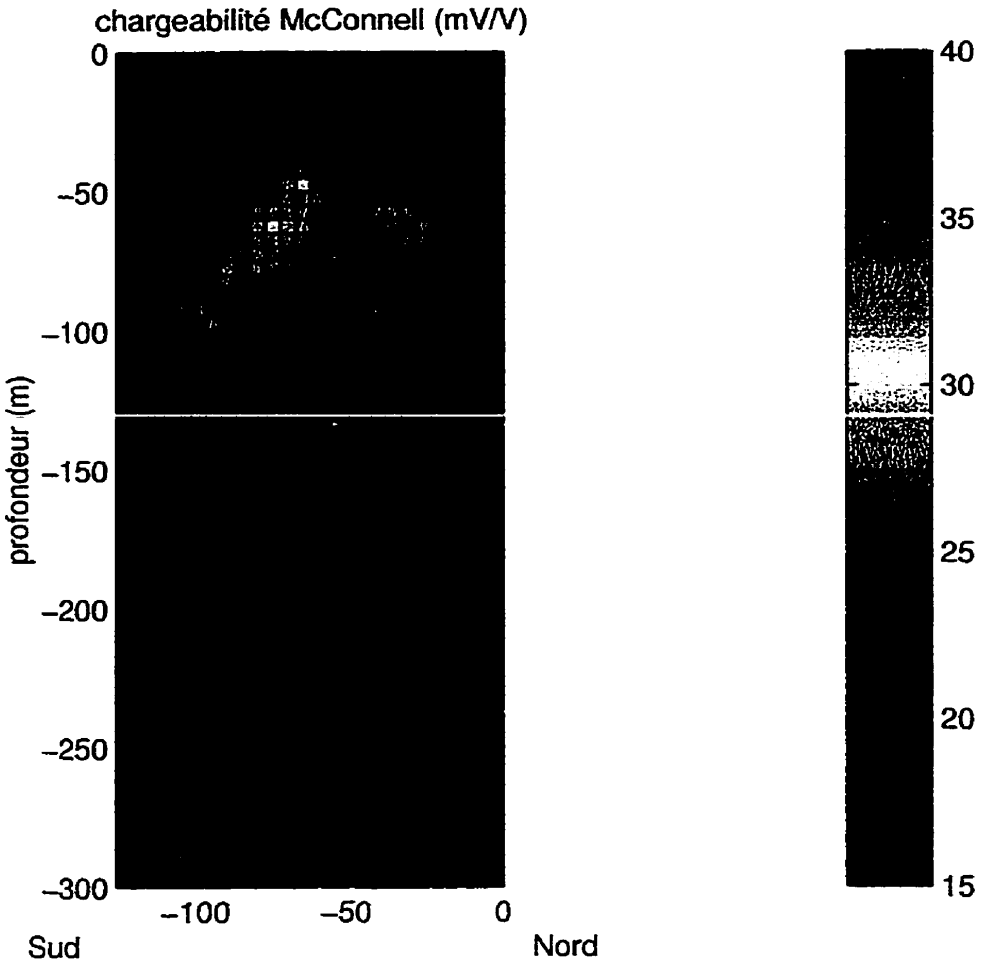


Figure 5.16: Rétroprojection combinée des résultats du levé de chargeabilité du site McConnell.

Les figures 5.7 et 5.9 montrent une hausse de résistivité à plus faible profondeur et une baisse de celle-ci lorsque la profondeur augmente. Dans le deuxième levé, on remarque une légère hausse de la résistivité à l'approche de la fin du trou.

Le levé en polarisation provoquée montre un effet en "dent de scie". Les causes de cet effet sont identiques à celles du levé effectué à Selbaie. Les figures 5.8 et 5.10 montrent qu'il y a une légère hausse de la chargeabilité à plus faible profondeur.

Pour ce qui est de la rétroprojection, celle-ci a d'abord été effectuée sur chacun des levés séparéments (voir figures 5.11,5.12,5.13 et 5.14). Les deux rétroprojections montrent une baisse de résistivité de 0 à 25 m environ de profondeur qui correspondrait à l'épaisseur de mort-terrain. Il y a ensuite une hausse de résistivité dans la zone correspondant à une profondeur de 25 à 100 m qui représenterait les roches métavolcaniques. La baisse de résistivité pourrait être due à la présence du gisement.

En ce qui concerne la rétroprojection des chargeabilités, on observe une légère hausse à environ 50-100 m de profondeur. On n'observe étrangement pas de hausse de chargeabilité dans la zone qui est conductrice, mais cette hausse était initialement absente des résultats du levé.

Une rétroprojection combinée des deux levés a été effectuée et est illustrée par les figures 5.15 et 5.16. Pour effectuer cette rétroprojection, une légère modification a été apportée au programme. Le calcul a été effectué en utilisant les valeurs absolues des coefficients de sensibilité. Cette manière de faire a pour effet de clarifier l'image obtenue en éliminant les irrégularités causées par les changements brusques de signe

de la valeur du coefficient de sensibilité près de la zone de contribution nulle. Par contre, cette modification a pour effet de lisser les résultats de façon considérable.

Puisque le levé effectué dans les trous 78929 et 78930 est presque situé dans la zone de contribution nulle du levé effectué avec les trous 78930 et 80578, sans cette modification on retrouve beaucoup d'irrégularités dans l'image, ce qui rend l'interprétation difficile. La rétroprojection combinée effectuée de cette manière illustre bien les tendances démontrées par les deux levés interprétés séparément.

Il est à noter que la même façon de faire rend possible la rétroprojection de levés tomographiques entre les forages, en combinaison avec un ou des levés où les électrodes d'injection et de mesure sont dans le même trou (mesures en-trou).

Les mesures de diagraphies effectuées par la Commission Géologique du Canada (voir annexe) montrent une hausse de la chargeabilité à plus de 100 mV/V et une baisse de la résistivité de 8000 Ωm à 500Ωm pour les profondeurs 100 m à 115 m du trou 78929. Pour le trou 78930, la même zone conductrice et chargeable se situe entre les profondeurs 130 et 150 m. Au trou 80578, la zone conductrice et chargeable se situe aux profondeurs 250 à 260 m. Toutefois, il y a une zone aux profondeurs 215 à 235 m constituée de schistes et de quartzite qui est également plus conductrice et qui pourrait causer le décalage de la zone conductrice vers le haut en rétroprojection. Dans ce trou, on observe également que la zone chargeable est constituée d'une alternance de zones de moins de 1 m très chargeables avec des couches qui ne sont pas chargeables du tout. Il se peut que la diorite quartzifère dans laquelle est située la minéralisation soit

suffisamment massive pour que l'effet de polarisation soit de façon générale réduite. Ceci pourrait être une des causes pour laquelle la tomographie ne montre pas bien la minéralisation particulièrement dans la section en profondeur de la rétroprojection.

L'autre raison pour laquelle on ne voit pas le conducteur chargeable en fin de trou serait la configuration du levé, qui est loin d'être idéale. Comme on l'a vu au chapitre 4, en fin de trou, les coefficients de sensibilité sont plus faible, alors la zone d'intérêt, dans ce cas, est mal couverte. Il est également possible que le corps minéralisé soit de trop faible extension latérale, ce qui affaiblirait considérablement la réponse tomographique.

Conclusions

Les méthodes d'interprétation actuelles de levés tomographiques entre trous de forage sont basées sur des algorithmes d'inversion automatique qui nécessitent un temps de calcul important ainsi qu'un espace mémoire de grande capacité, ce qui limite l'accès à leur utilisation.

Pour cette raison, il est essentiel d'étudier qualitativement les résultats de levés tomographiques entre trous de forage afin de rendre l'interprétation de ceux-ci plus accessibles pour l'exploration minière. De plus, l'élaboration d'une méthode d'imagerie par rétroprojection qui puisse s'effectuer rapidement sur un ordinateur personnel modeste est vitale pour le développement et l'utilisation de cette méthode par l'entreprise privée.

Nous avons étudié les propriétés électriques des principaux types de gisements et effectué plusieurs modélisations afin de déterminer les principes et les paramètres qui affectent les réponses en tomographie électrique en forage. Nous avons vu que pour réaliser un levé optimum, il faut tenir compte de la dimension et de l'extension latérale supposée de la cible ainsi que de ses propriétés électriques estimées. Il faut également

tenir compte de la géométrie des trous par rapport à la cible pour déterminer la configuration d'électrodes optimale. Plusieurs de ses informations peuvent être évaluées avec l'étude de la géologie des trous préalablement forés.

Avec la technique d'imagerie par rétroprojection effectuée sur des données synthétiques à configuration simple et un peu plus complexe (trous inclinés), on a pu démontrer l'efficacité et les limites de cette méthode. Les cas où les résultats seront les meilleurs sont ceux où l'on recherche de la minéralisation disséminée passée inaperçue lors de l'analyse géologique des carottes ou bien où l'on tente d'évaluer grossièrement l'étendue de cette zone. Il y a également le cas où on veut déterminer la présence d'un conducteur avec une bonne extension latérale dont la présence n'aurait pas été décelée par les forages.

Toutes les rétroprojections ont été effectuées sur des sections 2-D. Une rétroprojection 3-D serait possible avec l'algorithme modifié (valeur absolue de la contribution) lorsque l'on a trois trous ou plus qui ne sont pas sur une même section. La rétroprojection étant très sensible dans les zones à coefficients de sensibilité presque nuls, lorsque l'on reconstruit une image en 3-D avec plusieurs trous sans la modification, le chevauchement de ces zones produit des artéfacts qui rendent les contrastes de rétroprojection de nature faible presque invisibles. Cette manoeuvre a toutefois le désavantage de lisser excessivement les résultats. Pour effectuer plus efficacement des rétroprojections 3-D, il faudrait étudier une façon d'éliminer les artéfacts générés par les coefficients de sensibilité presque nuls en rétroprojection simple d'une autre façon

qu'avec la valeur absolue de la contribution. Par exemple en effectuant une itération qui éliminerait les changements trop abrupts entre les cellules ou en éliminant les coefficients de sensibilité qui seraient à l'extérieur de valeurs acceptables pré-définies. Le temps de calcul pour une rétroprojection 3-D sera évidemment plus long puisqu'il est directement proportionnel au nombre total d'électrodes et au nombre de cellules de la grille de rétroprojection.

Le programme d'imagerie par rétroprojection fonctionne assez bien avec des données de terrain. Les résultats des levés tomographiques entre trous de forage effectués aux sites de Selbaie et McConnell sont généralement consistants avec les sections géologiques connues.

Toutefois, il serait prématuré d'utiliser cette technique d'interprétation de façon complètement automatique. Les résultats de modélisation et de rétroprojection synthétiques démontrent que dans certains cas, les résultats peuvent être trompeurs. Ce qui est notamment le cas lorsque l'on a un conducteur d'extension latérale limitée ou bien si les électrodes d'injection et de mesures sont trop espacées pour la dimension de la cible.

Pour pallier à ce problème, il peut être très intéressant de combiner les résultats inter-trous avec un levé de résistivité et de polarisation provoquée en-trou afin de préciser la position du corps à proximité des trous. L'utilisation de levés diagraphiques permet également une meilleure interprétation des résultats (voir la discussion à la section 4.4). Puisque l'on connait les valeurs intrinsèques des corps interceptés, il est

possible d'évaluer de façon arbitraire l'extension (couche, 2-D, 3-D) des corps.

L'avantage des levés tomographiques inter-trous par rapport au levé en-trou seul (PP en forage) est que l'on identifie plus clairement la zone d'investigation, soit la zone entre les trous. Lorsque l'on effectue le levé en-trou seul, la zone d'investigation principale est radiale autour du trou, il est donc impossible de tenter de reconstruire une image autre que 1-D à partir de ces résultats. Le levé en-trou a, par contre, l'avantage de procurer beaucoup d'information sur la zone autour du trou, les coefficients de sensibilité étant très élevés au pourtour du trou et ceux-ci étant symmétriquement répartis entre le positif et le négatif.

En somme, la méthode de tomographie électrique entre trous de forage peut être très utile dans des situations d'exploration où l'on soupçonne la présence d'un conducteur (sulfures massifs en particulier) non-intercepté lors des forages et que ceux-ci sont dans un configuration propice. Mais la méthode est encore plus avantageuse dans le cas d'exploration de gisements de métaux disséminés. En effet, lors de l'analyse géologique des carottes, il est parfois difficile d'évaluer l'ampleur de la minéralisation disséminée. Une zone à minéralisation disséminée avec un tonnage intéressant donnera une bonne réponse en tomographie de polarisation provoquée. L'intensité de cette réponse sera soit proportionnelle à la teneur (forte chargeabilité) ou au tonnage (extension latérale).

De plus, les méthodes d'inversion approximative telles que la rétroprojection rendent l'interprétation de la tomographie électrique plus accessible. Principalement

parce qu'elle ne nécessite pas d'ordinateurs très puissants (un PC 486 DX suffit) et est très rapide. Le temps de calcul pour une rétroprojection d'un ensemble de 768 mesures de potentiel et de 4941 cellules de rétroprojection est d'environ 10 minutes sur un ordinateur Pentium 133 MHz.

Afin de raffiner l'inversion approximative, il serait possible d'effectuer une mise-à-jour des coefficients de sensibilité par itération obtenus à partir d'une première rétroprojection. Les coefficients de sensibilité pourraient être recalculés à partir des $\Delta\rho$ (contrastes de résistivité) entre les cellules à l'aide de la formulation de Noel et Xu (1991) soit: $V(p) = (\rho_i - \rho_o)\Phi_i$ où $V(p)$ est le voltage mesuré au point p, Φ_i est le coefficient de sensibilité de la cellule pour la combinaison d'électrodes d'injection et de mesure donnée et ρ_o est la résistivité à l'extérieur de la cellule. ρ_o pourrait être calculé en faisant une moyenne arithmétique de cellules adjacentes à ρ_i.

Bibliographie

BALLANTYNE, E. J. (1989), *Advisory System for Selecting Proper Techniques for Mining Exploration*, Thèse de doctorat, Université du Missouri-Rolla.

BARKER, R. D. (1979), Signal Contribution Sections and their Use in Resistivity Studies. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 59, 123–129.

BARKER, R. D. (1992), A Simple Algorithm for Electrical Imaging of the Subsurface. *First Break*, 10, 53–62.

BEARD, L. P., HOHMANN, G. W., TRIPP, A. (1996), Fast resistivity/IP inversion using a low-contrast approximation. *Geophysics*, 61, 169–179.

BEASLY, C. W., WARD, S. H. (1988), Cross-Borehole Resistivity Inversion. *58th Annual International Meeting., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 198–200.

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

DAILY, W., OWEN, W. (1991), Cross Borehole Resistivity Tomography. *Geophysics*, 56, 1228–1235.

D'AMOURS, I. (1996), Compilation des propriétés physiques des principaux types de gisements et modélisation électrique, Projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal.

DANIELS, J. J. (1977), Three-Dimensional Resistivity and Induced-Polarization Modeling Using Buried Electrodes. *Geophysics*, 42, 1006–1019.

DEVIN, C. (1996), Contributions relatives des éléments de volume d'un sol à deux couches aux mesures de la résistivité électrique effectuées en surface, Projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal.

DEY, A., MORRISON, H. F. (1979), Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Three-Dimensional Structures. *Geophysics*, 44, 753–780.

DINES, K. A., LYTLE, R. J. (1979), Computerized Geophysical Tomography. *Proc. IEEE*, 67, 1065–1073.

EKSTAND, O. R. (1986), Types de gisements minéraux du Canada: un bref exposé géologique, Rapport de géologie économique 36, Commission Géologique du Canada.

ELLIS, R. G., OLDENBURG, S. W. (1994), The Pole-Pole 3-D DC-Resistivity Inverse Problem: A conjugate-Gradient Approach. *Geophys. J. Int.*, 119, 187–194.

GESELOWITZ, D. B. (1971), An Application of Electrocardiographic Lead Theory to Impedance Plethysmography. *IEEE Trans. Biome. Eng.*, BME-18, 39–41.

GRIFFITHS, D. H., BARKER, R. D. (1994), Electrical Imaging in Archaeology. *Journal of Archaelogical Science*, 21, 153–158.

HOHMANN, G. (1975), Three Dimensional Induced Polarisation and Electromagnetic Modeling. *Geophysics*, 40, 309–324.

HOOVER, D. B., HERAN, W. D., HILL, P. L. (1992), The Geophysical Expression of Selected Mineral Deposit Models, Open File Report 92-557, United States Geological Survey.

KATSUBE, T. J., PALACKY, G. J., SANGSTER, D. F., GALLEY, A. G., SCROMEDA, N. (1995), *Electrical Properties of Disseminated Sulphide Ore Samples from Snow Lake;in EXTECH I*, Geological Survey of Canada, pages 319–329.

KILLEEN, P. G., MWENIFUMBO, C. J., ELLIOTT, B. E. (1995a), Mineral Signatures by Borehole Geophysics: Data from The Borehole Geophysical Test Site at The McConnell Nickel Deposit (Garson Offset, Ontario, Open File Report 2811, Mineral Resources Division, Geological Survey of Canada.

KILLEEN, P. G., MWENIFUMBO, C. J., ELLIOTT, B. E. (1995b), *The Pseudo-Geological Log: Using Geophysical Logs as an Aid to Geological Logging in Volcanogenic Massive Sulphides; in Current Research 1995-E*, Geological Survey of Canada, pages 321–330.

LABRECQUE, D. J. (1991), IP Tomography. *61th Annual International Meeting., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 413–416.

LABRECQUE, D. J., MILETTO, M., DAILY, W., RAMIREZ, A., OWEN, E. (1996), The Effects of Noise on Occam's Inversion of Resistivity Tomography Data. *Geophysics*, 61, 538–548.

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

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

LOKE, M. H., BARKER, R. D. (1996b), Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152.

MADDEN, T., SWIFT, C. M. (1969), Magnetotelluric Studies of the Electrical Conductivity Structure of the Crust and Upper Mantle, in the Earth's Crust and Upper Mantle. *Geophys. mono. Am. Geophys. Union*, 13, 469–479.

MADDEN, T. R. (1990), Inversion of Low-Frequency Electromagnetic Data, in Oceanographic and Geophysical Tomography, Elsevier Science Publ.

MARTIN, P. (1995), Simulation de mesures de résistivité et chargeabilité en trous de forage, Projet de fin d'études, École Polytechnique de Montréal.

MUFTI, I. (1976), Finite Difference Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Two-Dimensional Structures. *Geophysics*, 41, 62–78.

NOEL, M., XU, B. (1991), Archeological Investigation by Electrical Resistivity Tomography: A Preliminary Study. *Geophys. J. Int.*, 107, 95–102.

OLDENBURG, D. W., LI, Y. (1994), Inversion of Induced Polarisation Data. *Geophysics*, 59, 1327–1341.

PARASNIS, D. S. (1986), *Principles of Applied Geophysics*, Chapman and Hall, London, chapitre 4, 4e édition, page 118.

PARK, R. L., VAN, G. P. (1991), Inversion of Pole-Pole data for 3-D Resistivity Structures Beneath Arrays. *Geophysics*, 56, 951–960.

PFLUG, K. A., KILLEEN, P. G., MWENIFUMBO, C. J. (1994), *Acoustic velocity logging at the McConnell nickel deposit, Sudbury area, Ontario: preliminary in situ measurements; in Current Research 1994-C*, Geological Survey of Canada, pages 279–286.

ROY, A., APPARAO, A. (1971), Depth of Investigation in Direct Current Methods. *Geophysics*, 36, 943–959.

SANGALA, P. (1996), Tomographie électrique de mesures de résistivité en surface, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal.

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

SCROMEDA, N., KATSUBE, T. J., SALISBURY, M. (1993). *Electrical Resistivity and Porosity of Core Samples from the Sudbury Structure, Ontario: in Current Research 1993-C*, Geological Survey of Canada, pages 279–285.

SEIGEL, H. O. (1959), Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24, 547–565.

SHIMA, H. (1989), Effects on Reconstructed Images of Surrounding Resistivity Structures in Resistivity Tomography. *59th Annual International Meeting., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 385.

SHIMA, H. (1990), Two-Dimensional Automatic Resistivity Inversion Technique Using Alpha Centers. *Geophysics*, 55, 682–694.

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

SHIMA, H., SAITO, H. (1988), Application of Resistivity Tomography for Detection of Faults and Evaluation of their Hydraulic Continuity: Some Numerical Experiments. *58th Annual International Meeting., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 204–207.

SHIMA, H., SAKAYAMA, T. (1987), Resistivity Tomography: An Approach to 2-D Resistivity Inverse Problems. *57th Annual International Meeting., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, Session:EM1.3*.

SPIES, B. R., ELLIS, R. G. (1995), Cross-Borehole Resistivity Tomography of a Pilot-Scale, in-situ Vitrification Test. *Geophysics*, 60, 886–898.

SPITZER, K. (1995), A 3-D Finite-Difference Algorithm for DC Resistivity Modelling using Conjugate Gradient Methods. *Geophysical J. Int.*, 123, 903–914.

SPITZER, K. (1998), The Three-Dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources. *Geophysical J. Int.*, 134, 736–746.

SPITZER, K., KUMPEL, H. J. (1997), 3-D FD Modelling and Sensitivity Analyses Applied to a Highly Resistive Phonolitic Body. *Geophysical Prospecting*, 45, 963–982.

SUMNER, J. S. (1976), *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. numéro 5 dans Developments in Economic Geology, Elsevier Scientific Publishing.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. (1990), *Applied Geophysics*, Cambridge.

WELLER, A., SEICHTER, M., KAMPKE, A. (1996), Induced-Polarization Modelling Using Complex Electrical Conductivities. *Geophysical J. Int.*, 127, 387–398.

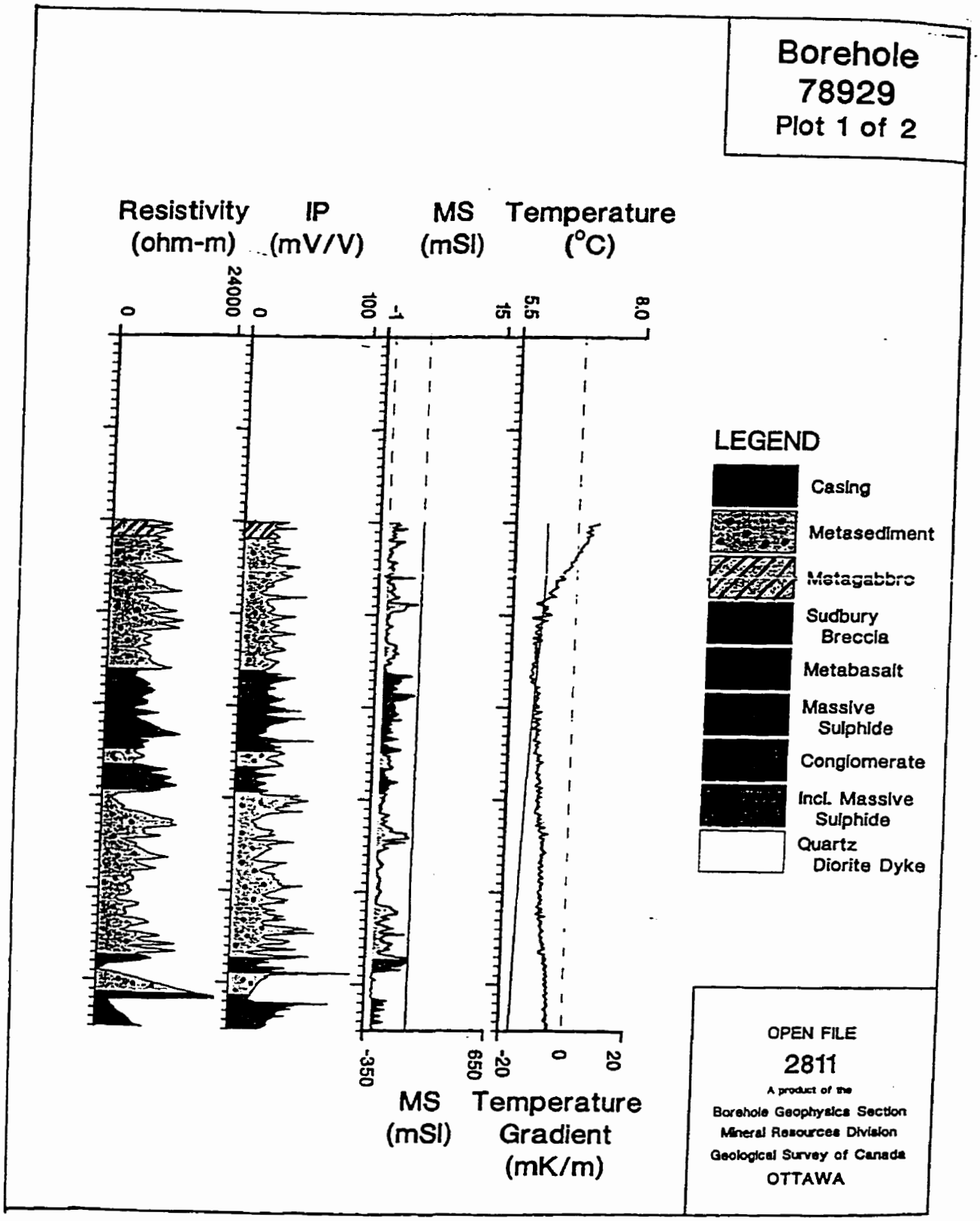
ZHANG, J., MACKIE, R. L., MADDEN, T. R. (1995), 3-D Resistivity Forward Modeling and Inversion Using Conjugate Gradient. *Geophysics*, 60, 1313–1325.

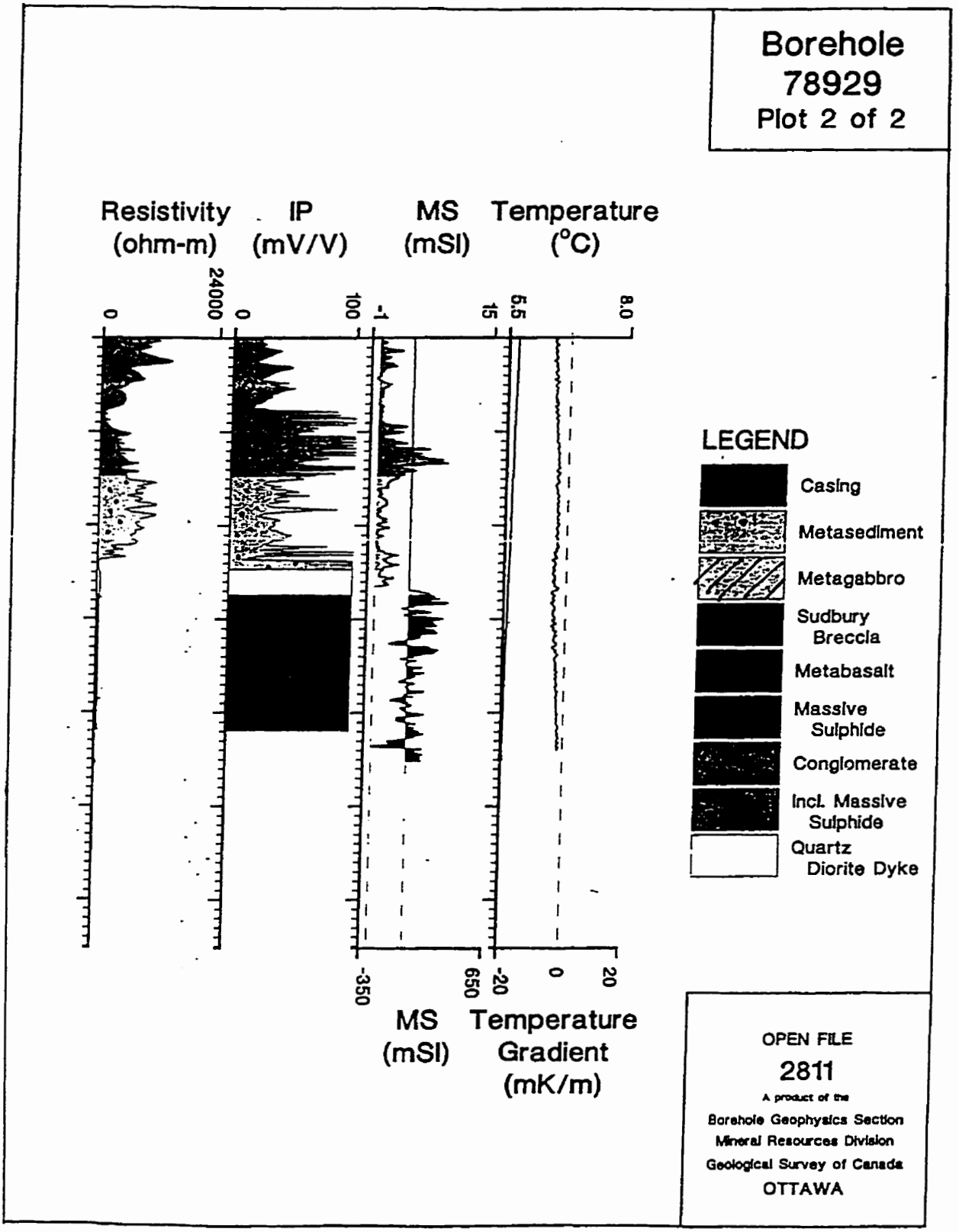
ZHDANOV, M. S., KELLER, G. V. (1994), *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*, numéro 31 dans Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier.

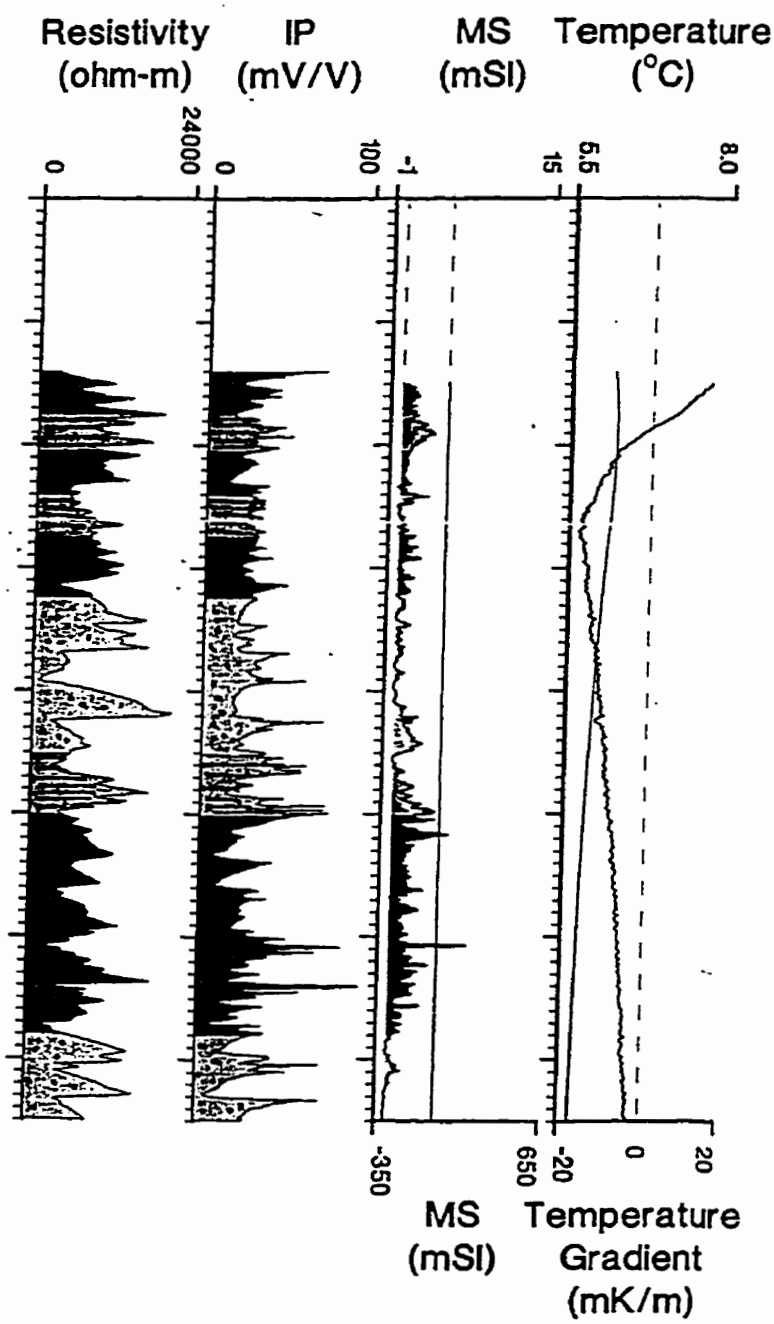
Annexe A

Résultats des diagraphies effectuées à McConnell

Diagraphies effectuées au site de McConnell par la Commission Géologique du Canada pour les trous 78929, 78930 et 80578 tirés de Killeen, Mwenifumbo et Elliott (1995a).


Borehole
78929
Plot 1 of 2
Resistivity
(ohm-m)
IP
(mV/V)
MS
(mSI)
Temperature
(°C)
0
24000
0
100
-1
15
5.5
8.0
-350
650
-20
0
20
MS
(mSI)
Temperature
Gradient
(mK/m)
LEGEND
Casing
Metasediment
Metagabbro
Sudbury
Breccia
Metabasalt
Massive
Sulphide
Conglomerate
Incl. Massive
Sulphide
Quartz
Diorite Dyke
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
78929
Plot 2 of 2
Resistivity (ohm-m)
IP (mV/V)
MS (mSI)
Temperature (°C)
0
24000
0
100
-1
15
5.5
8.0
-350
650
-20
0
20
MS (mSI)
Temperature Gradient (mK/m)
LEGEND
Casing
Metasediment
Metagabbro
Sudbury Breccia
Metabasalt
Massive Sulphide
Conglomerate
Incl. Massive Sulphide
Quartz Diorite Dyke
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA



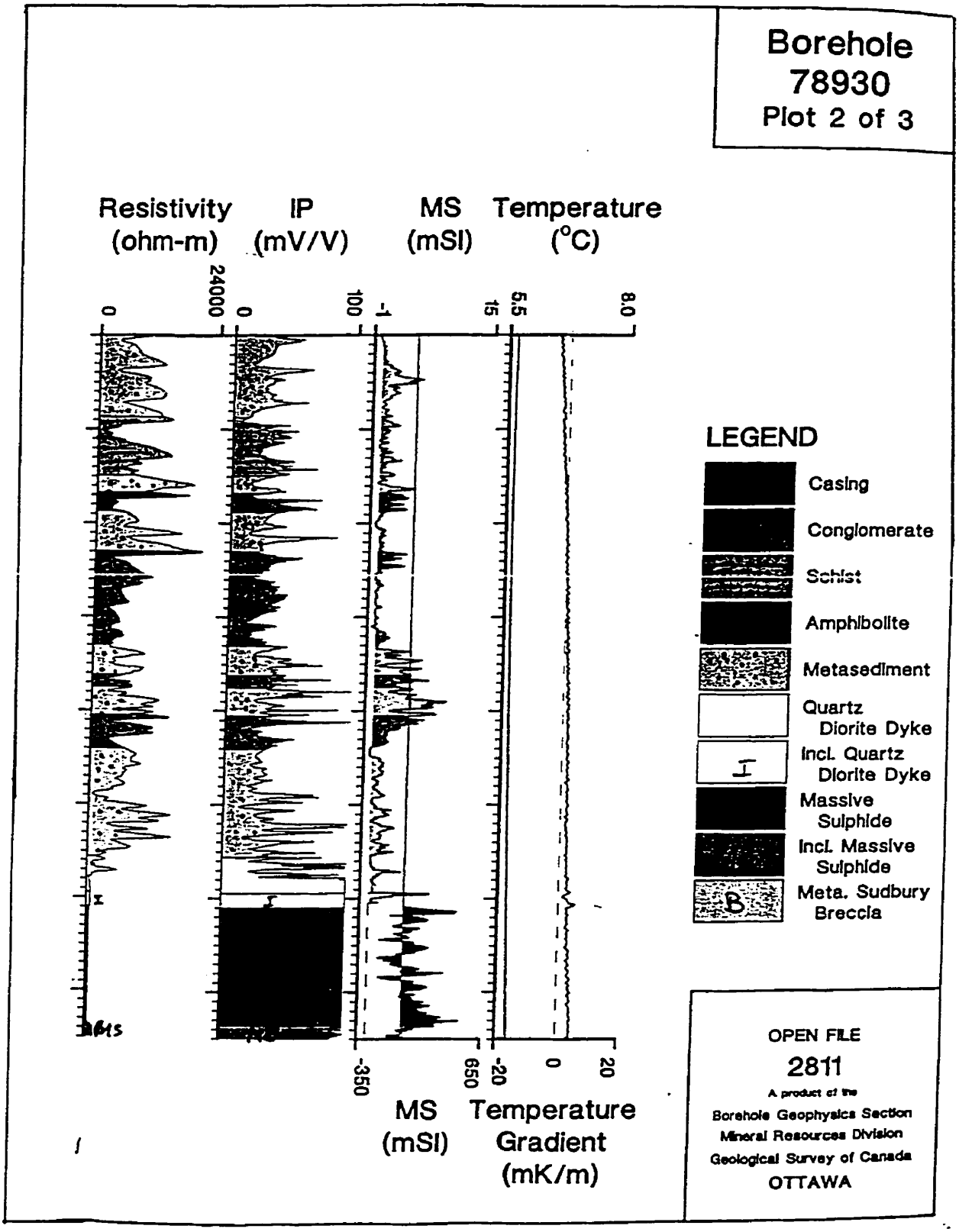
Borehole 78930

Plot 1 of 3

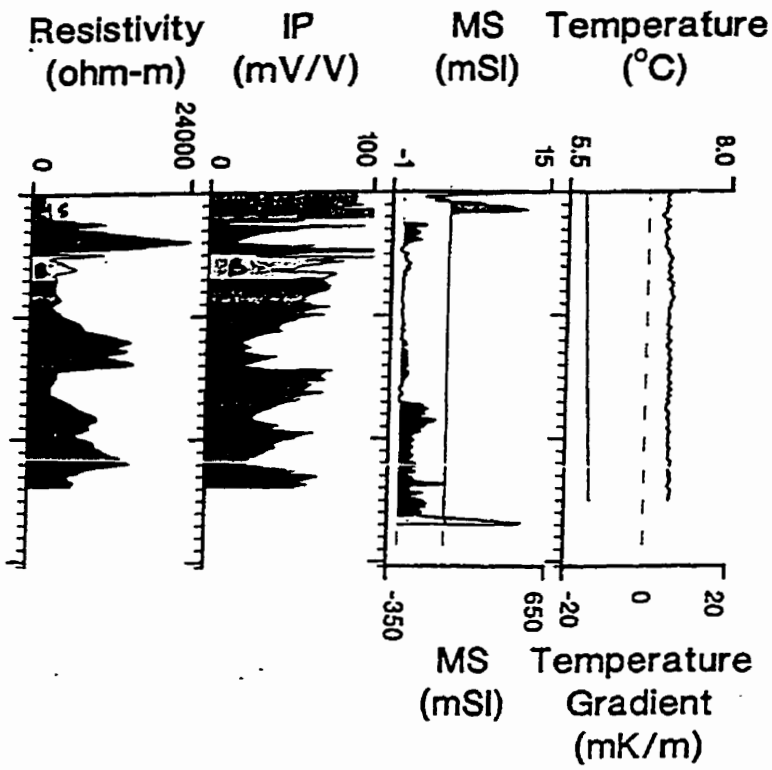
LEGEND

- Casing
- Conglomerate
- Schist
- Amphibolite
- Metasediment
- Quartz Diorite Dyke
- Incl. Quartz Diorite Dyke
- Massive Sulphide
- Incl. Massive Sulphide
- Meta. Sudbury Breccia

OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
78930
Plot 2 of 3
Resistivity
(ohm-m)
IP
(mV/V)
MS
(mSI)
Temperature
(°C)
0
24000
0
100
-1
15
5.5
8.0
-350
650
-20
0
20
MS
(mSI)
Temperature
Gradient
(mK/m)
LEGEND
Casing
Conglomerate
Schist
Amphibolite
Metasediment
Quartz
Diorite Dyke
Incl. Quartz
Diorite Dyke
Massive
Sulphide
Incl. Massive
Sulphide
Meta. Sudbury
Breccia
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA

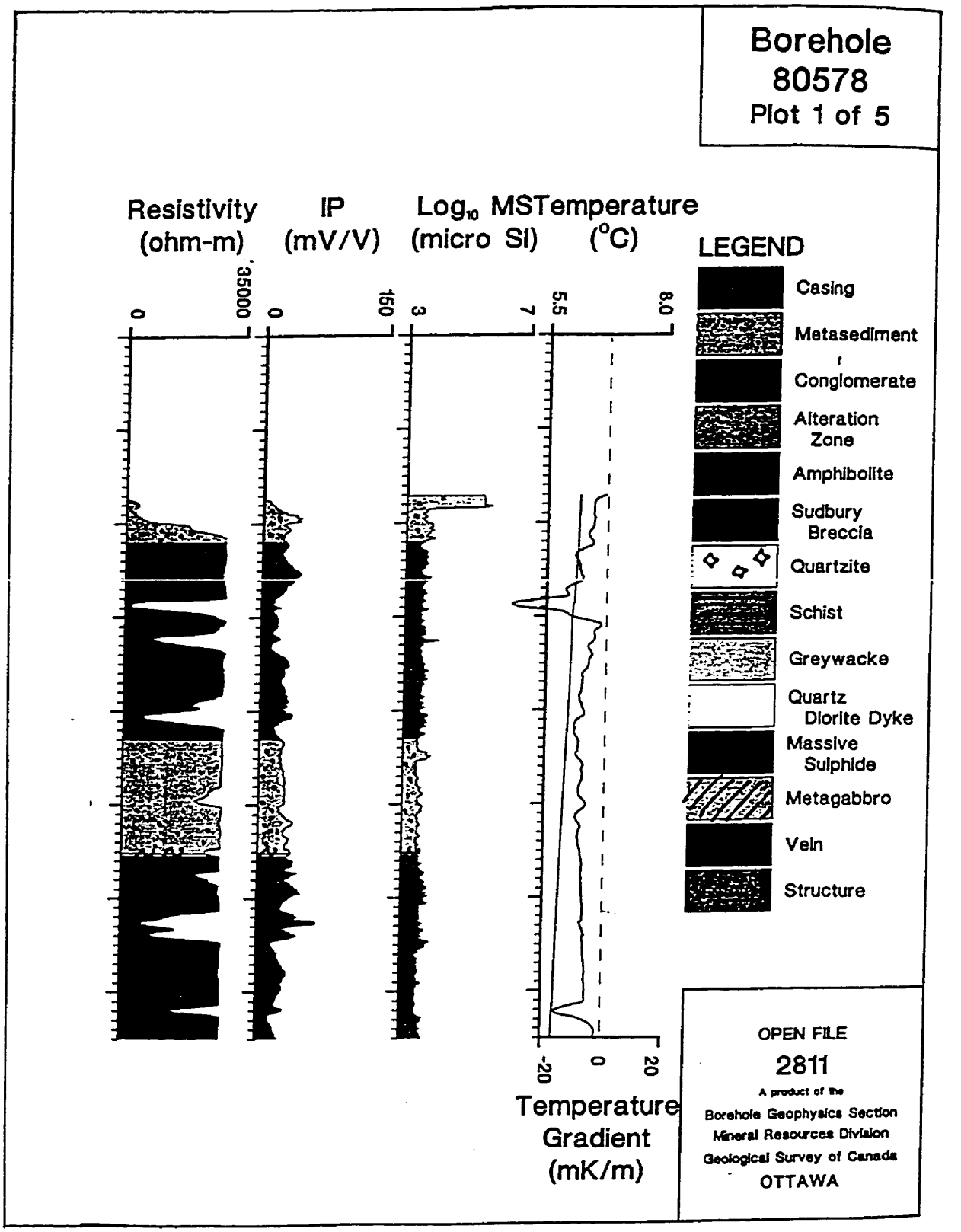
Borehole 78930
Plot 3 of 3

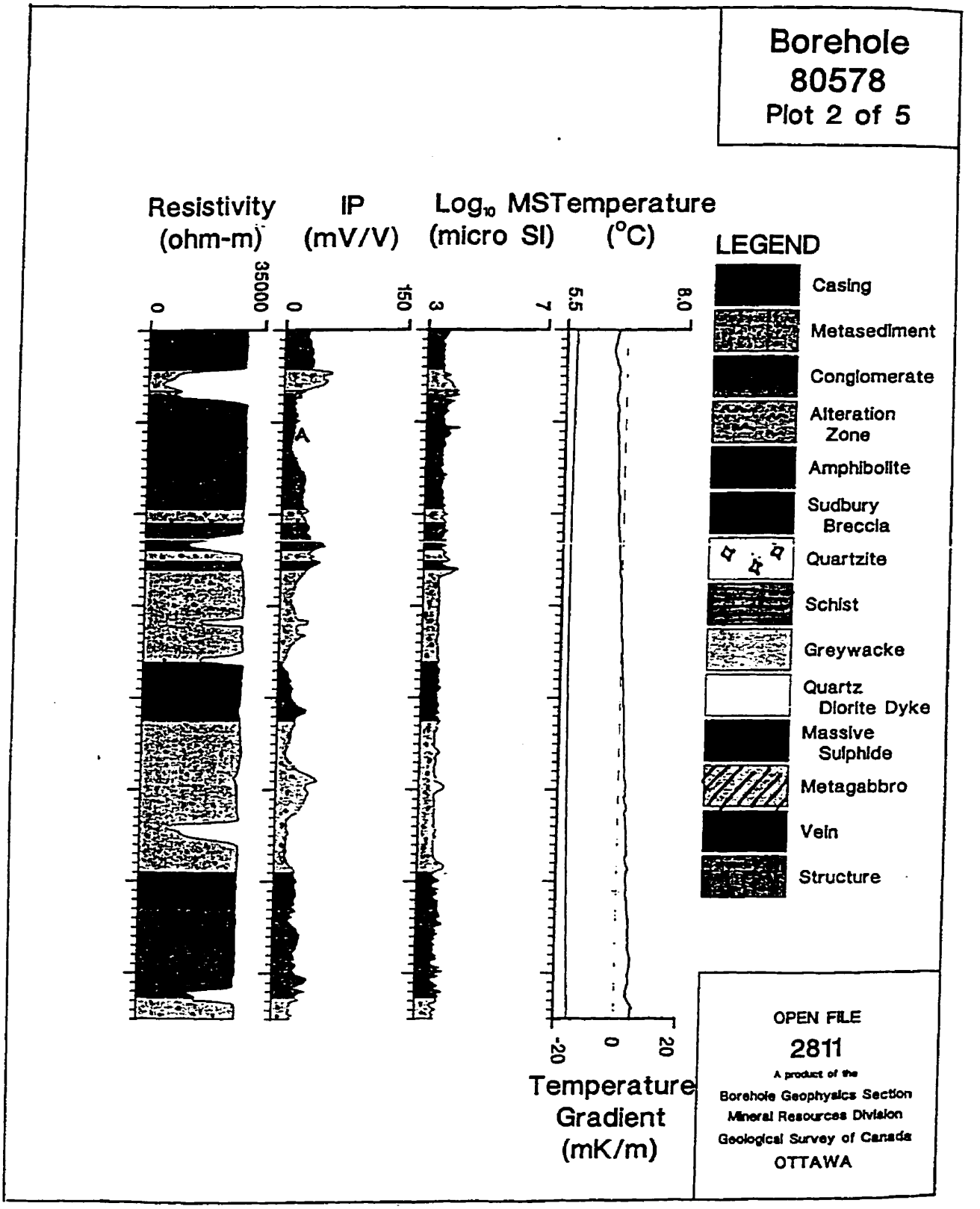


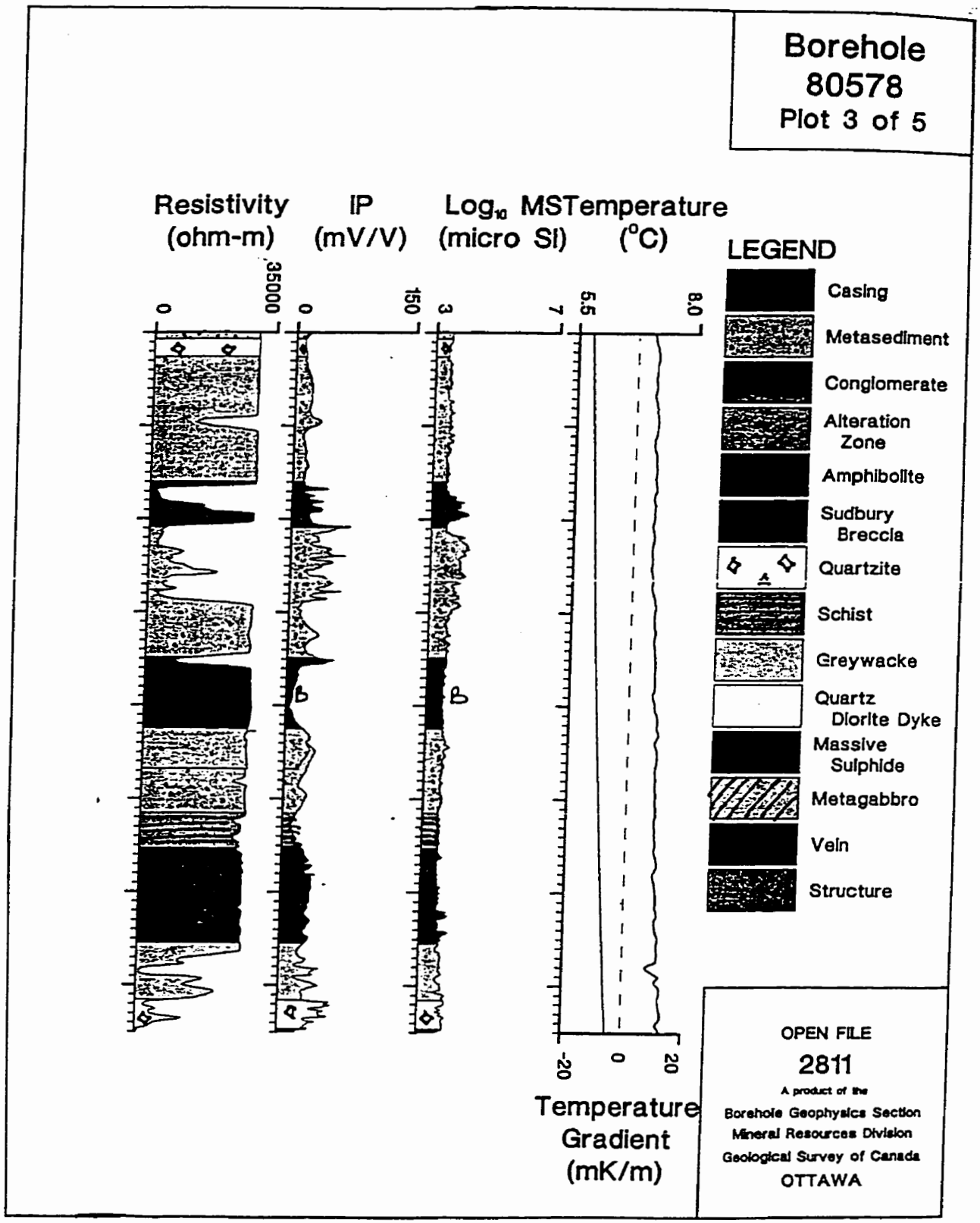
LEGEND

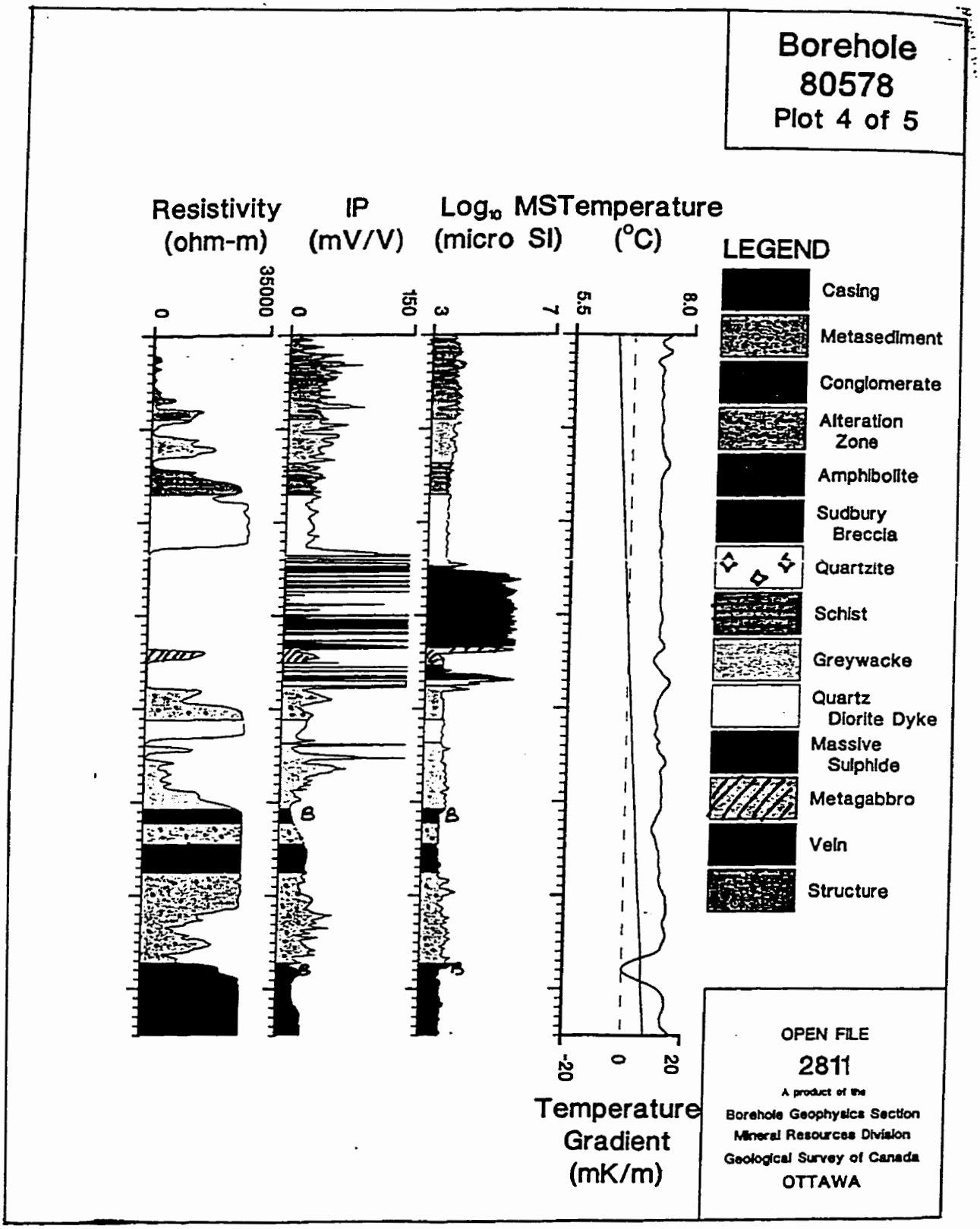
- Casing
- Conglomerate
- Schist
- Amphibolite
- Metasediment
- Quartz Diorite Dyke
- Incl. Quartz Diorite Dyke
- Massive Sulphide
- Incl. Massive Sulphide
- Meta. Sudbury Breccia

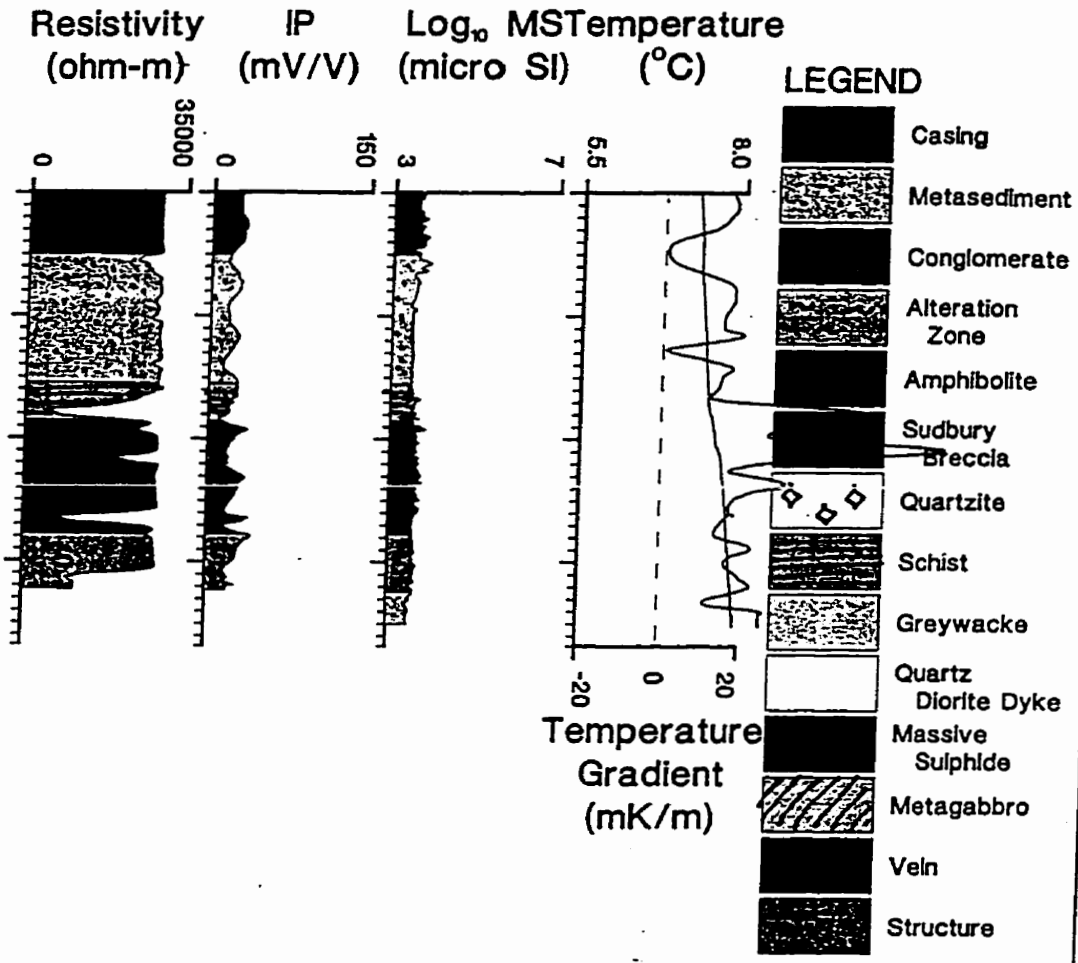
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
80578
Plot 1 of 5
Resistivity
(ohm-m)
0
35000
IP
(mV/V)
0
150
Log10 MS
(micro SI)
3
7
Temperature
(°C)
5.5
8.0
Temperature
Gradient
(mK/m)
-20
0
20
LEGEND
Casing
Metasediment
Conglomerate
Alteration Zone
Amphibolite
Sudbury Breccia
Quartzite
Schist
Greywacke
Quartz Diorite Dyke
Massive Sulphide
Metagabbro
Vein
Structure
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
80578
Plot 2 of 5
Resistivity
(ohm-m)
0
35000
IP
(mV/V)
0
150
A
Log10 MS
(micro SI)
3
7
Temperature
(°C)
5.5
8.0
Temperature
Gradient
(mK/m)
-20
0
20
LEGEND
Casing
Metasediment
Conglomerate
Alteration Zone
Amphibolite
Sudbury Breccia
Quartzite
Schist
Greywacke
Quartz Diorite Dyke
Massive Sulphide
Metagabbro
Vein
Structure
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
80578
Plot 3 of 5
Resistivity
(ohm-m)
IP
(mV/V)
Log10 MS
(micro SI)
Temperature
(°C)
0
35000
0
150
3
7
5.5
8.0
-20
0
20
Temperature
Gradient
(mK/m)
LEGEND
Casing
Metasediment
Conglomerate
Alteration Zone
Amphibolite
Sudbury Breccia
Quartzite
Schist
Greywacke
Quartz Diorite Dyke
Massive Sulphide
Metagabbro
Vein
Structure
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA


Borehole
80578
Plot 4 of 5
Resistivity
(ohm-m)
IP
(mV/V)
Log10 MSTemperature
(micro SI)
(°C)
0
35000
0
150
3
7
5.5
8.0
-20
0
20
Temperature
Gradient
(mK/m)
LEGEND
Casing
Metasediment
Conglomerate
Alteration
Zone
Amphibolite
Sudbury
Breccia
Quartzite
Schist
Greywacke
Quartz
Diorite Dyke
Massive
Sulphide
Metagabbro
Vein
Structure
OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA



Borehole
80578
Plot 5 of 5

OPEN FILE
2811
A product of the
Borehole Geophysics Section
Mineral Resources Division
Geological Survey of Canada
OTTAWA