NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI®

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

UNE ÉTUDE DE CARACTÉRISATION DE LA STRUCTURE INTERNE D'UNE HALDE À STÉRILES PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

DANIEL CAMPOS
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)
MARS 2004

© Daniel Campos, 2004.

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-97932-6
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-97932-6

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

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

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire est intitulé :

UNE ÉTUDE DE CARACTÉRISATION DE LA STRUCTURE INTERNE D'UNE HALDE À STÉRILES PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

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

M. CHAPUIS Robert P., D.Sc.A, président
M. CHOUTEAU Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche
M. AUBERTIN Michel, Ph. D., membre et codirecteur de recherche
M. BELLEFLEUR Gilles, Ph.D., membre

Para Maria y Oscar

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes qui m'ont aidé durant la réalisation de ce projet de maîtrise.

Tout d'abord, merci à mes directeurs de recherche, Michel Chouteau (directeur) et Michel Aubertin (codirecteur) pour leur soutien et leurs précieux conseils tout au long de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier les Mines Agnico Eagle Ltée. pour avoir permis à ce projet de voir le jour. Je remercie également les partenaires de la Chaire Industrielle CRSNG-Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers pour leur aide financière. De plus, merci aux professeurs, au personnel et aux étudiants de l'École Polytechnique et de l'UQAT, ainsi qu'au personnel de la mine Laronde qui m'ont été d'un grand support durant les travaux de terrain et durant mes travaux à l'École Polytechnique. Un merci particulier pour Christian Dallaire pour les nombreux services rendus.

Merci à Véro pour avoir partagé cette expérience avec moi, pour ton encouragement et pour avoir investi ton temps pour corriger mon mémoire.

Merci à ma famille pour votre encouragement et votre amour.

Enfin, merci à tous mes amis à l'École Polytechnique et à tous mes amis du Postgrade. Votre présence est une des raisons qui a rendu cette expérience aussi agréable et amusante. Je garderai toujours de bons souvenirs.

Résumé

Les empilements de roches stériles provenant des exploitations minières posent certains défis en ce qui a trait à leur caractérisation structurale. Afin de comprendre les processus impliqués dans la génération de drainage minier acide (DMA) dans les haldes à stériles, il est essentiel de bien connaître leur structure interne. Ce projet a pour but d'utiliser des méthodes géophysiques afin de caractériser la structure interne d'une halde à stériles située à la mine Laronde, près de la municipalité de Cadillac dans la région de l'Abitibi.

Deux méthodes géophysiques ont été choisies pour effectuer la caractérisation de la halde, soit la résistivité électrique et le géoradar. Ce sont deux méthodes complémentaires, qui permettent d'obtenir une image de la structure du sous-sol à l'aide de sondages non destructifs. Ces méthodes ont été appliquées lors de deux campagnes de terrain, en juillet 2002 et en octobre 2002, sur une parcelle expérimentale de 30 mètres par 30 mètres située sur le sommet de la halde. La première campagne de terrain a servi à identifier les capacités et les limites des méthodes, faire une caractérisation préliminaire de la structure interne de la halde et déterminer les propriétés géophysiques des stériles. La deuxième campagne de terrain avait pour but de compléter les résultats obtenus lors de la première campagne et d'étudier l'effet d'un essai d'infiltration d'eau dans la halde sur les propriétés géophysiques des stériles.

Les principaux résultats de la première campagne de terrain montrent qu'il est possible d'obtenir un modèle de la structure interne de la halde sur une profondeur d'environ 5 à 6 mètres. Les résultats de résistivité montrent la présence de deux principaux types de matériaux dans la zone d'étude. Le premier est caractérisé par une faible résistivité (autour de 300 Ωm) tandis que le second est caractérisé par de très fortes résistivités allant d'environ 1000 Ωm à plus de 5000 Ωm. Le matériau à faible résistivité se retrouve dans la partie au sud de la zone d'étude, ainsi qu'à des profondeurs au-delà d'environ 2 mètres. Le matériau résistif est présent dans la partie nord de la zone

d'étude et à la forme d'un noyau caractérisé par des maxima de résistivité ponctuels pouvant être attribués à des blocs de roche résistive. Les résultats du géoradar lors de la première campagne de terrain montrent la présence de réflecteurs horizontaux dont le principal peut être corrélé à l'interface entre les matériaux résistifs et les matériaux à faible résistivité observés à des profondeurs au-delà de 2 mètres. De nombreuses hyperboles de diffraction du signal radar ont été observées et seraient dues à des objets ponctuels, tels que des blocs de roche, dans les stériles. Certaines de ces hyperboles peuvent être corrélées avec les maximums de résistivité ayant été mesurés. Des variations dans l'atténuation du signal radar peuvent être corrélées aux deux types de matériaux. L'atténuation du signal radar est faible dans les zones où la résistivité électrique est grande. À l'opposé, l'atténuation du signal radar est forte dans les zones où la résistivité des stériles est faible. Une étude parallèle (Gamache-Rochette, 2004) a permis d'effectuer une tranchée exploratoire près de la zone d'étude et de faire une caractérisation géochimique des stériles. Deux matériaux ont été observés, soit des stériles gris près de la surface et des stériles montrant des signes d'oxydation en profondeur. Ces deux matériaux correspondraient aux matériaux identifiés par la géophysique.

Une seconde campagne de terrain a permis d'étudier l'effet des variations climatiques sur les propriétés géophysiques des stériles. Les mesures de résistivité et de géoradar ont montré les mêmes caractéristiques structurales que celles identifiées lors de la première phase des travaux. Cependant, une variation des propriétés des stériles a été observée à travers une baisse générale de la résistivité des matériaux et une plus grande atténuation du signal radar entre les mesures effectuées en octobre 2002 par rapport à celles de juillet 2002. Ceci serait dû à une augmentation de la teneur en eau dans les stériles.

Un essai d'infiltration d'eau couplé à des mesures géophysiques a permis d'étudier la variation temporelle des propriétés géophysiques des stériles suite à l'infiltration. Des chutes de résistivité considérables ont permis d'identifier des chemins d'écoulement préférentiels vers le nord/nord-ouest et vers l'est. Ces zones sont limitées dans la zone caractérisée par une forte résistivité électrique et une plus forte pénétration du signal

radar. Il a été impossible d'identifier clairement l'effet de l'infiltration de l'eau sur la propagation du signal radar. Bien que des variations aient été observées, aucune tendance cohérente n'a pu être précisée.

Les résultats obtenus lors de cette étude ont pu être comparés à ceux d'une étude parallèle (Poisson, 2004) consistant à la caractérisation de la halde à stériles de la mine Laronde par diverses autres méthodes géophysiques, soit les méthodes électromagnétiques fréquentielles et temporelles, la résistivité électrique en configuration dipôle-dipôle équatorial et le géoradar à grand angle. Ces deux études ont permis de proposer un modèle cohérent de la structure interne de la halde à stériles de la mine Laronde et d'étudier à l'aide de différentes méthodes géophysiques l'effet de plusieurs essais d'infiltration sur les propriétés géophysiques des stériles.

Abstract

The structural characterization of mine waste rock piles presents many challenges. It is crucial to know the internal structure of waste rock piles to better understand the production of acid mine drainage (AMD) within waste rock. The purpose of this study is to image the internal structure of a waste rock pile using geophysical methods. Geophysical measurements were carried out at the Laronde mine site located near the town of Cadillac in the Abitibi region.

Electrical resistivity and ground penetrating radar (GPR) surveys were used for the structural characterization of the waste rock pile. These non destructive methods are complementary and provide an image of the underground structure. Two field programs were carried out in July 2002 and in October 2002 on a 30 meter by 30 meter delimited zone at the top of the rock pile. The purpose of the first field program was to evaluate the advantages and limitations of the geophysical methods, to perform a preliminary structural characterization of the rock pile and to evaluate the geophysical properties of the waste rock. The objective of the second field program was to complement the results from the first program and to study the effect of a water infiltration test on the geophysical properties of the waste rock.

Results from the first field program show that it is possible to image the internal structure of the rock pile up to depths of about 5 to 6 meters. Resistivity results show the presence of two main materials within the studied zone. The first shows low resistivity values (about 300 Ωm), while the second shows very high resistivity values ranging from 1000 Ωm to more than 5000 Ωm. The low resistivity material is found at the southern end of the survey zone as well as at depths higher than 2 meters. The high resistivity material is found in the northern part of the survey zone and shows many resistivity peaks that could be caused by resistive rock blocks. GPR results from the first field program show the presence of horizontal reflectors. The main reflector can be correlated with the interface of the low and high resistivity layers at a depth of about 2 meters. Many diffraction hyperbolas in the GPR signal show the presence of localized

objects, such as rock blocks, within the pile. Some of these hyperbolas can be correlated with the measured resistivity peaks. Attenuation variations within the GPR signal can be correlated with the two different materials. GPR attenuation is low in the high resistivity areas and is high in the low resistivity areas. A parallel study (Gamache-Rochette, 2004) included an exploratory excavation and a geochemical characterization of the waste rock. Two types of materials were identified: a grey coloured waste rock near the surface and waste rock with visual signs of oxidation at greater depths. These materials can be associated with the ones identified by the geophysical results.

A second field program focused on the effect of climatic variations on the geophysical properties of waste rock. Resistivity and GPR measurements showed the same structural features identified during the first field program. However, a general decrease of waste resistivity and a greater attenuation of the GPR signal were observed between the July 2002 surveys and the October 2002 surveys. This could be due to an increase in waste rock water content during the October field program.

A water infiltration test coupled with geophysical measurements gave indications on the variations of the waste rock properties due to the water infiltration. Considerable resistivity drops point toward preferential flow paths to the north/north-west and to the east of the survey zone. The affected zones are limited to the area of the rock pile that has high resistivity and stronger GPR signal penetration. The GPR method did not allow a clear identification of the effects of water infiltration on the GPR signal propagation. While some variations were observed, there was no coherent pattern that could be noted.

The results from this study have been compared to the results of a parallel study (Poisson, 2004) which consisted in a structural characterization of the Laronde waste rock pile using various other geophysical methods such as frequency and time domain electromagnetics, equatorial dipole-dipole resistivity measurements and wide angle reflection GPR. The two studies have been used to propose a coherent model of the

waste rock pile internal structure and to study the effects of water infiltrations tests on the geophysical properties of the waste rock with different geophysical methods.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **V**
RÉSUMÉ ..... **VI**
ABSTRACT ..... **IX**
TABLE DES MATIÈRES ..... **XII**
LISTE DES FIGURES ..... **XV**
LISTE DES TABLEAUX ..... **XXI**
LISTE DES SYMBOLES ..... **XXIII**
LISTE DES ANNEXES ..... **XXV**
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION **1**
1.1 Problématique 1
1.2 Objectifs de l'étude 2
1.3 Choix des méthodes géophysiques 3
1.4 Contenu du mémoire 5
CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE **6**
2.1 Le drainage minier acide 6
2.1.1 Généralités 6
2.1.2 Contexte géochimique 7
2.2 Influence de la géochimie sur les propriétés géophysiques des matériaux 9
2.3 Haldes à stériles 14
2.3.1 Généralités 14
2.3.2 Méthodes de construction et géométrie des haldes à stériles 14
2.3.3 Processus impliqués dans la génération de DMA 18
2.3.4 Méthodes de caractérisation des haldes à stériles 20
2.4 Caractérisation géophysique des haldes à stériles 21
2.4.1 Les méthodes géoélectriques 21
2.4.2 Le géoradar 26
2.4.3 Autres méthodes 27

2.5 La résistivité électrique 28
2.5.1 Concepts théoriques 28
2.5.2 Modes de déploiement 31
2.5.3 Propriétés électriques des matériaux géologiques 33
2.5.4 Interprétation par inversion numérique 34
2.6 Le géoradar 37
2.6.1 Généralités 37
2.6.2 Propagation des ondes radio 38
2.6.3 Profilage et résolution spatiale 41
2.6.4 Propriétés diélectriques des matériaux géologiques 43
CHAPITRE 3 - DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE 47
3.1 Généralités 47
3.2 Halde à stériles 48
3.2.1 Géologie et minéralogie de la halde à stériles 48
3.2.2 Géochimie des stériles 48
3.2.3 Morphologie de la halde à stériles 55
3.3 Travaux de terrain 58
3.3.1 Choix du site d'étude 58
3.3.2 Exécution des travaux 59
CHAPITRE 4 - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 68
4.1 Généralités 68
4.2 Résistivité électrique 68
4.2.1 Traitement des données 68
4.2.2 Résultats phase I 70
4.2.3 Modélisation de l'essai d'infiltration 79
4.2.4 Résultats phase II 94
4.3 Géoradar 112
4.3.1 Traitement des données 112
4.3.2 Résultats phase I 114
4.3.3 Résultats phase II 124
CHAPITRE 5 - ANALYSE DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION INTÉGRÉE .. 138
5.1 Généralités 138

5.2 Liens entre la résistivité électrique et le géoradar 138
5.3 Effets du climat 140
5.4 Effets de l'essai d'infiltration 144
5.5 Comparaison avec une étude parallèle 153
CHAPITRE 6 - CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 156
RÉFÉRENCES 161
ANNEXES 167

Liste des figures

Figure 2.1 : Classification des types de haldes à stériles selon la méthode de construction et la configuration (tiré de Martin 2003, adapté de Herasymuik, 1996) 17
Figure 2.2 : Coupe schématique d'un empilement en tas (tiré de Aubertin et al., 2002a) 18
Figure 2.3 : Mécanismes physiques impliqués dans la génération de DMA dans une halde à stériles (tiré de Fala, 2002, adapté d'après Lefebvre, 1994) 19
Figure 2.4 : Corrélation entre la conductivité électrique du lixiviat et le pH du lixiviat d'échantillons de stériles miniers. (tirée de Campbell et al. 1999) 23
Figure 2.5 : Dispositif à quatre électrodes (Tirée de Chouteau, 2001) 29
Figure 2.6 : Configurations d'électrodes couramment utilisées (Modifiée de Locke 2002); k = facteur géométrique 31
Figure 2.7 : Déploiement d'électrodes; configuration Wenner (d'après Reynolds, 1997) 32
Figure 2.8 : Graphique typique obtenu lors d'un sondage géoélectrique (Reynolds, 1997) 32
Figure 2.9 : Protocole d'acquisition multi-électrodes du Lund Imaging System de ABEM; configuration Wenner 33
Figure 2.10: Système géoradar de base (d'après Reynolds, 1997) 38
Figure 2.11 : Schématisation de la résolution spatiale en fonction de la première zone de Fresnel (d'après Reynolds, 1997) 42
Figure 2.12 : Diagramme schématisé montrant la résolution horizontale due à la largeur du faisceau des radiations (d'après Reynolds, 1997) 43
Figure 2.13 : Pénétration du signal radar en fonction de la fréquence pour certains matériaux (adapté de Cook, 1975) 45
Figure 3.1 : Localisation de la mine Laronde (source : Ministère des Ressources Naturelles du Québec) 47
Figure 3.2 : Halde à stériles à la mine Laronde 48

Figure 3.3 : Image numérique de la halde à stériles de la mine Laronde (courbes de niveau au 1 mètre) 55
Figure 3.4 : Courbes granulométriques des stériles de la mine Laronde; a) stérile gris #1, b) stérile gris #2, c) stérile oxydé (adapté de Gamache-Rochette, 2004) 57
Figure 3.5 : Emplacement de la grille sur la halde à stériles. 58
Figure 3.6 : Emplacement des levés sur la grille d'étude: 1ère phase 59
Figure 3.7 : Disposition typique du Lund Imaging System : profilage à 4 câbles et 41 électrodes avec déplacement latéral (tirée de Locke 2002). 60
Figure 3.8 : Composantes principales de système EkkoIV 62
Figure 3.9 : Emplacement des levés sur la grille d'étude: 2ème phase 64
Figure 3.10 : Composantes principales du système RAMAC 64
Figure 3.11: Photo du bassin avant l'infiltration (dimensions : environ 8 m par 5 m) .. 65
Figure 3.12 : Photo du bassin pendant l'infiltration 66
Figure 3.13 : Durée de l'exécution des profils électriques par rapport aux périodes d'infiltration d'eau dans le bassin 67
Figure 4.1 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs de mesure pour les profils de résistivité électrique: phase I (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%) 72
Figure 4.2 : Profils d'inversion de résistivité par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a 73
Figure 4.3 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a 74
Figure 4.4 : Photos de la tranchée près de la grille d'étude montrant les deux types de matériaux observés (2003) 77
Figure 4.5 : Inversion 3D des données de résistivité de la phase I par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur (dimensions en mètres) 78

Figure 4.6 : Modèle utilisé pour la modélisation numérique de la résistivité des stériles (dimensions en mètres) 79
Figure 4.7 : Profils de résistivité apparente extraits du modèle montrant la variation de résistivité en fonction de la profondeur 80
Figure 4.8 : Modèle modifié utilisé pour la modélisation numérique afin de simuler l'essai d'infiltration dans les stériles (dimensions en mètres) 81
Figure 4.9 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse » , profil x = 15m: a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m 83
Figure 4.10 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 15m: a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m,c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m 84
Figure 4.11 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil x = 20m: a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m 85
Figure 4.12 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 20m: a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m 86
Figure 4.13 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil x = 25m: a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m 87
Figure 4.14 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 25m: a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m 88
Figure 4.15 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil y = 10m: a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m 89
Figure 4.16 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil y = 10m: a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m 90

Figure 4.17 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil y = 20m: a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m 91
Figure 4.18 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil y = 20m: a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m 92
Figure 4.19 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs de mesure pour les profils de résistivité électrique: phase II avant infiltration (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%) 96
Figure 4.20 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs pour les profils de résistivité électrique: phase II après infiltration (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%) 98
Figure 4.21: Profils d'inversion de résistivité par méthode standard pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b..... 100
Figure 4.22 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b..... 101
Figure 4.23 : Profils d'inversion de résistivité par méthode type standard pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c 103
Figure 4.24 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c 104
Figure 4.25 : Inversion 3D des données de résistivité de la phase II par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) avant l'essai d'infiltration, b) après l'essai d'infiltration 107
Figure 4.26 : Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b..... 109

Figure 4.27 : Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur: a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c 110
Figure 4.28 : Exemple du traitement appliqué aux sections de géoradar: a) données brutes, b) après la séquence de traitement 113
Figure 4.29 : Profils radar direction est-ouest, phase I: a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a 115
Figure 4.30 : Profils radar direction sud-nord, phase I: a) Y00a, b) Y05a, c) Y10a, d) Y15a, e) Y20a, f) Y25a et g) Y30a 117
Figure 4.31 : Exemple d'analyse des vitesses par les hyperboles de diffraction, $\Delta x/\Delta t$ = 0,08 m/ns : profil X05a 121
Figure 4.32 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase I : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée 123
Figure 4.33 : Profils radar direction est-ouest, phase II, avant infiltration: a) X02,5b, b) X07,5b, c) X12,5b, d) X17,5b, e) X22,5b, f) X27,5b 125
Figure 4.34 : Profils radar direction sud-nord, phase II, avant infiltration: a) Y00b, b) Y05b, c) Y10b, d) Y15b, e) Y20b, f) Y25b et g) Y30b 127
Figure 4.35 : Profils radar direction est-ouest, phase II, après infiltration: a) X02,5c, b) X07,5c, c) X12,5c, d) X17,5c, e) X22,5c, f) X27,5c 130
Figure 4.36 : Profils radar direction sud-nord, phase II, après infiltration: a) Y00c, b) Y05c, c) Y10c, d) Y15c, e) Y20c, f) Y25c et g) Y30c 132
Figure 4.37 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase II, avant infiltration : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée 135
Figure 4.38 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase II, après infiltration : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée 136
Figure 5.1 : Corrélation entre le géoradar et la résistivité, profil X15a: a) géoradar et b) résistivité 140
Figure 5.2 : Profils montrant les rapports des résistivités entre les phases I et II en fonction de la profondeur: a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30 142

Figure 5.3 : Profil y=10; comparaison des résultats entre a) phase I et b) phase II avant infiltration 144
Figure 5.4 : Profils montrant les rapports des résistivités entre la phase II avant infiltration et après infiltration en fonction de la profondeur: a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30 145
Figure 5.5 : Isocontours des rapport des résistivités en fonction de la profondeur: a) surface, b) 1m, c) 2m et d) 3m 147
Figure 5.6 : Corrélation entre les profils radar et la zone d'influence correspondant à un rapport des résistivités de 65%: a) profil X20a et b) profil Y15a 150
Figure 5.7 : Exemple de traces ayant été utilisés afin de comparer l'influence de l'essai d'infiltration sur les résultats du géoradar: a) peu de variations, b) variation moyenne et c) fortes variations 152

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Minéraux neutralisants (Tiré de Bernier, 2003) 9
Tableau 2.2 : Types de réactions géochimiques effectives dans les résidus miniers (Tiré de Bernier, 2003) 9
Tableau 2.3 : Valeurs à utiliser avec la formule d'Archie (tiré de Chouteau 2001) 11
Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques de différentes configurations d'électrodes (modifié de Reynolds 1997) 30
Tableau 2.5 : Résistivités électriques de matériaux géologiques communs (d'après Custis 1994 et Reynolds 1997) 34
Tableau 2.6 : Constantes diélectriques et vitesses de propagation des ondes radio à travers certains matériaux géologiques (d'après Reynolds, 1997) 44
Tableau 3.1 : Composition des stériles et du minerai de la zone 4 (source : document interne, Mines Agnico-Eagle Ltée.) 50
Tableau 3.2 : Test de génération d'acide sur les roches de la zone 4 (source : document interne, Mines Agnico-Eagle Ltée.) 51
Tableau 3.3 : Propriétés chimiques des stériles échantillonnés (fournies par L. Bernier, 2003) 51
Tableau 3.4 : Résultats des analyses chimiques de la roche totale pour les échantillons recueillis à la mine Laronde (tiré de Gamache-Rochette, 2004) 52
Tableau 3.5 : Résultats pour les analyses statiques pour les échantillons recueillis sur la halde de la mine Laronde (tiré de Gamache-Rochette, 2004) 54
Tableau 3.6 : Propriétés des stériles déterminées par les essais en laboratoire (adapté de Gamache-Rochette, 2004) 56
Tableau 3.7 : Paramètres d'acquisition des profils radar : phase I 62
Tableau 3.8 : Paramètres d'acquisition des profils radar : phase II 65
Tableau 4.1 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité : phase I 70

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle utilisé pour la modélisation numérique de l'effet d'un essai d'infiltration sur la résistivité des stériles 80
Tableau 4.3 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité: phase II avant infiltration..... 94
Tableau 4.4 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité: phase II après infiltration 97
Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse de l'effet de l'infiltration sur les traces du géoradar: pourcentage des traces ayant été classées selon le degré d'influence de l'essai d'infiltration 151

Liste des symboles

α	coefficient d'atténuation (L^{-1})
β	constante de la formule de McNeill (Θ^{-1})
δ	profondeur de pénétration (L)
ε	permittivité électrique ($I^2T^4M^{-1}L^{-2}$)
ε_m	constante diélectrique de la matrice (-)
ε_r	constante diélectrique (-)
ε_w	constante diélectrique du fluide (-)
ϕ	porosité (-)
μ_r	perméabilité magnétique relative (-)
θ	teneur en eau volumique (-)
ρ	résistivité effective ($ML^3T^{-3}I^{-2}$)
ρ_{100}	résistivité du rock saturé à 100% ($ML^3T^{-3}I^{-2}$)
ρ_a	résistivité apparente ($ML^3T^{-3}I^{-2}$)
ρ_w	résistivité du fluide interstitiel ($ML^3T^{-3}I^{-2}$)
σ	conductivité ($I^2T^3M^{-1}L^{-3}$)
$\sigma(T)$	conductance du fluide interstitiel ($I^2T^3M^{-1}L^{-2}$)
σ_a	conductivité apparente ($I^2T^3M^{-1}L^{-3}$)
σ_s	conductivité superficielle ($I^2T^3M^{-1}L^{-3}$)
σ_w	conductance spécifique de l'eau interstitielle ($I^2T^3M^{-1}L^{-2}$)
σ'_w	conductivité de la phase liquide ($I^2T^3M^{-1}L^{-3}$)
ω	vitesse angulaire (T^{-1})
a, m, n	paramètres de régression - Formule d'Archie (-)
b	paramètre de l'équation de Hill et Millburn (-)
a', b'	constantes de régression - méthode de Rhoads et al. (-)
c	vitesse de la lumière dans le vide (L/T)
CEC	capacité d'échange cationique (-)

ΔV	différence de potentiel ($ML^2T^{-3}I^{-1}$)
E	champ électrique ($MLT^{-3}I^{-1}$)
E_0	amplitude du champ électrique initiale ($MLT^{-3}I^{-1}$)
E_x	amplitude du champ électrique à une distance x ($MLT^{-3}I^{-1}$)
f	fréquence (T^{-1})
FF	facteur de formation (-)
$FF_{0,01}$	facteur de formation pour un fluide ayant une résistivité de 0,01Ωm (-)
FF_a	facteur de formation apparent (-)
h	longueur d'onde radar (L)
I	courant (I)
j	densité de courant (IL^{-2})
K	facteur géométrique (L)
n_1,n_2,a''	paramètres - méthode de Keller et Frischknecht (-)
P	facteur de perte (-)
P	puissance (ML^2T^{-3})
Q	performance du système (-)
R	résistance (($ML^2T^{-3}I^{-2}$))
R	coefficient de réflexion (-)
S, S_w	fraction d'eau dans les pores (-)
SDT	solides dissous totaux (-)
S_{wc}	fraction critique d'eau dans les pores (-)
T	coefficient de transmission (-)
T	Température (Θ)
V	potentiel ($ML^2T^{-3}I^{-1}$)
V, V_1, V_2, V_m	vitesse de propagation des ondes radio dans le milieu (L/T)

LISTE DES ANNEXES

Voir le disque compact joint à la fin du document

Annexe A : Données brutes et résultats détaillés

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Problématique

L'extraction minière engendre la production de divers types de rejets (solides et liquides) qui, selon leur composition et leur mode d'entreposage, peuvent présenter des risques pour l'environnement. Les rejets produits par une mine peuvent comprendre : le mort terrain, les roches stériles, les rejets de concentrateur, les boues de traitement et les eaux de mine (Aubertin et al., 2002a). Chacun de ces types de rejets est géré de manière spécifique en ce qui a trait à leur entreposage, utilisation, traitement, transport, etc.

Dans le cas des stériles miniers, ces derniers peuvent être utilisés comme matériaux de construction et de remblayage souterrain ou être entreposés sous forme d'empilements appelés haldes. Bien que les roches stériles n'aient pas de valeur commerciale, elles ne sont pas pour autant vides de minéraux. Si les stériles contiennent des minéraux sulfureux tels que la pyrite et que ces derniers sont exposés à l'eau et l'oxygène, on peut assister au phénomène de génération de drainage minier acide (DMA). Si ce phénomène n'est pas contrôlé et que les eaux provenant du DMA sont rejetées dans la nature, les conséquences environnementales peuvent être très importantes. De nombreux sites miniers au Québec et au Canada sont générateurs de DMA et dans certains cas, de graves problèmes environnementaux sont présents.

Afin de bien étudier et comprendre le phénomène de génération du drainage minier acide au sein des haldes à stériles miniers, il faut avoir de bonnes connaissances de la structure interne de ces dernières. Ceci permet de mieux comprendre comment se fait le mouvement de l'eau dans ces matériaux et de dresser des modèles de l'échange des fluides et des gaz dans les haldes. La structure interne d'une halde à stériles est fortement dictée par la méthode de construction de cette dernière (Aubertin et al. 2002a, 2002b; Martin, 2003). Cependant, la caractérisation sur le terrain demeure difficile.

Les méthodes habituelles de caractérisation des sols sont difficilement applicables sur des matériaux tels que les stériles miniers. L'excavation par tranchées risque de remanier les matériaux et de détruire la structure présente dans les stériles. Le forage de puits d'observation pose plusieurs difficultés en raison de l'hétérogénéité des stériles et de la taille étalée et variable des particules. Les méthodes de forage normalement utilisées dans les matériaux meubles ne peuvent être aisément appliquées en raison de la présence de gros blocs de roche dans les stériles. En contrepartie, les forages au diamant utilisés pour forer dans le roc peuvent poser des difficultés en raison de la présence de matériaux meubles. De plus, les forages destructifs peuvent perturber la structure dans les stériles, d'où le besoin de l'utilisation de méthodes de caractérisation non destructives comme la géophysique de surface pour l'étude de la structure interne des haldes à stériles miniers.

1.2 Objectifs de l'étude

Le présent travail vise à faire la caractérisation de la structure interne d'une halde à stériles par des méthodes géophysiques de surface. On cherche à savoir s'il y a des structures particulières au sein de la halde qui pourraient être dictées par les matériaux en place et par le mode de déposition de ces derniers. Ainsi, il peut y avoir des stratifications au sein de la halde qui pourraient être délimitées par les méthodes géophysiques. De plus, la présence de structures particulières et d'une stratification dans les stériles pourrait donner naissance à des chemins d'écoulement préférentiels lorsqu'il y a infiltration de l'eau. Cet écoulement pourrait mener à des zones d'accumulation d'eau.

Des zones où l'on retrouve des concentrations plus importantes en sulfures peuvent aussi être présentes à certains endroits et ces zones posent un risque plus élevé de génération de DMA.

Les méthodes géophysiques peuvent servir à identifier les éléments mentionnés ci haut. Par conséquent, des essais ont été menés sur une parcelle expérimentale qui a été délimitée sur une halde à stériles de la mine Laronde, près de la municipalité de

Cadillac en Abitibi. Les travaux ont été menés en deux phases, soit une première phase exploratoire servant à obtenir un modèle initial de la structure de la halde et une seconde phase servant notamment à étudier l'effet de l'écoulement sur les propriétés physiques des stériles à l'aide d'un essai d'infiltration.

1.3 Choix des méthodes géophysiques

Deux méthodes géophysiques ont été retenues pour effectuer les travaux sur la halde à stériles, soit la résistivité électrique et le radar géologique ou géoradar. Reynolds (1997) présente de manière détaillée les applications de ces deux méthodes dans le domaine de l'environnement.

La résistivité électrique permet de mesurer la résistivité du sol et ainsi délimiter les zones ayant des résistivités différentes. Une variation de la résistivité peut indiquer un horizon ayant une composition minéralogique différente. Une zone à forte concentration en sulfures aura tendance à donner une résistivité faible puisque le sol est plus conducteur. La résistivité électrique est aussi utilisée pour faire le suivi de la migration de contaminants (tels que le DMA) pouvant se trouver dans le sol. La présence d'eau dans les matériaux meubles peut aussi être détectée par cette méthode. Par conséquent, il est possible de faire un suivi du degré de saturation d'un sol à l'aide d'un monitoring dans le temps.

Un désavantage de la résistivité électrique est que la méthode ne permet pas de voir des structures dans le sol si la résistivité de ce dernier est uniforme. Aussi, l'interprétation des données de résistivité nécessite l'application d'algorithmes d'inversion numérique. Bien que des logiciels commerciaux d'inversion soient disponibles, les résultats obtenus peuvent être non-uniques ou être infligés de problèmes d'équivalence. Par conséquent, il faut toujours interpréter les résultats d'inversion avec un esprit critique. Idéalement, ces résultats doivent être calibrés avec des données de terrain telles que des descriptions de forage. Enfin, la fiabilité de la méthode est liée à la qualité des données, ce qui nécessite une attention particulière lors de l'acquisition des données sur le terrain.

Le géoradar est un excellent outil pour faire une cartographie de la structure du sol. Les contrastes diélectriques entre les différents matériaux composant le sol permettent d'obtenir une image des différents horizons du sol de même que la position des objets ponctuels qui réfléchissent l'onde émise par le géoradar. Cette méthode est également efficace pour détecter des objets métalliques enfouis, car ces derniers ont un fort contraste diélectrique avec les matériaux meubles. Enfin, le géoradar peut aussi servir à délimiter des panaches de contamination, car dans certains cas, les panaches sont conducteurs et absorbent complètement le signal. Dans un tel cas, l'étendue du panache de contamination peut être délimitée, car elle correspond à la limite où le signal est complètement absorbé et ne pénètre plus en profondeur.

Le principal désavantage du géoradar est le fait que la pénétration du signal est directement reliée à la nature du terrain. La présence de matériaux conducteurs tels que l'argile limite énormément la pénétration du signal et par conséquent, de l'information pouvant être tirée des données. De plus, les systèmes de géoradar mesurent les temps de propagation d'une l'onde électromagnétique, par conséquent il est nécessaire d'avoir une idée de la vitesse de propagation de l'onde dans les matériaux afin de transformer les temps aller-retour de l'onde en profondeurs réelles. Pour ce faire, des outils d'analyse sont nécessaires. Cependant, dans certains cas, une analyse des données ne suffit pas et des sondages de calibration sont nécessaires afin d'estimer la profondeur réelle des réflecteurs dans le sol.

Plusieurs autres méthodes géophysiques, telles que les méthodes électromagnétiques ou la polarisation provoquée, auraient également pu être utilisées pour ce type de travaux (Paterson et al.; 1994, Custis, 1994a,b). Cependant, les deux méthodes proposées possèdent les caractéristiques nécessaires pour répondre aux principaux objectifs du projet. De plus, en raison du temps limité disponible pour les campagnes de terrain, il a été jugé important de concentrer les efforts autour de deux méthodes seulement.

1.4 Contenu du mémoire

Le présent travail est divisé en six chapitres. Le chapitre 2 présente une revue de la littérature concernant le drainage minier acide, les haldes à stériles et la caractérisation géophysique des haldes. On y retrouve aussi la théorie reliée aux méthodes géophysiques utilisées pour effectuer l'étude. Le chapitre 3 présente les principales caractéristiques de la halde à stériles de la mine Laronde et la description des travaux de terrain effectués sur cette dernière. Les résultats des campagnes de terrain pour chaque méthode géophysique, ainsi que ceux d'une série de modélisations numériques sont présentés au chapitre 4. L'analyse des résultats et une interprétation intégrant la théorie, les caractéristiques du site et les résultats des deux méthodes géophysiques utilisées sont présentées au chapitre 5. La synthèse des résultats et les recommandations sont inclues dans la conclusion au chapitre 6.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Le drainage minier acide

2.1.1 Généralités

Lorsqu'un rejet minier contenant des minéraux sulfureux est exposé à l'air et à l'eau, il est susceptible de s'oxyder et de produire du drainage minier acide (DMA). La production de DMA réduit le pH de l'eau et par conséquent permet de libérer les métaux et autres minéraux présents dans les rejets. Ces derniers se retrouvent dans le lixiviat provenant des résidus et peuvent contaminer l'environnement si des mesures préventives ne sont pas appliquées. Par ailleurs, la génération de DMA dans les rejets miniers est souvent retardée par la présence de minéraux neutralisants tels que la calcite et autres carbonates. Pour cette raison, une exploitation minière sans problèmes de DMA durant les premières années d'opération peut tout de même développer du DMA plusieurs années, ou même voir des décennies, plus tard (Custis, 1994a).

Suite à une étude effectuée par Custis (1994a), les conclusions suivantes ont été tirées :

- Le DMA est produit par des minéraux naturels qui se retrouvent souvent en grandes quantités dans les rejets miniers.
- Une fois le processus de génération de DMA entamé, la situation a tendance à s'aggraver. La présence de bactéries aérobies telles que *Thyobacillus ferrooxidans* peut accélérer le processus lorsque le pH de l'eau chute en-dessous d'une valeur critique. Dès lors, le processus est difficile à arrêter.
- La génération de DMA peut survenir après la fermeture de l'exploitation. Dans ce cas, des mesures de mitigation sont difficiles à appliquer.

2.1.2 Contexte géochimique

Le DMA provient de l'oxydation des minéraux sulfureux en présence d'eau et d'oxygène. Les sulfures de fer, telle que la pyrite, sont des minéraux souvent associés aux exploitations de métaux économiques et se retrouvent dans la plupart des cas dans les résidus miniers. Le processus d'oxydation de la pyrite peut être présenté par les équations suivantes (Aubertin et al. 2002a) :

Oxydation directe:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \Rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \quad (2.1)$$

Oxydation indirecte:

$$2Fe^{2+} + \tfrac{1}{2}O_2 + 2H^+ \Rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \quad (2.2)$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \Rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad (2.3)$$

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \Rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \quad (2.4)$$

Réaction globale:

$$FeS_2 + \tfrac{15}{4}O_2 + \tfrac{7}{2}H_2O \Rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4 \quad (2.5)$$

L'oxydation directe (eq. 2.1) se produit au contact de l'oxygène avec la pyrite et l'eau. Le fer ferreux produit par l'oxydation directe réagit à son tour avec l'oxygène et les ions d'hydrogène pour former du fer ferrique. Ce dernier a la capacité d'oxyder la pyrite et par conséquent accroître la quantité d'ions d'hydrogène et de fer ferreux disponibles (eq. 2.5). Une fois que les processus d'oxydation sont entamés, les réactions chimiques produisent les réactifs nécessaires pour générer le DMA tant et aussi longtemps qu'il reste la source primaire de sulfures, c'est-à-dire la pyrite dans le cas présent.

Dans des conditions acides typiques au DMA, la présence des certaines bactéries aérobies telles que *Thyobacillus ferrooxidans* permet d'accélérer la production de fer ferrique. Ces dernières jouent le rôle de catalyseurs en utilisant l'oxydation ferreux-

ferrique comme source d'énergie (Lefebvre, 1994). Dans ce cas, le fer ferrique est produit selon l'équation suivante (Lefebvre,1994) :

$$14Fe^{2+} + 14H^{+} + 3{,}5O_2 + bactéries \Rightarrow 14Fe^{3+} + 7H_2O \qquad (2.6)$$

La formation de DMA entraîne une forte diminution du pH de l'eau de lixiviat. Dans ces conditions, la dissolution des métaux est favorisée et leur concentration dans l'eau augmente (Aubertin et al., 2002a). Ceci peut présenter des risques importants dans le cas d'un déversement de DMA dans l'environnement.

La génération de DMA peut être ralentie ou retardée lorsque qu'il y a présence de minéraux acidivores dans les rejets miniers. Si tel est le cas, l'acide généré par l'oxydation des sulfures sera neutralisé lorsqu'il réagit avec les minéraux tampons. On retrouve trois types principaux de minéraux neutralisants, soit les carbonates, les hydroxydes et les silicates (voir tableau 2.1). De plus ces réactions généreront des minéraux secondaires tels que des sulfates, oxydes et hydroxydes que l'on peut retrouver dans des rejets miniers ayant atteint un niveau d'oxydation avancé. Les carbonates tels que la calcite et la dolomite s'avèrent des minéraux tampons efficaces (Bernier, 2003):

Calcite: $$2CaCo_3 + H_2SO_4 \Rightarrow 2Ca^{2+} + 2HCO_3^{-} + SO_4^{-2} \qquad (2.7)$$

Dolomite: $$CaMg(CO_3)_2 + H_2SO_4 \Rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2HCO_3^{-} + SO_4^{-2} \qquad (2.8)$$

Dans cet exemple, si l'ion HCO_3^- réagit avec le fer ferreux présent dans l'eau des rejets, il y aura précipitation de sidérite ($FeCO_3$) comme minéral secondaire :

$$HCO_3^{-} + Fe^{2+} \Rightarrow FeCO_3 + H^{+} \qquad (2.9)$$

Tableau 2.1 : Minéraux neutralisants (Tiré de Bernier, 2003)

Carbonates	Aragonite	$CaCO_3$
	Calcite	$CaCO_3$
	Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$
	Magnésite	$MgCO_3$
	Ankérite	$Ca(Fe,Mg)(CO_3)_2$
	Kutnohorite	$CaMn(CO_3)_2$
	Sidérite	$FeCO_3$
	Smithsonite	$ZnCO_3$
	Cerrusite	$PbCO_3$
Hydroxydes	Gibbsite	$Al(OH)_3$
	Manganite	MnOOH
	Goethite	FeOOH
	Brucite	$Mg(OH)_2$
Silicates	Chlorite	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
	Orthose	$KAlSi_3O_8$
	Albite	$NaAlSi_3O_8$
	Anorthite	$CaNaAl_2Si_2O_8$
	Muscovite	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
	Biotite	$K(Fe,Mg)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$

Comme le démontrent les équations présentées ici, la génération de DMA ne dépend pas d'une simple équation, mais plutôt de l'interaction entre plusieurs minéraux réactifs pouvant contribuer de façon positive ou négative à la production d'acide. Le tableau 2.2 résume les cinétiques impliquées dans la génération de DMA :

Tableau 2.2 : Types de réactions géochimiques effectives dans les résidus miniers (Tiré de Bernier, 2003)

Processus	Transfert de masse
Oxydation des sulfures	Production de H^+ et métaux
Précipitation de hydroxydes	Consommation de H^+ et production de métaux
Dissolution et précipitation des sulfates	Production et consommation de métaux et H^+
Dissolution des hydroxydes, carbonates et silicates	Consommation de H^+
Co-précipitation	Consommation de métaux

2.2 Influence de la géochimie sur les propriétés géophysiques des matériaux

Les variations dans la géochimie d'un matériau donné peuvent créer des contrastes dans les propriétés électriques de ce dernier. Bien que les méthodes géophysiques

mesurent différents paramètres du matériau, tel que la propagation des ondes électromagnétiques, la circulation de courants électriques, etc., la plupart des méthodes sont, d'une manière ou d'une autre, sensibles aux contrastes dans les propriétés électriques du milieu.

La résistivité électrique d'un matériau donné dépend principalement de la nature de ce dernier. Les propriétés électriques des matériaux géologiques seront discutées dans la section 2.5.3. La présente section vise à identifier l'influence de plusieurs autres facteurs géochimiques qui sont indépendants de la nature géologique du matériau. De façon générale, la circulation de courant électrique dans un matériau sera fortement liée à la nature des pores de ce dernier (volume, forme, interconnectivité), ainsi qu'à la nature des fluides interstitiels (Custis, 1994a). Par conséquent, la présence de métaux en solution dans le DMA influencera la circulation du courant dans les stériles.

Dans le cas des roches sédimentaires et des sols, il est possible d'estimer la résistivité à l'aide de la formule d'Archie (1942) :

$$\rho = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \tag{2.10}$$

où ρ est la résistivité effective du matériau (en Ωm), ρ_w est la résistivité du fluide interstitiel (en Ωm), ϕ est la porosité, S est la fraction d'eau dans les pores (ou le degré de saturation) et a, m et n sont des constantes. Le rapport ρ/ρ_w est appelé le facteur de formation (FF). Chouteau (2001) présente des valeurs typiques de a, m et n pour différents types de roches (voir tableau 2.3). Généralement :

$$0,5 \leq a \leq 2,5$$
$$1,3 \leq m \leq 2,5$$
$$n \approx 2$$

Tableau 2.3 : Valeurs à utiliser avec la formule d'Archie (tiré de Chouteau 2001)

Description de la roche	*a*	*m*
Roche détritique faiblement cimentée, présentant une porosité entre 25 et 45%	0,88	1,37
Roche sédimentaire modérément cimentée, présentant une porosité entre 18 et 35%	0,62	1,72
Roche sédimentaire bien cimentée, présentant une porosité entre 5 et 25%	0,62	1,95
Roche volcanique à porosité élevée, de 20 à 80%	3,5	1,44
Roches à très faible porosité, moins de 4%	1,4	1,58

Dans le cas des argiles, la résistivité électrique est déterminée par leur teneur en eau et la capacité d'échanger cationique (CEC) (Custis, 1994a). La CEC, qui est exprimée en milliéquivalents adsorbés par 100g de sol, représente le nombre de cations nécessaires pour neutraliser les particules d'argile.

Dans le cas de roches sédimentaires contenant des argiles, un facteur de formation apparent (FF_a, sans unités) peut être estimé à l'aide de la méthode de Hill et Milburn selon l'équation suivante (Custis, 1994a) :

$$FF_a = FF_{0,01} \cdot (100\rho_w)^{b \cdot \log(100\rho_w)} \qquad (2.11)$$

où :

$FF_{0,01}$ = facteur de formation pour un fluide ayant une résistivité de 0,01Ωm

b = -0,135(CEC/θ) – 0,0055

θ = teneur en eau volumique (en cm^3 d'eau/cm^3 de sol)

ρ_w = résistivité de l'eau interstitielle (en Ωm)

La relation 2.11 montre que le CEC agit de façon semi logarithmique sur le FF_a et par conséquent sur la résistivité effective de la roche. Par conséquent, la proportion d'argile présente dans la roche peut influencer la résistivité totale de cette dernière.

La présence de solides dissous dans le fluide interstitiel peut également influencer les propriétés électriques d'un matériau. McNeill (1980) présente quelques relations empiriques reliant la conductivité ($\sigma = 1/\rho$) du sol à la concentration de solides dissous totaux (SDT) :

$$\sigma_a = 0{,}25\sigma_w \tag{2.12}$$

$$\sigma_w = (1/6) \cdot \text{SDT} \tag{2.13}$$

$$\sigma_a = (1/25) \cdot \text{SDT} \tag{2.14}$$

où :

σ_a : conductivité apparente en mS/m

σ_w : conductance spécifique de l'eau interstitielle en mS/m

SDT : solides dissous totaux en ppm

La méthode de Rhoades et al. (Custis, 1994a) est un autre moyen d'estimer la conductivité du sol en tenant compte de la teneur en eau et de la salinité de l'eau. Cette méthode stipule que la conductivité électrique apparente du sol (σ_a) est fonction de la conductivité de la phase liquide (σ'_w) et de la conductivité superficielle (σ_s) due aux ions libres à l'interface liquide-solide selon la relation suivante :

$$\sigma_a = \sigma'_w \cdot \theta \cdot T + \sigma_s \tag{2.15}$$

où : T = coefficient de transmission

Le coefficient T peut être estimé par la formule empirique suivante :

$$T = a' \cdot \theta + b' \tag{2.16}$$

où a' et b' sont des constantes de régression pouvant être déterminées à partir du graphique de $\{(\sigma_a - \sigma_s)/\sigma_w\}/\theta$ en fonction de θ.

Les formules de Keller et Frischknecht (1966) établissent la relation entre la résistivité du sol et le degré de saturation d'une roche:

$$\rho / \rho_{100} = \begin{cases} S_w^{-n_1}; S_w > S_{wc} \\ a'' S_w^{-n_2}; S_w < S_{wc} \end{cases} \qquad (2.17)$$

où :

ρ = résistivité de la roche partiellement saturée

ρ_{100} = résistivité de la roche complètement saturée

S_w = fraction d'eau dans les pores (volume d'eau/volume des vides)

S_{wc} = fraction d'eau dans les pores critique

$n_1 \approx 2$

$4 \leq n_2 \leq 5$

$0,05 \leq a'' \leq 0,5$

La fraction d'eau critique (S_{wc}) correspond à la mince pellicule d'eau qui recouvre toujours la surface de la roche. Cette valeur est fonction du type de roche et varie d'environ 0,25 pour les grès à 0,80 pour les roches ignées (Custis, 1994a). Les paramètres n_1, n_2 et a" sont déterminés de manière empirique et sont aussi reliés au type de roche.

Un autre paramètre pouvant influencer les propriétés électriques d'un matériau est la température. En effet, la conductance de l'eau interstitielle varie avec la température due aux changements dans la viscosité qui affectent la mobilité des ions (Custis, 1994a). Les effets de la température sur la conductance du fluide interstitiel ($\sigma(T)$) peuvent être évalués à l'aide de la relation suivante (McNeill, 1980):

$$\sigma(\mathrm{T}) = \sigma_{25^\circ C} \cdot \left[1 + \beta(\mathrm{T} - 25^\circ C)\right] \qquad (2.18)$$

où :

$\sigma_{25°C}$ = conductance du fluide à 25°C

β = $2,2 \times 10^{-2}$ par °C

T = température en degrés Celsius

2.3 Haldes à stériles

2.3.1 Généralités

Lors d'une exploitation minière, la roche qui est extraite peut être classée selon deux catégories générales : le minerai et les stériles. Puisque le contexte géologique est différent pour chaque gisement, la nature du minerai et des stériles varie d'une mine à une autre.

Le minerai est constitué de la roche contenant une concentration de minéraux économiques rentable, qui est acheminée au concentrateur de la mine afin d'extraire le ou les minéraux d'intérêt. Les stériles représentent des volumes de roche qui n'ont pas de valeur économique et qui doivent être extraits afin d'atteindre le minerai. Dans le cas de certains types d'exploitation telles que les mines à ciel ouvert, la proportion de stériles extraits est beaucoup plus importante que celle du minerai. Par conséquent, ces volumes de roche doivent être entreposés en surface sous forme d'empilements appelés haldes. Ces structures peuvent parfois atteindre des dimensions considérables et couvrir des superficies ayant plusieurs dizaines ou centaines d'hectares.

Lorsque la minéralogie est favorable, les stériles miniers peuvent générer du drainage minier acide (DMA). C'est pourquoi il est important de connaître les processus responsables de la production de DMA au sein des haldes à stériles. Afin de comprendre ces processus, il est nécessaire de bien caractériser les empilements de stériles. Cette section présente les caractéristiques principales de ces structures.

2.3.2 Méthodes de construction et géométrie des haldes à stériles

La méthode de construction et la configuration d'une halde à stériles dépendent principalement de la topographie présente sur la propriété minière. La méthode de construction utilisée a un effet sur le degré de compaction et la ségrégation granulométrique au sein de l'empilement (Morin et al. 1991), deux paramètres critiques en ce qui a trait au mouvement de l'eau, des gaz et des particules dans une halde.

Fala (2002) fait une revue des différentes méthodes de construction des haldes à stériles :

1) Déversement à la benne.
2) Déversement avec épandage au butoir.
3) Déversement à la benne avec réglage.
4) Déversement avec l'utilisation de la pelle à benne traînante.

Le déversement à la benne consiste à déverser les stériles à l'aide de camions porteurs le long de la crête de la halde. Le déversement avec épandage butoir est similaire au déversement à la benne, mis à part que les stériles sont déposés près de la crête par les campions porteurs et par la suite poussés au-delà de la crête par un bouteur. Ces deux méthodes de déversement ont pour effet de créer une ségrégation des particules le long des pentes de la halde, où l'on retrouve les blocs de grandes dimensions au pied de l'empilement et les particules plus fines près de la surface. Cette ségrégation est beaucoup plus importante pour le déversement à la benne en raison de la vitesse plus élevée des particules lors de ce dernier (Fala 2002).

Le déversement à la benne butoir consiste à déposer les stériles sous forme d'empilements individuels dont la surface est régalée et compactée par la suite. Enfin, la méthode de déversement à l'aide d'une pelle à benne traînante est typique des charbonnages de grande envergure et consiste à déposer les stériles sous forme d'empilements parallèles allongés. Ces deux méthodes créent moins de ségrégation dans les empilements tels que mentionné pour les deux premières méthodes.

La géométrie des haldes à stériles typiques peut être classée selon cinq configurations générales (Martin 2003), ces dernières sont illustrées à la figure 2.1 :

1) Déposition dans une vallée.
2) Déposition en travers d'une vallée.
3) Déposition sur une pente.
4) Déposition en crête.
5) Empilement en tas.

Tel que mentionné auparavant, c'est la topographie du site qui dicte en grande partie la configuration utilisée. Dans le cas des empilements dans une vallée tout comme ceux sur une pente, les stériles sont généralement déversées à partir de l'amont. Dans le cas des empilements en travers d'une vallée, les stériles sont empilés à partir de bancs au fond de la vallée. Pour leur part, les haldes à stériles construites sur une crête auront des caractéristiques similaires à celles construites sur une pente, mais peuvent s'étaler sur les deux pentes de la crête.

Une configuration communément utilisée dans les exploitations minières nord américaines est l'empilement en tas. Ces structures sont construites généralement lorsque le terrain est plat et occupent souvent une superficie assez élevée. Lorsque l'espace disponible pour les stériles sur la propriété est limité, un ou plusieurs bancs supérieurs peuvent être ajoutés à l'empilement. Dans le cas où l'on peut distinguer le pied d'un banc supérieur par rapport à la crête d'un banc inférieur, l'empilement en tas sera dit avec terrasses. Dans ce cas, si une coupe était faite au travers de la halde (voir figure 2.2), cette dernière présenterait une alternance de matériaux fins compactés au sommet des bancs et des matériaux plus lâches et grossiers au travers des bancs. Ce phénomène est expliqué par le fait que lors de construction de la halde, la circulation de véhicules lourds agit de façon à désagréger et compacter les stériles situés près de la surface des bancs (Martin, 2003). Notons que la distribution des matériaux sera différente sur les pentes d'une halde où, comme il a été mentionné auparavant, il y a une ségrégation entre les matériaux grossiers qui se retrouvent à la base de la halde et les matériaux plus fins qui se retrouvent le long des pentes. La figure 2.2 présente une coupe schématique d'un empilement en tas.

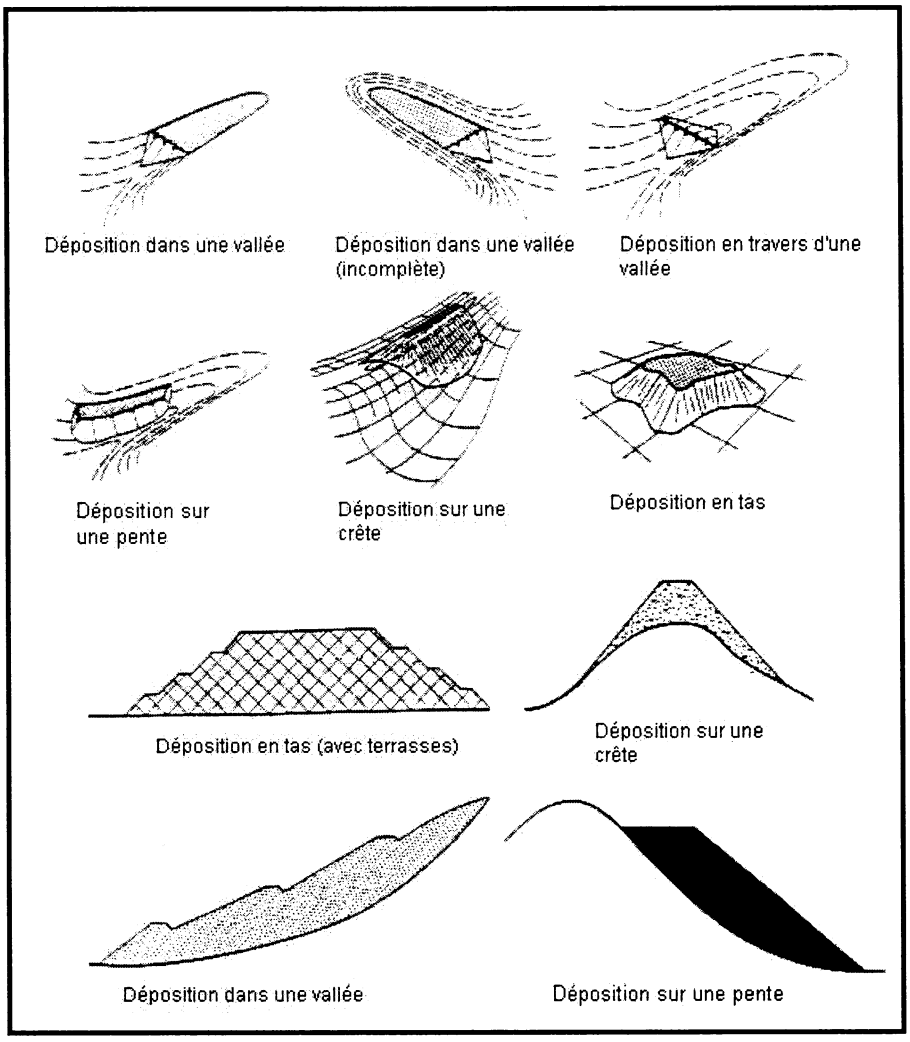


Figure 2.1 : Classification des types de haldes à stériles selon la méthode de construction et la configuration (tiré de Martin 2003, adapté de Herasymuik, 1996)

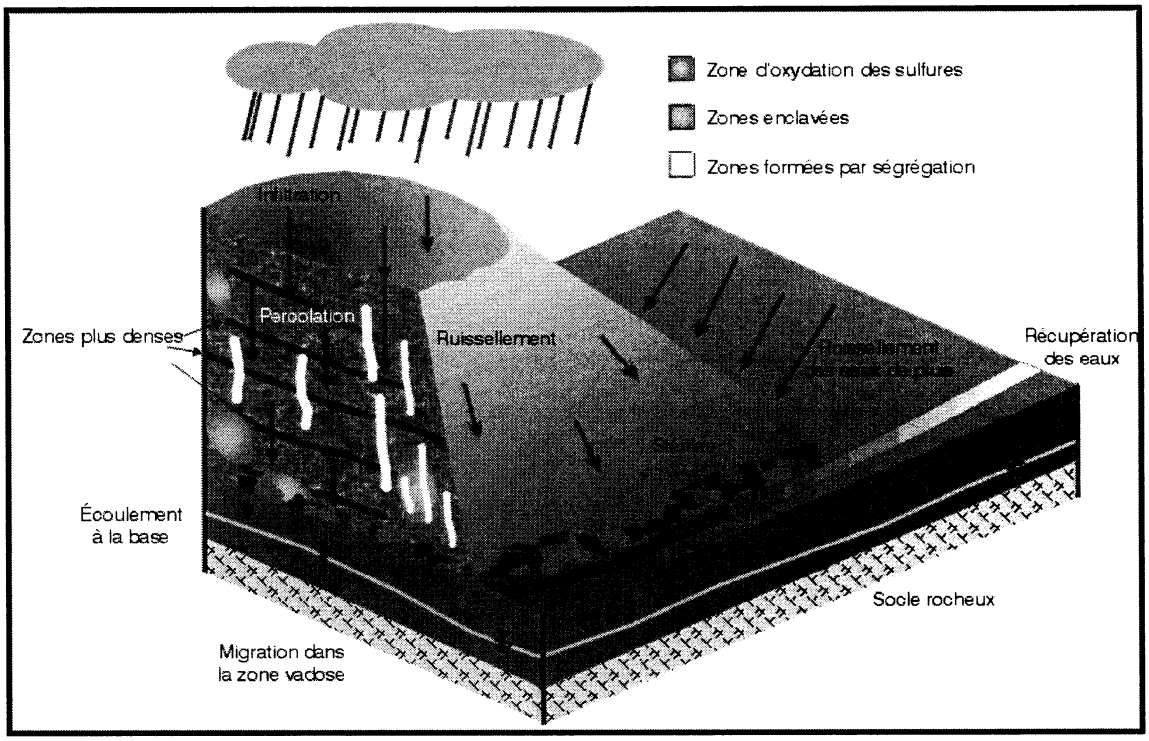


Figure 2.2 : Coupe schématique d'un empilement en tas (tiré de Aubertin et al., 2002a)

2.3.3 Processus impliqués dans la génération de DMA

Il y a trois processus physiques principaux impliqués dans la production de DMA dans une halde à stériles, soit : l'écoulement multiphasique, le transfert de chaleur et le mouvement des composantes gazeuses (Lefebvre, 1994). La figure 2.3 présente les mécanismes impliqués dans les haldes à stériles.

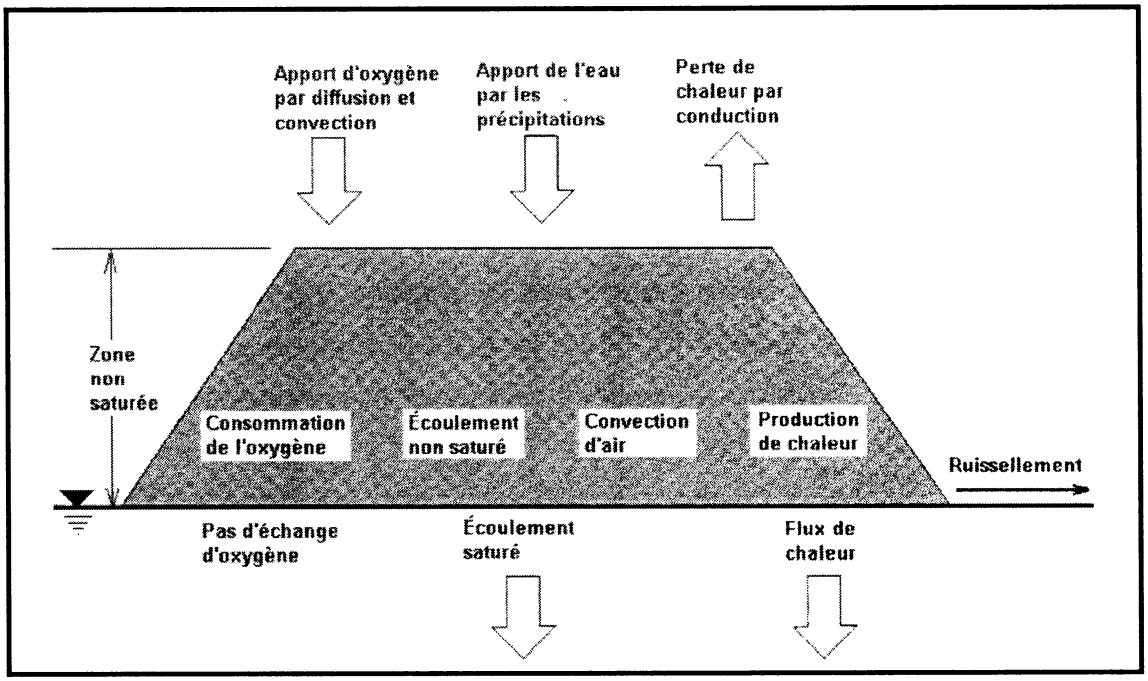


Figure 2.3 : Mécanismes physiques impliqués dans la génération de DMA dans une halde à stériles (tiré de Fala, 2002, adapté d'après Lefebvre, 1994)

Lefebvre (1994) présente l'interaction des divers processus mentionnés précédemment selon le cycle suivant. Lorsqu'il y a oxydation des minéraux sulfureux, la réaction chimique produit de la chaleur qui se dissipe dans les stériles. Par conséquent, des gradients de température sont créés au sein de la halde ce qui déclenche des courants de convection permettant une évacuation des gaz ayant une température plus élevée vers le haut et un apport en air dans les stériles par les bordures de l'empilement. Cet apport d'oxygène permet d'alimenter le système et l'oxydation des sulfures se poursuit. La présence d'eau, qui est soumise aux processus d'évaporation et de condensation, joue un rôle important dans la distribution de l'humidité au sein de la halde. De plus, l'infiltration de l'eau influence le transfert de chaleur en raison des mécanismes liés à l'advection. Ce cycle tend à se stabiliser à long terme et le système ne subit que des variations cycliques (diurnes et saisonnières) qui ont une influence limitée sur les processus d'oxydation en cours.

2.3.4 Méthodes de caractérisation des haldes à stériles

La caractérisation d'une halde à stériles est une tâche qui peut s'avérer complexe. En effet, la taille d'une telle structure et l'hétérogénéité de la roche qui la constitue ne permettent pas une caractérisation adéquate des matériaux par simple échantillonnage local. La caractérisation d'une halde à stériles peut nécessiter l'évaluation de plusieurs paramètres structuraux, géotechniques, hydrogéologiques, climatiques, géochimiques, etc. Martin (2003) présente les principales méthodes pouvant être utilisée afin de caractériser une halde à stériles :

- Mesures *in situ* des propriétés
- Essais de traceurs
- Excavation dans les stériles
- Programme de forage
- Levés géophysiques

Certaines propriétés des stériles peuvent être mesurées *in situ*. Notamment, il est possible d'estimer la conductivité hydraulique en place à l'aide d'essais d'infiltration (Gamache-Rochette, 2004). De plus, on peut effectuer des mesures *in situ* de la teneur en eau, de la succion, de la température, de l'humidité et de la densité relative (Martin, 2003). On peut imaginer de coupler un essai d'infiltration à des essais de traceurs. Ceci pourrait permettre d'observer des cheminements d'écoulement préférentiel au sein de la halde à l'aide d'excavations post-infiltration.

L'excavation dans les stériles peut être faite sous forme de tranchée à l'aide d'une pelle mécanique. Cette dernière permet d'évaluer la composition minéralogique des différents horizons présents dans la halde à des profondeurs allant jusqu'à environ 4 mètres. De plus, l'observation dans une tranchée permet d'estimer la granulométrie et la porosité dans le matériau, ainsi que de déterminer l'état d'oxydation dans les stériles. Une tranchée permet aussi de faire des relevés structuraux tels que le pendage et l'orientation des couches. Enfin, elle permet de recueillir des échantillons des différents horizons des matériaux afin d'effectuer des essais en laboratoire (Gamache-Rochette, 2004).

Le forage dans les stériles miniers est une méthode coûteuse qui peut permettre de déterminer la teneur en eau volumique et autres caractéristiques du matériau (Martin, 2003). Cependant, il peut s'avérer difficile de forer dans une halde puisque les stériles peuvent se comporter parfois comme un sol meuble et d'autres fois comme du roc. Le choix de la méthode de forage doit donc être évalué selon la nature des stériles.

Les levés géophysiques sont des méthodes de caractérisation non destructive qui permettent de sonder le terrain sur des superficies beaucoup plus grandes que les méthodes décrites plus haut. De plus, lorsque couplée avec d'autres méthodes de caractérisation telles que celles mentionnées dans les paragraphes précédents, la géophysique peut s'avérer très efficace pour évaluer les caractéristiques du terrain. La section 2.4 est consacrée à l'application des méthodes géophysiques sur les stériles miniers et les autres types de résidus miniers.

2.4 Caractérisation géophysique des haldes à stériles

La littérature portant sur l'application de la géophysique à la détection et à la surveillance des eaux de drainage minier acide (DMA) est peu abondante. Notons que l'ouvrage de Paterson et al. (1994) est sans doute le plus général et complet en ce qui a trait à la description des capacités, des avantages et désavantages, des coûts, etc. des méthodes géophysiques appliquées à la détection et au suivi du DMA. Une revue assez exhaustive de l'utilisation de la géophysique sur les problèmes de DMA est parallèlement présentée par Custis (1994a, b). Les études traitant de l'application des méthodes géophysiques sur les haldes à stériles miniers sont cependant limitées. De plus, l'étude spécifique de la structure interne des haldes reste à être approfondie, car pratiquement aucun auteur n'a discuté ceci en détail. Il semble que dans le passé, l'intérêt a plutôt été dirigé vers l'étude du DMA dans les parcs à résidus miniers.

2.4.1 Les méthodes géoélectriques

Les méthodes géoélectriques sont sans doute celles qui sont le plus utilisées pour faire le suivi du DMA dans les sites miniers. Ces méthodes mesurent les contrastes de résistivité dans le terrain, ce qui par conséquent permet d'identifier les zones où le sol

est plus conducteur. Or, lorsqu'il y a présence d'eaux acides sur un terrain, la résistivité tend à diminuer dans les zones où l'eau circule.

Campbell et al. (1999) et Campbell et Fitterman (2000) ont étudié l'utilisation de méthodes géoélectriques sur les haldes à stériles en présentant plusieurs exemples provenant de l'ouest américain (Colorado). Leurs travaux montrent que les mesures de résistivité électrique permettent de délimiter des panaches au sein des haldes, qui seraient dus à la circulation de DMA. En effet, des essais montrent qu'il y a une corrélation entre la conductivité électrique et le pH du lixiviat lorsque ce dernier est inférieur à 5, ce qui est le cas pour le DMA (Fig. 2.4). Cette relation est similaire à celle de la solubilité des métaux en fonction du pH (e.g. Aubertin et al. 2002a), ce qui confirme que la conductivité électrique est fonction de la concentration en métaux dans le lixiviat. De plus, un programme de suivi des mesures dans le temps permet de voir la migration de tels panaches et ainsi déterminer le cheminement de l'eau au sein de la halde. Outre cela, la résistivité permet d'identifier des « poches » de haute conductivité et de basse conductivité au sein des haldes. Selon ces auteurs, ceci permettrait de distinguer les zones où il y a génération de DMA des zones où il y a moins d'activité.

Les mesures de résistivité permettent aussi d'identifier des variations dans la composition minéralogique. Ceci peut s'avérer utile pour identifier les zones riches en minéraux sulfureux dans la halde qui pourraient avoir un plus grand potentiel de génération de DMA.

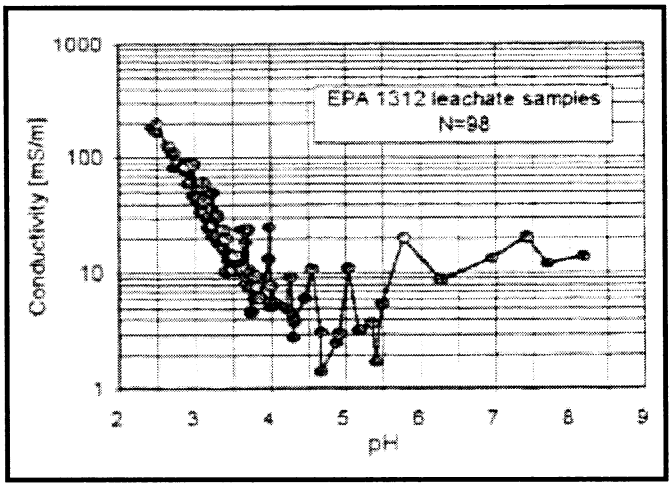


Figure 2.4 : Corrélation entre la conductivité électrique du lixiviat et le pH du lixiviat d'échantillons de stériles miniers. (tirée de Campbell et al. 1999)

Une autre méthode géoélectrique qui a été utilisée pour caractériser les haldes à stériles est la polarisation provoquée (PP) et une variante de celle-ci qui est la polarisation provoquée spectrale (PPS). Contrairement à la résistivité qui mesure la réponse du sol lorsque soumis à un courant électrique, la PP mesure la réponse du sol suite à une coupure du courant. Les mesures de PP sont exprimées en % ou en mV/V, couramment appelée chargeabilité, et expriment le rapport entre le potentiel mesuré après que le courant soit coupé et le potentiel lorsque le courant était appliqué. Cette méthode, fréquemment utilisée en exploration pour la recherche de minéralisation disséminée, peut être appliquée à la caractérisation des résidus miniers. Pour ce qui est de la PPS, le principe est le même que la PP. Cependant, les mesures sont effectuées sur une bande de fréquences de l'ordre du 10^{-3} à 10^{6} Hz. Ces mesures permettent d'obtenir un spectre caractéristique du matériau

Campbell et al. (1998) ont appliqué la méthode de polarisation induite spectrale SIP sur des haldes à résidus riches en sulfures situées sur des sites miniers abandonnés au Colorado. Ces haldes produisent du DMA (pH=2) en raison de la forte porosité des matériaux combinée à de fortes précipitations printanières. Des mesures de résistivité apparente et de phase sur des échantillons en laboratoire ainsi que sur le terrain ont

été faites afin de cartographier les secteurs à l'intérieur des haldes où il y aurait présence de sulfures et/ou de zones d'oxydation. Cette étude a permis de poser deux hypothèses. Tout d'abord, les mesures de résistivité reflètent la teneur en eau du matériau, c'est-à-dire qu'un matériau ayant une teneur en eau élevée aura une résistivité plus faible que s'il était sec. Ensuite, les courbes de phase mesurées pourraient servir à caractériser la minéralogie et la granulométrie du matériau. Ceci permettrait d'affirmer que, dans le cas de résidus ayant plus de 40 ans, le drainage acide peut être causé par d'autres mécanismes que l'oxydation des sulfures. Il pourrait être causé par des sulfates et/ou d'autres minéraux oxydés.

Une étude plus détaillée de la SIP appliquée aux haldes à stériles est présentée par Campbell et Horton (2001). Les auteurs présentent notamment l'influence de la nature des matériaux dans les mesures de la phase. Ainsi, une phase élevée dans la bande 10^{-2} – 10^{2} Hz indique la présence de minéraux sulfureux. Pour leur part, les échantillons contenant des sulfates (goethite, jarosite, etc.) présentent de très faibles valeurs de phase dans cette bande de fréquences. De plus, un échantillon de roche fraîche contenant des sulfures peut être différencié d'un échantillon montrant des traces d'oxydation. En effet, le spectre de phase de ce dernier montrera une diminution d'amplitude pour les fréquences élevées (10^{6} Hz) ainsi qu'une forte diminution pour les basses fréquences (10^{-3} –10^{-1} Hz). De plus, il est important de noter que la teneur en eau du matériau influence fortement les mesures SIP. Ainsi, les spectres de résistivité et de phase peuvent changer considérablement avec de légères variations du contenu en eau. Ceci peut résulter en de mauvaises interprétations des résultats en ce qui a trait à la nature de l'échantillon.

Smith et al. (2001) apportent un supplément aux travaux mentionnés ci-dessus en intégrant d'autres méthodes géophysiques avec la géochimie et l'hydrogéologie d'une des haldes étudiées au Colorado. Des mesures de PP et électromagnétiques permettent de cibler les zones où l'on retrouve une conductivité plus élevée. Ces zones sont associées à la présence de DMA et ont comme origine des « hotspots » situés entre 1,5 à 5 mètres sous la surface. Aussi, les données montrent que la conductivité est plus élevée près de la surface qu'en profondeur. Ceci indiquerait que

l'acidité des eaux diminue au fur et à mesure qu'elle migre dans les résidus. Cependant, les données géochimiques contredisent ces observations. En effet, ces dernières indiquent un pH élevé au pied de la halde. Il se peut donc que l'eau s'écoulant à cet endroit provienne d'une autre source. Cette hypothèse peut être vérifiée par les résultats de levés électromagnétiques aéroportés montrant une structure régionale linéaire (une zone de fissuration dans le roc selon ces auteurs) ayant une conductivité élevée dont l'axe passe au travers de la halde étudiée. Cette dernière pourrait être une zone favorable à la circulation de l'eau acide.

Une méthode qui reste à être utilisée sur les haldes à stériles est la tomographie de résistivité électrique et PP. Le succès de cette méthode en surface laisse croire au grand potentiel des mesures géoélectriques en forage. Bien qu'il n'existe pas de littérature appliquée directement aux haldes à stériles, la tomographie électrique a déjà été utilisée avec succès pour la caractérisation d'écoulements non-saturés. Schima et al. (1993) ont appliqué la méthode lors d'essais d'infiltration dans des sédiments hétérogènes composés de lentilles de sable et gravier interlitées par du silt et de l'argile. Les essais étaient suivis par quatre forages colinéaires d'une profondeur d'environ 6 mètres munis de 12 électrodes espacées de 0,5 m. La technique d'acquisition de ces mesures consiste à injecter du courant dans un des forages et de mesurer le potentiel dans un forage adjacent. Ceci permet d'obtenir des sections de résistivité et de chargeabilité entre chaque forage. Les résultats montrent une nette diminution de la résistivité et une hausse de la chargeabilité dans les sédiments après l'injection d'eau. On peut notamment délimiter le front de « mouillage » dans les sédiments.

Buettner et al. (1999) ont appliqué cette méthode pour faire le suivi d'un traceur (eau saline) injecté dans un roc fracturé non-saturé. Les résultats obtenus montrent bien les écoulements préférentiels du traceur dans le roc.

La tomographie électrique pourrait être utile pour le suivi du DMA dans les haldes à stériles. De plus, cette méthode permettrait entre autres de suivre des essais de traceurs et/ou d'infiltration.

Finalement, la méthode de la polarisation spontanée (SP) est une autre méthode géoélectrique qui pourrait s'appliquer sur les haldes à stériles miniers. Cependant, peu d'études ont été faites dans ce domaine. Bergström (1996) a utilisé la méthode avec succès pour caractériser les couches imperméables utilisées pour recouvrir les haldes en Suède. Cette méthode mérite tout de même la peine d'être étudiée puisqu'il a déjà été montré (Gloaguen, 2000) qu'elle permet de mesurer le déplacement de l'eau souterraine dans le cas d'un aquifère à nappe libre.

2.4.2 Le géoradar

Le géoradar est une méthode géophysique relativement récente par rapport aux autres méthodes conventionnelles. En effet, ce n'est que depuis les développements des dernières années dans le domaine de l'électronique et de l'acquisition numérique que l'utilisation du géoradar a commencé à prendre de l'ampleur dans plusieurs domaines. Par conséquent, contrairement aux méthodes électriques, le géoradar semble encore peu utilisé en environnement minier. La nature souvent conductrice des terrains miniers due à la minéralisation peut limiter l'applicabilité de cette méthode. Dans de telles conditions, le signal radar est fortement atténué lors de sa propagation dans le sol. Paterson (1995) montre qu'il est possible de délimiter un panache acide sur un site d'enfouissement. Ceci pourrait bien être appliqué aux résidus miniers. Cependant, puisque le lixiviat acide atténue le signal, il est impossible de voir la structure sous le panache. Par contre, la structure du matériau située au dessus du panache peut être définie avec une très bonne résolution.

Campbell et Fitterman (2000) et Campbell et al. (1999) font aussi mention de l'usage de géoradar afin d'étudier les problèmes de DMA. Cependant, leurs travaux se sont avérés non-concluants vu la nature hautement conductrice des résidus miniers dans l'ouest américain. Leur hypothèse stipule que des phénomènes d'évaporation au sein des stériles miniers auraient pour conséquence de concentrer des sels conducteurs à la surface des résidus.

Néanmoins, la méthode du géoradar mérite d'être envisagée pour des travaux sur les haldes à stériles miniers. En effet, Bergström (1996) a déjà utilisé la méthode avec succès dans le but de caractériser les couvertures étanches sur des haldes à stériles en Suède. De plus, le géoradar est couramment utilisé dans la caractérisation d'aquifères (e.g. Gloaguen 2000) et de massifs fracturés.

La tomographie radar peut également s'avérer utile pour faire le suivi des écoulements dans les sols. Bien que cette méthode n'ait pas encore été utilisée sur des rejets miniers, elle a été utilisée avec succès à plusieurs reprises pour des essais de traceur dans le roc fracturé (Wright et al. 1996; Lane et al. 1998; Wright et Lane 1998).

2.4.3 Autres méthodes

D'autres méthodes géophysiques ont fait l'objet d'études pour des applications sur des haldes à stériles en vue de l'évaluation du DMA. Les méthodes électromagnétiques (EM) ont fait l'objet de plusieurs études. Les propriétés mesurées par EM s'apparentent a celles mesurées par les méthodes électriques. Par conséquent, il est aussi possible de suivre l'évolution du panache d'eau acide au sein des haldes (Campbell et Fitterman, 2000). De plus, l'EM peut être utilisée en forages pour mesurer les variations de conductivité dans les rejets miniers (Painter et al., 2000).

Carlson et Zonge (1997) montrent que la magnétotellurique à source contrôlée peut s'utiliser pour caractériser l'interface entre les résidus et le sol et, du coup, voir s'il y a du lixiviat acide qui s'exfiltre dans la fondation. Un avantage de cette méthode est le fait qu'elle peut atteindre des profondeurs allant jusqu'à environ 650 mètres.

Les méthodes sismiques pourraient aussi être efficaces pour déterminer la structure des haldes à stériles. Cependant, ces dernières sont coûteuses et s'avèrent inefficaces pour identifier le DMA.

2.5 La résistivité électrique

2.5.1 Concepts théoriques

La méthode de résistivité électrique est couramment utilisée dans les domaines de l'exploration minérale, la géotechnique, l'hydrogéologie et, plus récemment, l'environnement. La méthode, qui est basée sur la loi d'Ohm, consiste à injecter un courant dans le sol afin de déterminer la résistivité apparente du sol à l'aide de mesures de potentiel prises en surface. Pour un milieu homogène et isotrope, le champ électrique, E [V/m], est relié à la densité de courant, j [A/m^2], selon l'équation suivante :

$$E = \rho j \tag{2.19}$$

où ρ est la résistivité du milieu exprimée en Ω·m. Cette dernière étant reliée à la conductivité du milieu, σ [mS/m], par la relation suivante :

$$\rho = 1/\sigma \tag{2.20}$$

Lorsque l'on injecte du courant, I, dans le sol à l'aide d'une électrode (demi-espace homogène), celle-ci agit comme une source ponctuelle et le courant se propage de façon radiale. Dans ce cas, le potentiel varie de façon inversement proportionnelle à la distance du point d'observation à la source de courant. Par conséquent, les surfaces équipotentielles prennent la forme de demi-sphères concentriques au point d'injection ayant leur surface perpendiculaire à la direction de propagation du courant. Dans ce cas, le potentiel, V, en tout point du milieu est :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \tag{2.21}$$

où r est la distance entre la source de courant et le point du milieu.

Dans la pratique, le courant est généralement injecté par deux électrodes de polarités opposées (C_1 et C_2) et l'on mesure la différence de potentiel à l'aide de deux autres électrodes (P_2 et P_2) selon un dispositif similaire à celui montré à la figure 2.5.

Dans ce cas, similairement au cas à une électrode (équation 2.21), la différence de potentiel mesurée peut être exprimée par la relation suivante :

$$\Delta V = [(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)] \tag{2.22}$$

ou encore :

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right] \tag{2.22a}$$

Où r_1, r_2, r_3 et r_4 sont définis à la figure 2.5.

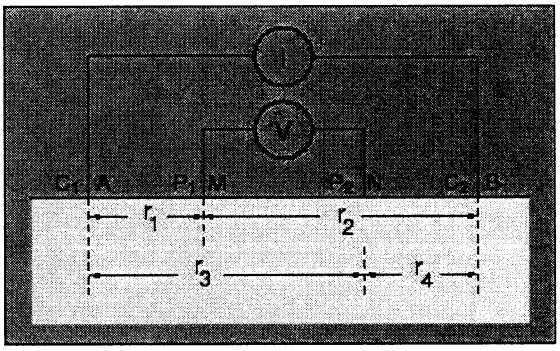


Figure 2.5 : Dispositif à quatre électrodes (Tirée de Chouteau, 2001)

Dans le cas d'un levé réel, la distribution de résistivité dans le sol n'est pas homogène et il en résulte que la différence de potentiel mesurée nous permet de déterminer la résistivité apparente du sol que l'on peut isoler de l'équation 2.22a :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \times \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right]} \tag{2.23}$$

Dans l'équation 2.23, le terme géométrique de droite est couramment remplacé par l'indice *k*, qui est un facteur géométrique dépendant de la configuration d'électrodes utilisée. De plus, d'après la loi d'Ohm, le terme $\Delta V/I$ n'est rien d'autre que la résistance, *R*. Dans ce cas, l'équation 2.23 peut être écrite sur une forme plus générale :

$$\rho_a = kR \tag{2.24}$$

Tel que mentionné plus haut, le facteur géométrique dépend de la configuration d'électrodes choisie. La figure 2.6 montre les différentes configurations couramment utilisées pour les levés électriques avec le facteur géométrique qui y est associé.

Le choix d'une ou l'autre de ces configurations dépend principalement des objectifs des travaux. Reynolds (1997) compare les principales configurations selon plusieurs critères sous forme d'un tableau :

Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques de différentes configurations d'électrodes (modifié de Reynolds 1997)

Critère	Configuration Wenner	Configuration Schlumberger	Configuration Dipôle-Dipôle	Configuration Dipôle-Dipôle équatorial
Résolution verticale	Bonne	Moyenne	Faible	Moyenne
Pénétration	Faible	Moyenne	Bonne	Moyenne
Sensibilité à l'orientation	Oui	Oui	Modérée	Non
Sensibilité aux hétérogénéités latérales	Forte	Modérée	Modérée	Faible
Disponibilité d'outils d'interprétation	Bonne	Bonne	Moyenne	Faible

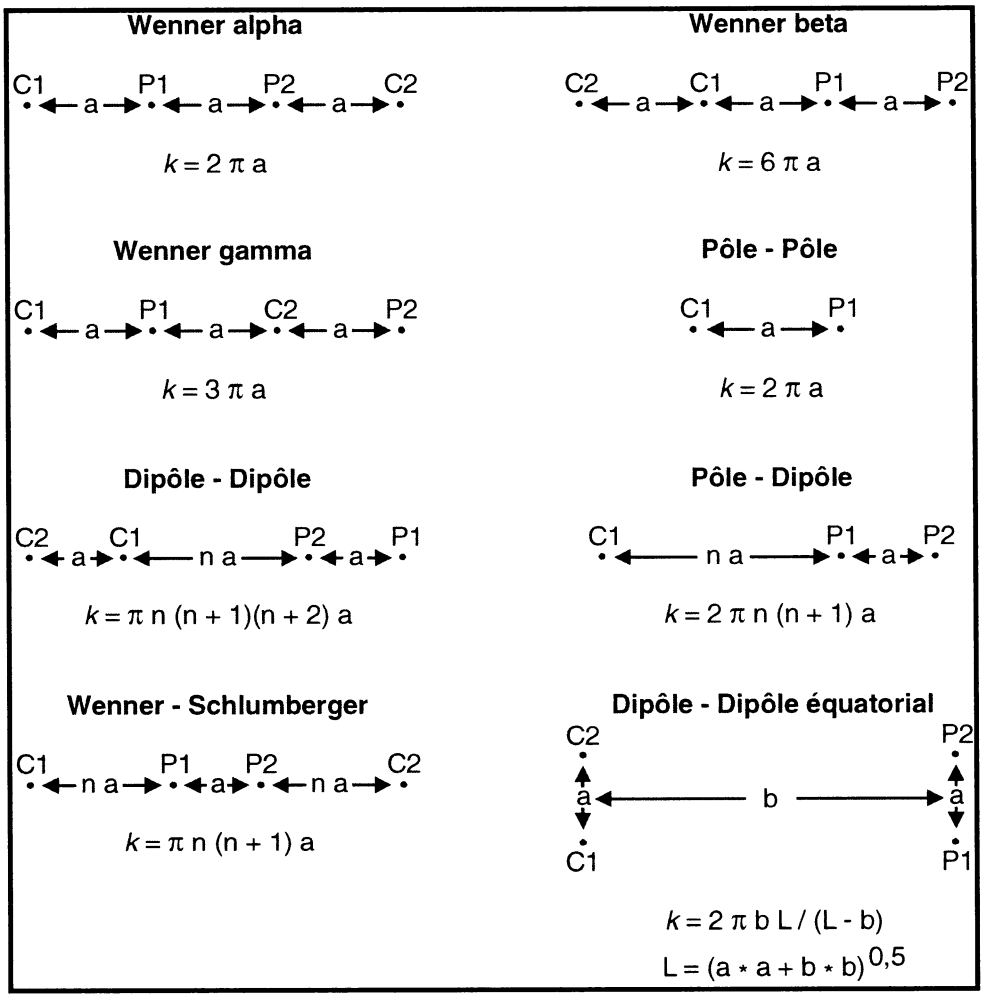


Figure 2.6 : Configurations d'électrodes couramment utilisées (Modifiée de Locke 2002); *k* = facteur géométrique

2.5.2 Modes de déploiement

Afin d'obtenir une image de la distribution de résistivité électrique dans le sol, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures à l'aide des configurations mentionnées plus haut. Une technique utilisée afin de sonder le sol à différentes profondeurs est l'augmentation de l'espacement entre les électrodes (Reynolds, 1997). La figure 2.7 montre le déroulement d'un tel levé pour la configuration Wenner.

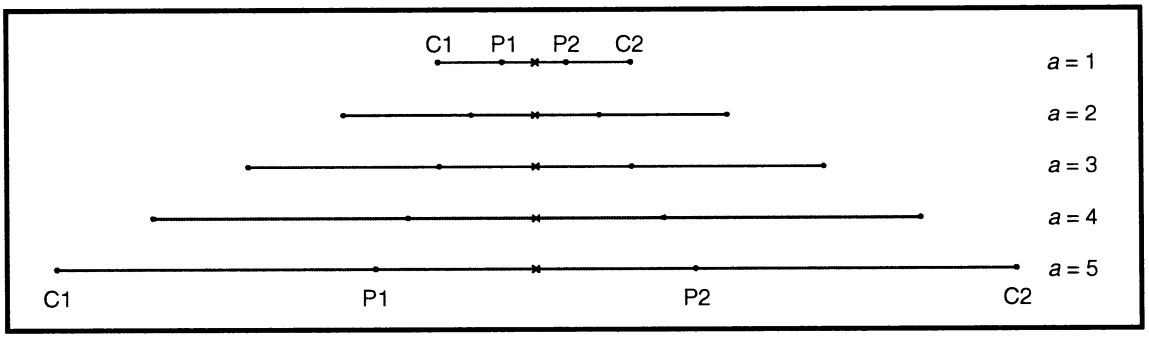


Figure 2.7 : Déploiement d'électrodes; configuration Wenner (d'après Reynolds, 1997)

Suite à la réalisation du levé, les valeurs de résistivité apparentes mesurées sont présentées sous forme de graphiques de résistivité en fonction de la demi-distance entre les électrodes situées aux extrémités, normalement identifiée par *AB*/2. Ces graphiques, dont on peut voir un exemple à la figure 2.8, sont par la suite interprétés à l'aide d'algorithmes d'inversion ou à l'aide d'abaques lorsqu'on ne dispose pas d'un ordinateur. Ces deux méthodes permettent d'obtenir un modèle de la valeur de résistivité électrique en fonction de la profondeur.

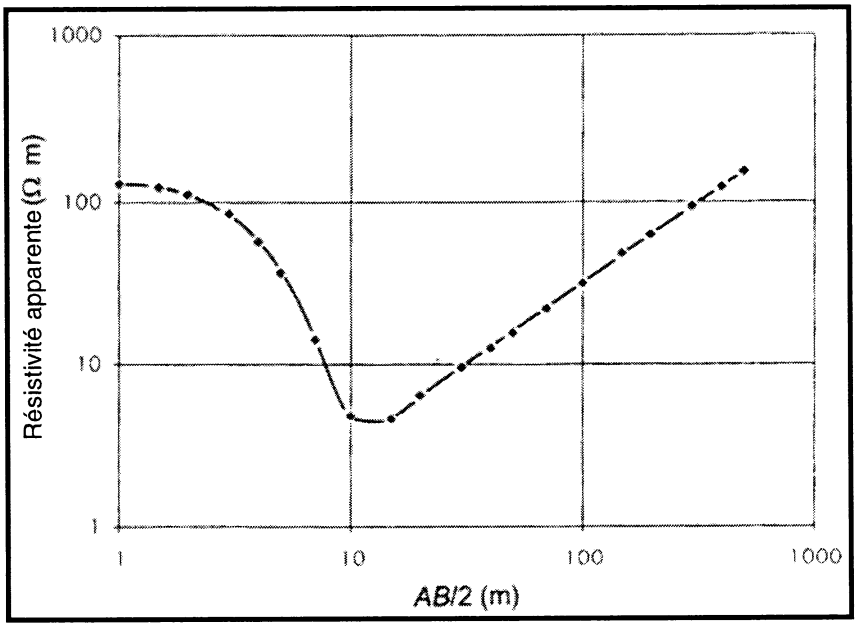


Figure 2.8 : Graphique typique obtenu lors d'un sondage géoélectrique (Reynolds, 1997)

Lorsqu'on dispose d'un appareil muni d'une console multi-électrodes, le déploiement expliqué précédemment peut être utilisé afin d'effectuer des profils de résistivité apparente appelés pseudo-sections. La disposition de plusieurs électrodes permet de sonder le sol avec plusieurs écartements à l'aide de protocoles d'acquisition programmés sur l'ordinateur de l'appareil (figure 2.9). Les pseudo-sections de résistivité apparente peuvent par la suite être interprétées à l'aide d'algorithmes d'inversion afin d'obtenir un modèle de résistivité pour tout le profil.

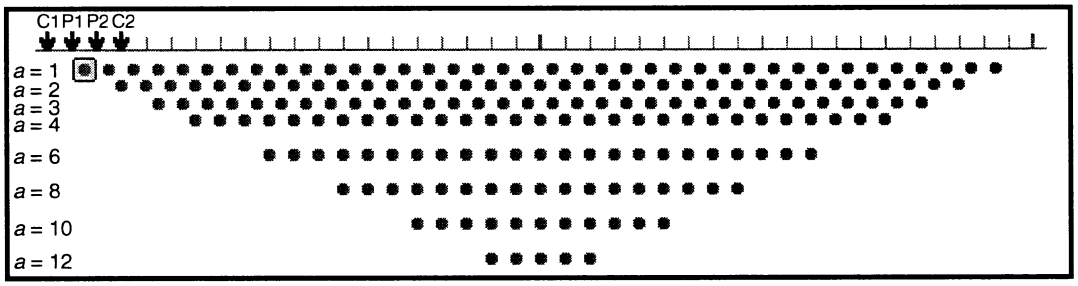


Figure 2.9 : Protocole d'acquisition multi-électrodes du Lund Imaging System de ABEM; configuration Wenner

2.5.3 Propriétés électriques des matériaux géologiques

La résistivité électrique des matériaux géologiques peut varier de plusieurs ordres de grandeur. En effet, la minéralogie, la porosité, la teneur en eau, ainsi que l'âge sont tous des facteurs qui ont une influence sur la résistivité du matériau (Reynolds, 1997). C'est pourquoi il est impossible d'attribuer a priori une résistivité à un sol ou à un type de roche. Il est plus fréquent de présenter la résistivité d'un matériau selon les plages de valeurs rencontrées dans la littérature. Le tableau 2.5 présente la résistivité électrique de plusieurs matériaux géologiques. La résistivité des matériaux composant une halde à stériles dépend de la composition minéralogique des stériles. Généralement, dans les stériles où il y a génération de DMA, on retrouvera une combinaison de sulfures, d'oxydes de fer et d'autres minéraux composant la roche stérile.

Tableau 2.5 : Résistivités électriques de matériaux géologiques communs (d'après Custis 1994a et Reynolds 1997)

Matériau	Résistivité (Ωm)	Matériau	Résistivité (Ωm)
Sulfures		*Roches*	
Chalcopyrite	$1,2 \times 10^{-5}$ - 3×10^{-1}	Quartzite	3×10^{2} - 10^{6}
Pyrite	$2,9 \times 10^{-5}$ - 1,5	Granite	3×10^{2} - 3×10^{6}
Pyrrhotite	$7,5 \times 10^{-6}$ - 5×10^{-2}	Granite altéré	3×10^{0} - 5×10^{2}
Galène	3×10^{-5} - 3×10^{2}	Syénite	10^{2} - 10^{6}
Sphalérite	$2,7 \times 10^{-3}$ - $1,5 \times 10^{7}$	Diorite	10^{4} - 10^{5}
Bornite	$1,6 \times 10^{-6}$ - 6×10^{-3}	Gabbro	10^{3} - 10^{6}
Arsénopyrite	2×10^{-5} - $1,5 \times 10^{1}$	Basalte	10^{0} - $1,3 \times 10^{7}$
Chalcosite	8×10^{-5} - 1×10^{-4}	Schiste	20 - 10^{4}
		Schiste graphitique	10 - 10^{2}
Oxydes		Ardoise	6×10^{2} - 4×10^{7}
Hématite	$3,5 \times 10^{-3}$ - 10^{7}	Marbre	10^{2} - $2,5 \times 10^{7}$
Limonite	10^{3} - 10^{7}	Conglomérat	2×10^{3} - 10^{4}
Magnétite	5×10^{-5} - $5,7 \times 10^{3}$	Grès	1 - $7,4 \times 10^{8}$
Ilménite	10^{-3} - 5×10^{0}	Calcaire	5×10^{0} - 10^{7}
		Dolomite	$3,5 \times 10^{2}$ - 5×10^{3}
Sols		Argile	1 - 10^{2}
Mort terrain	250 - 1700		
Gravier sec	1400	*Eaux*	
Gravier saturé	100	Eaux de tourbière	100
Sables récents	50 - 100	Drainage minier acide	20
Sable argileux	30 - 215	Eau de pluie	20 - 100
Sable et gravier	30 - 225	Lixiviat de site d'enfouissement	<10 - 50

2.5.4 Interprétation par inversion numérique

Bien que les pseudo-sections de résistivité apparente puissent montrer les tendances générales de la distribution de la résistivité électrique dans le sol, ces profils ne donnent pas des informations précises. Parfois il est essentiel de savoir à quelle profondeur se trouve une interface ou un objet conducteur et puisque les pseudo-sections représentent la résistivité apparente en fonction de l'écartement entre les électrodes, il est impossible d'attribuer une profondeur à l'interface montrée sur la pseudo-section. En réalité, l'image obtenue sur une pseudo-section est dépendante de la configuration d'électrodes et de la résistivité électrique du terrain (Locke 2002).

L'inversion numérique peut-être appliquée aux mesures de résistivité apparente afin d'obtenir une représentation de la résistivité électrique réelle du terrain. L'inversion numérique consiste à trouver, selon une méthode itérative, un modèle synthétique de résistivité électrique dont la réponse réplique les mesures effectuées sur le terrain. Dans ce cas, chaque itération minimise l'erreur entre les valeurs générées par le modèle et les mesures acquises sur le terrain. Le lien mathématique entre les paramètres du modèle et la réponse obtenue repose sur des méthodes numériques de différences finies ou d'éléments finis (Locke 2002). Le développement présenté ici s'applique aux profils 2D. Un raisonnement similaire peut être développé pour des modèles 3D.

Une série de m données observées, y_i (i=1, m) peut être présentée sous la forme d'un vecteur colonne y :

$$\mathrm{y} = \mathrm{col}(y_1, y_2, \ldots, y_m) \tag{2.25}$$

De même, la réponse du modèle peut être présentée sous la même forme :

$$\mathrm{f} = \mathrm{col}(f_1, f_2, \ldots f_m) \tag{2.26}$$

Dans le cas de problèmes de résistivité électrique, il est courant d'utiliser les logarithmes des données observées et de la réponse du modèle. De même, les logarithmes des valeurs du modèle représentent les paramètres du modèle et peuvent être aussi présentés sous la forme d'un vecteur colonne q :

$$\mathrm{q} = \mathrm{col}(q_1, q_2, \ldots, q_n) \tag{2.27}$$

où n représente le nombre de paramètres dans le modèle. De plus, la différence entre les valeurs observées et la réponse du modèle peut être exprimée sous la forme d'un vecteur de divergence g :

$$\mathrm{g} = \mathrm{y} - \mathrm{f} \tag{2.28}$$

Dans le cas d'une optimisation de la solution par la méthode des moindres carrés, le modèle initial est modifié dans le but de minimiser l'erreur de la somme des carrés E de la différence entre la réponse du modèle et les valeurs observées :

$$E = \mathrm{g}^{\mathrm{T}}\mathrm{g} = \sum_{i=1}^{n} g_i^2 \tag{2.29}$$

L'équation générale suivante est utilisée afin de déterminer la variation dans les paramètres du modèle qui permettra de réduire cette erreur :

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \tag{2.30}$$

où Δq est le vecteur de variation des paramètres du modèle, J est la matrice Jacobienne (de taille *m* par *n*) des dérivées partielles suivantes (J^T étant cette même matrice transposée) :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \tag{2.31}$$

qui représente le changement du *i*ème élément de la réponse du modèle dû à la variation du *j*ème paramètre du modèle. Ainsi, un nouveau modèle est obtenu :

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \tag{2.32}$$

Afin d'éviter la possibilité de matrices J singulières menant à des valeurs non réalistes de résistivité électrique, l'équation 2.30 est modifiée par l'introduction de deux termes :

$$(J^T J + \lambda I)\Delta q_k = J^T g \tag{2.33}$$

où I est la matrice identité et λ est le facteur d'amortissement de Marquardt.

Cette modification est efficace pour l'inversion de données de résistivité lorsque le modèle comporte un nombre limité de couches. Locke (2002) présente des résultats obtenus avec cette méthode pour un modèle à trois couches. Dans le cas de modèles plus complexes, des modifications supplémentaires doivent être apportées afin d'obtenir une convergence satisfaisante :

$$(J^T J + \lambda F)\Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \tag{2.34}$$

où $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z$ et C_x, C_y et C_z correspondent à des matrices de lissage dans les directions respectives. α_x, α_y et α_z, sont des poids attribués aux filtres de lissage dans les mêmes directions. Une forme courante pour la matrice C est la matrice de différence de premier ordre suivante :

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & .. & .. & .. & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & .. & .. & .. & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & .. & .. & 0 \\ & & & .. & & & & \\ & & & & .. & & & \\ & & & & & .. & & \\ & & & & & & .. & \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Cette méthode d'optimisation s'applique à des sols où les variations de la résistivité électrique se font de façon graduelle puisque l'équation 2.34 tend à lisser les changements de résistivité au sein du modèle. Dans les situations où les variations de résistivité sont abruptes, telles qu'un changement de faciès rocheux franc ou la présence d'un bloc de matériau de résistivité différente, l'équation d'optimisation peut être de nouveau modifiée pour obtenir des résultats réalistes. Une approche consiste à introduire une manière de faire varier les poids de façon itérative :

$$(J^T J + \lambda F_R)\Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (2.36)$$

où $F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z$; R_d et R_m sont des matrices de pondération.

Enfin, l'expression 2.36 peut être modifiée davantage afin de tenir compte d'autres facteurs pouvant affecter l'inversion numérique.

2.6 Le géoradar

2.6.1 Généralités

Bien que le géoradar soit à la base une méthode électromagnétique, son fonctionnement diffère des méthodes EM fréquentielles et transitoires conventionnelles. Un système radar est constitué de deux antennes, soit une source émettrice (T_x) et une réceptrice (R_x). Cette dernière capte les ondes réfléchies sur des interfaces ou sur des artéfacts présents dans le sol. De plus, le récepteur est souvent muni d'une unité de traitement qui permet d'enregistrer les données. La figure suivante montre une image simplifiée d'un système georadar.

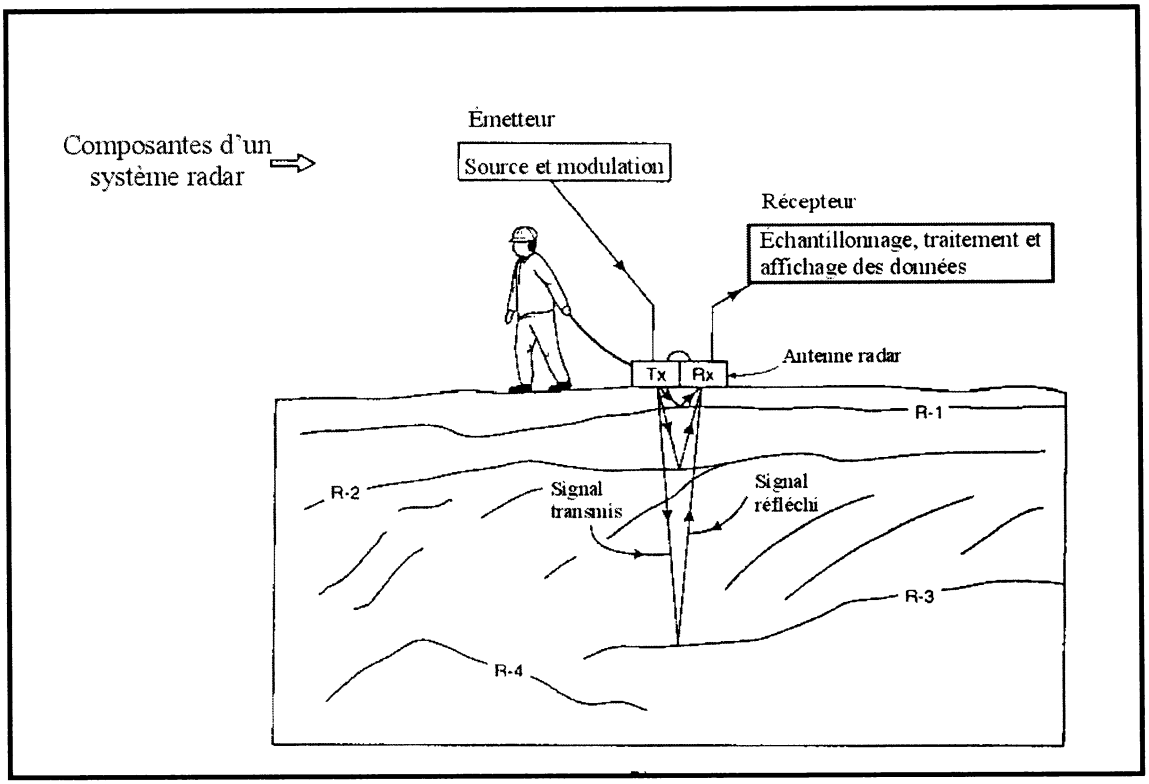


Figure 2.10: Système géoradar de base (d'après Reynolds, 1997)

Contrairement à ce qui est indiqué dans son nom, ce type de système utilise des ondes électromagnétiques dans la bande radio de l'ordre de 10^1 à 10^3 MHz. Ces ondes sont émises sous formes d'impulsions de l'ordre de 50 000 fois par seconde. Par ailleurs, le récepteur capte les ondes réfléchies à l'aide d'un nombre de balayages fixé dans le temps. Généralement, ce dernier est de l'ordre de 32 balayages par seconde, mais il peut varier dépendant du système utilisé. Les résultats sont affichés sous forme de « radargrammes » qui sont semblables aux sismogrammes (sections sismiques). En effet, un affichage radar est constitué de deux axes, soit la distance et le temps, et de traces représentant la variation de l'amplitude de l'onde avec le temps à chaque position.

2.6.2 Propagation des ondes radio

Les propriétés électromagnétiques des matériaux sont reliées à leur composition et à leur teneur en eau. Ces deux propriétés contrôlent la vitesse de propagation des ondes

et l'atténuation de ces dernières. La vitesse de propagation des ondes radio dans un milieu dépend de la vitesse de la lumière dans le vide (c = 0,3 m/ns), de la constante diélectrique (ε_r) dans ce dernier et de la perméabilité magnétique relative (μ_r = 1 pour les milieux non-magnétiques). L'efficacité du géoradar est reliée à la différence des constantes diélectriques entre les matériaux, car plus le contraste est grand, plus les ondes radio vont être réfléchies au lieu d'être absorbées. La vitesse des ondes radio dans un milieu est définie par l'équation suivante (Reynolds, 1997):

$$V_m = c \Big/ \left\{ (\varepsilon_r \mu_r / 2) \left(\left[1 + P^2 \right] + 1 \right) \right\}^{1/2} \tag{2.37}$$

où P est un facteur « de perte » relié à la conductivité et à la constante diélectrique du matériau, à la permittivité du vide et à la fréquence du système ($P = \sigma / 2\pi f \varepsilon_r \varepsilon_0$). Dans les matériaux à « faible perte », la valeur P est près de 0 et la vitesse des ondes radio peut être simplifiée à $V_m = c/\sqrt{\varepsilon_r}$ ou $V_m = 0{,}3/\sqrt{\varepsilon_r}$ (en m/ns).

De plus, on peut définir un coefficient de réflexion (R) entre deux milieux pour une onde à incidence normale (Reynolds, 1997):

$$R = \frac{(V_2 - V_1)}{(V_2 + V_1)} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_2}}} \tag{2.38}$$

Où V_1 et V_2 sont les vitesses de propagation dans le 1er et 2ème milieu respectivement, et ε_1 et ε_2 sont les constantes diélectriques relatives du 1er et 2ème milieu respectivement. On utilise aussi le carré de cette valeur (*power reflection coefficient*) R^2. Le coefficient de réflexion indique la proportion d'énergie réfléchie à l'interface et est toujours compris entre -1 et 1. La proportion d'énergie qui est transmise est donc égale à (1 - R).

Plusieurs facteurs participent à l'atténuation du signal des ondes radio. Tout d'abord, il y a perte d'énergie aux interfaces où il y a réflexion/transmission. De plus, lorsque des

objets ont une taille du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal, ces derniers causent une diffusion de l'énergie. Ceci est connu sous le nom de diffusion de Mie (Reynolds, 1997). Il y a également perte d'énergie du signal par l'atténuation. Cette dernière est une fonction complexe des propriétés diélectriques et électriques du milieu dans lequel les ondes se propagent. Un coefficient d'atténuation (α) est défini par l'équation suivante (Reynolds, 1997) :

$$\alpha = \omega\left\{\left(\frac{\mu\varepsilon}{2}\right)\left[\left(1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}\right)^{1/2}-1\right]\right\}^{1/2} \tag{2.39}$$

Où $\omega = 2\pi f$, μ est la perméabilité magnétique ($4\pi x10^{-7}$ H/m), σ est la conductivité électrique à une fréquence donnée (S/m) et ε est la permittivité électrique où $\varepsilon = \varepsilon_r$ x 8,85 x 10^{-12} F/m et ε_r est la constante diélectrique relative. Cette formule est valide pour les milieux non magnétiques.

La divergence géométrique fait en sorte que l'atténuation du signal du géoradar est inversement proportionnel au rayon du front d'onde. Le rapport de l'amplitude du champ électrique initial par rapport à celle du champ à une distance *x* est défini selon l'équation (Reynolds, 1997) :

$$E_0 / E_x = \frac{1}{r}\exp(-\alpha x) \tag{2.40}$$

Tout comme pour les autres ondes électromagnétiques, la pénétration des ondes radio est caractérisée par une profondeur de pénétration (δ) qui est inversement proportionnelle au coefficient d'atténuation (i.e. $\delta = 1/\alpha$). Numériquement, δ peut être approximée par (Reynolds, 1997) :

$$\delta = \left(5{,}31\sqrt{\varepsilon_r}\right)/\sigma \tag{2.41}$$

Où σ est en mS/m.

Cette approximation est valide seulement si le facteur « de perte », défini à l'équation 2.37, est beaucoup plus petit que 1.

À noter que la profondeur δ ne correspond pas à la profondeur de détection de l'appareil. En effet, il faut tenir compte de tous les facteurs instrumentaux. La performance du système (Q), exprimée en décibels (dB), est fonction de plusieurs facteurs dont l'efficacité des antennes de transmission et de réception, des gains appliqués à ces dernières, de la vitesse du milieu, du coefficient d'atténuation, de la fréquence du signal, du coefficient de réflexion au carré (R^2) et finalement de divers facteurs géométriques associés à la source et à la cible. La performance peut aussi être exprimée par l'équation suivante (Reynolds, 1997):

$$Q = 10\log(P_{\min}/P_s) \tag{2.42}$$

Où $P_{\min}$ est la puissance minimale de signal qui peut être détectée et P_s est la puissance de la source.

2.6.3 Profilage et résolution spatiale

Un profil radar peut être effectué avec une antenne émettrice et une antenne réceptrice de séparation constante. Il y a également le système où une source est fixe et un récepteur se déplace sur l'axe du profil (Wide-angle reflection and refraction; WARR). De plus, les mesures peuvent être prises selon la méthode du point milieu commun (CMP) comme en sismique. Les résultats sont affichés selon deux axes, soit le temps en ordonnée (croissant vers le bas) et la distance en abscisse.

La résolution verticale d'un système radar est fonction de la fréquence (f) du signal et de la vitesse de propagation du milieu. Ainsi, la résolution *théorique* d'un appareil est approximativement égale à ¼ de la longueur d'onde (h) des radiations incidentes; $h = V/f$, où V est la vitesse de propagation. Par exemple, dans un sol où la vitesse est de 0,06 m/ns et avec une antenne de 100 MHz, la longueur d'onde est de 0,6 m. Donc la

résolution est de ¼ x 0,6 = 0,15 mètres. Ainsi, deux réflecteurs situés très près l'un de l'autre (< 15 cm) ne pourront être distingués par cet appareil.

La résolution horizontale, ou résolution spatiale, est inversement proportionnelle à la racine carrée du coefficient d'atténuation α. De plus, la résolution spatiale est liée au rayon (r) de la première zone de Fresnel, soit (Reynolds, 1997):

$$r = (z\lambda/4)^{1/2} \tag{2.43}$$

où z est la profondeur en mètres et λ la longueur d'onde en mètres. Ces paramètres sont schématisés à la figure 2.11. L'équation 2.43 montre que la résolution spatiale est liée aux propriétés diélectriques du matériau, car $\lambda = v/f \approx c/\sqrt{\varepsilon_r}\, f$. Par conséquent, plus ε_r est grand, plus le faisceau le rayonnement est étroit et meilleure est la résolution spatiale. Ceci est schématisé à la figure 2.12 qui compare de façon schématique une haute résolution spatiale par rapport à une faible résolution spatiale.

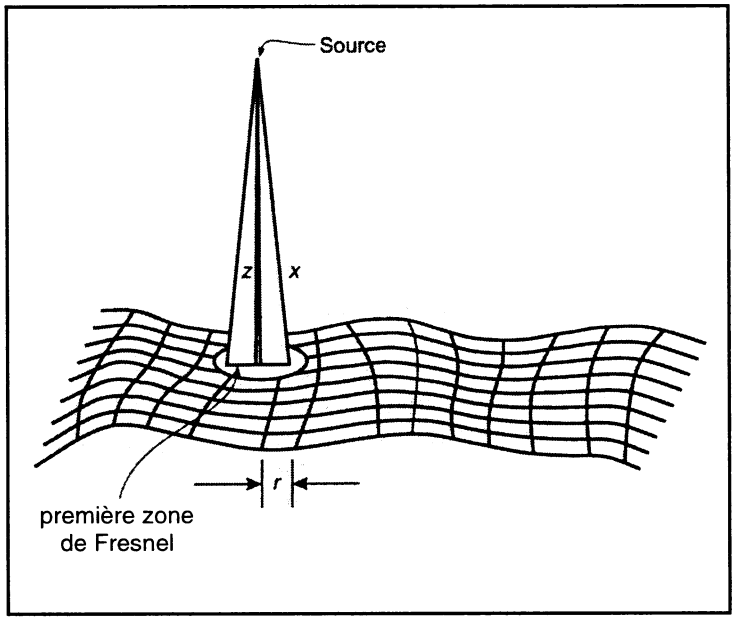


Figure 2.11 : Schématisation de la résolution spatiale en fonction de la première zone de Fresnel (d'après Reynolds, 1997)

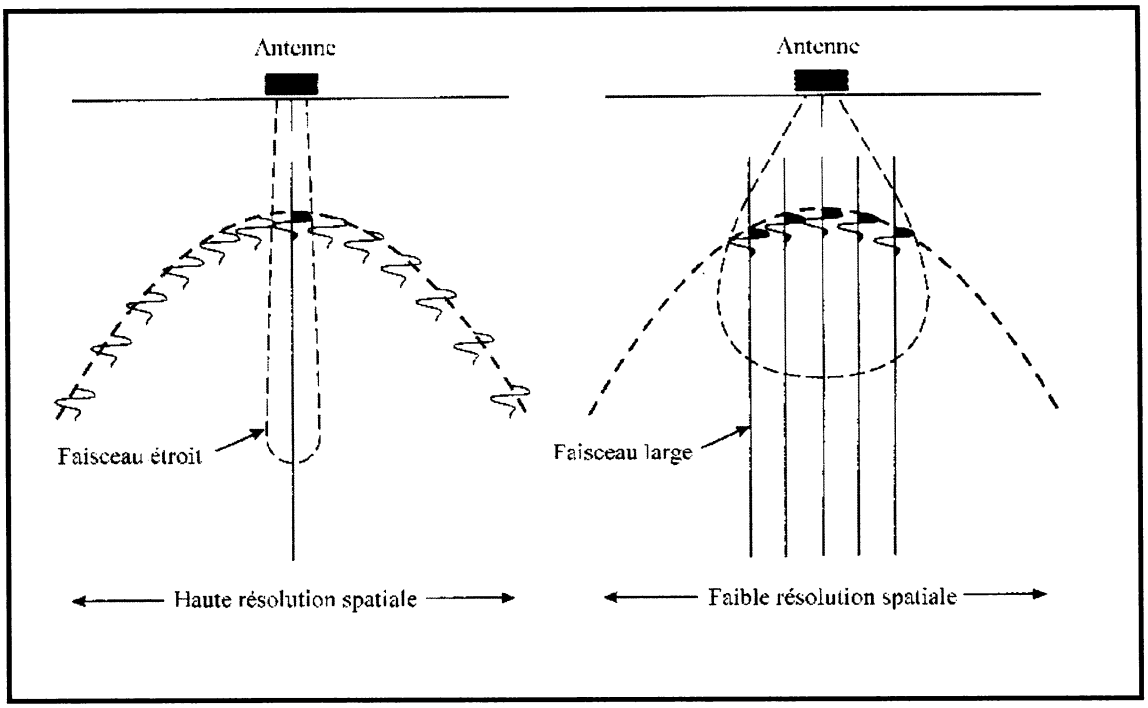


Figure 2.12 : Diagramme schématisé montrant la résolution horizontale due à la largeur du faisceau des radiations (d'après Reynolds, 1997)

2.6.4 Propriétés diélectriques des matériaux géologiques

Tel que mentionné dans la section 2.6.2, la vitesse de propagation et l'atténuation du signal du géoradar sont fonctions de la constante diélectrique des matériaux sondés. La majeure partie des matériaux naturels ont une constante diélectrique (ε_r) qui varie entre 1 et 81. Le tableau 2.6 présente cette constante et la vitesse de propagation dans plusieurs matériaux (Reynolds, 1997). Les valeurs présentées dans ce tableau sont approximatives et pourraient être différentes dans un cas donné. En effet, la constante diélectrique est très sensible à quantité d'eau présente dans le matériau, qu'elle soit libre ou liée à la structure atomique. Par conséquent, une faible variation dans la teneur en eau pourrait affecter les propriétés diélectriques d'un matériau donné. De manière générale, une augmentation de la teneur en eau aura comme effet d'augmenter la constante diélectrique d'un matériau (Reynolds, 1997).

Tableau 2.6 : Constantes diélectriques et vitesses de propagation des ondes radio à travers certains matériaux géologiques (d'après Reynolds, 1997)

Matériau	Constante diélectrique ε_r	Vitesse de propagation V (m/µs)
Air	1	300
Eau	81	33
Neige	1,4 - 3	194 - 252
Glace	2,5 - 8	78 - 168
Permafrost	1 - 8	106 - 300
Sable côtier (sec)	10	95
Sable sec	3 - 6	120 - 170
Sable humide	25 - 30	55 - 60
Silt humide	10	95
Argile humide	8 - 15	86 - 110
Sol argileux sec	3	173
Tourbe	12	86
Mort terrain (moyenne)	16	75
Granite	5 - 8	106 - 120
Calcaire	7 - 9	100 - 113
Dolomite	6,8 - 8	106 - 115
Basalt humide	8	106
Shale humide	7	113
Grès humide	6	112
Charbon	4 - 5	134 - 150
Quartz	4,3	145

La nature géologique d'un matériau aura aussi une influence sur la profondeur d'investigation du système radar. D'une manière générale, les matériaux conducteurs, tels que l'argile, auront tendance à atténuer le signal davantage et par conséquent, réduire la pénétration. De plus, la fréquence utilisée aura aussi un effet sur la pénétration du signal. La figure 2.13 présente la pénétration en fonction de la fréquence pour certains matériaux.

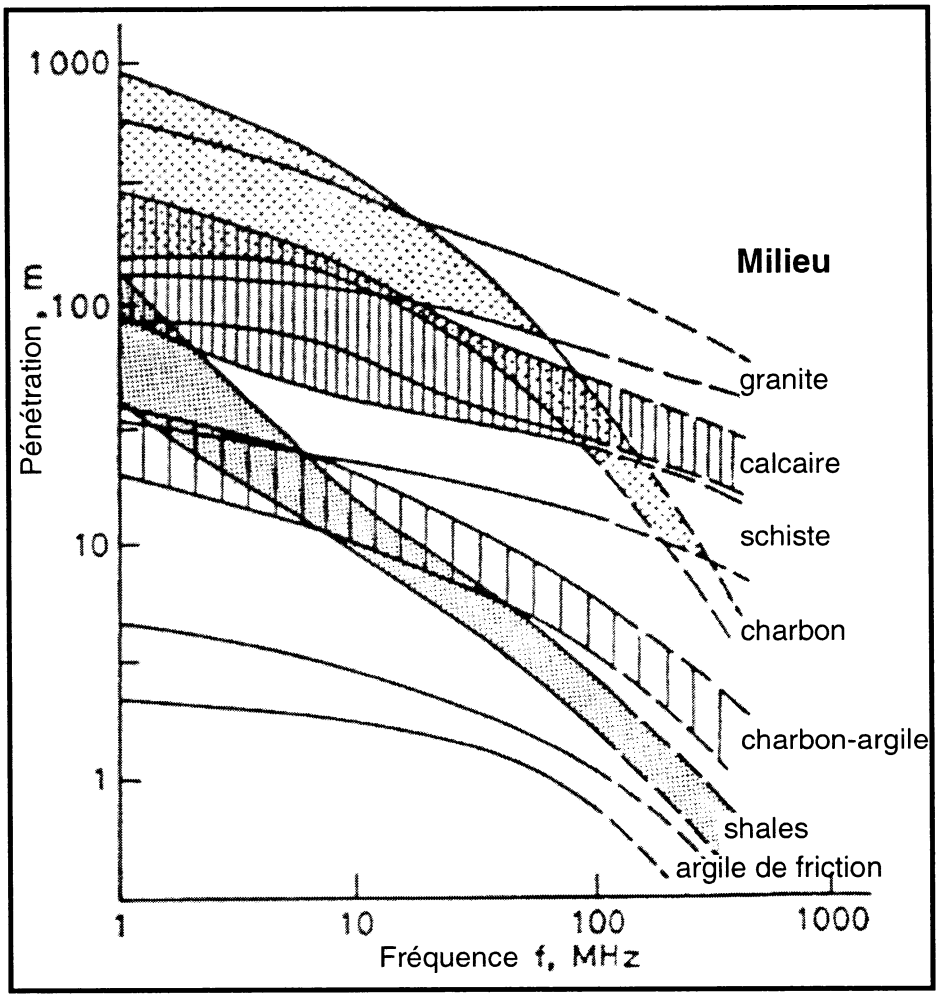


Figure 2.13 : Pénétration du signal radar en fonction de la fréquence pour certains matériaux (adapté de Cook, 1975)

Un autre facteur affectant les propriétés diélectriques d'un matériau est la porosité de ce dernier. En effet, il est possible d'exprimer la constante diélectrique (ε_r) en fonction de la porosité (ϕ) selon la relation suivante (Reynolds, 1997) :

$$\varepsilon_r = (1-\phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w \tag{2.44}$$

où ε_m et ε_w sont les constantes diélectriques de la matrice rocheuse et du fluide interstitiel respectivement. L'équation 2.44 est valide dans le cas où le front d'onde est parallèle à la lithologie.

La grande influence qu'ont les propriétés diélectriques des matériaux sur la propagation du signal radar fait en sorte que cette méthode peut être utile afin de caractériser des matériaux tels que les stériles miniers. Par contre, les nombreuses causes d'atténuation du signal peuvent entrer en jeu dans une caractérisation de tels matériaux. Des essais sur le terrain sont essentiels afin de valider l'utilité de la méthode sur ce type de matériaux.

Chapitre 3 - Description du site d'étude

3.1 Généralités

La mine Laronde, anciennement nommée mine Dumagami, est située près de la municipalité de Cadillac à environ 50 kilomètres à l'est de la ville de Rouyn-Noranda (Fig 3.1). Cette propriété des Mines Agnico-Eagle Ltée est le plus gros gisement aurifère en production au Canada avec des réserves et ressources de 8,5 Moz d'or. De plus, le gisement produit d'importantes quantités d'argent, de cuivre et de zinc (Dubé et Moorhead, 2002).

Le gisement de Laronde fait partie du district minier Doyon-Bousquet-Laronde qui est situé sur le couloir de la faille Cadillac et dont font aussi partie les gisements Mouska, Doyon et Bousquet, ainsi que d'autres indices de moindre importance (Lafrance et al. 2002). Le gisement principal de la mine Laronde est un sulfure massif d'âge archéen formé lors du volcanisme à l'origine de la formation géologique de Bousquet, cette dernière faisant partie du groupe de Blake River (Dubé et al. 2002).

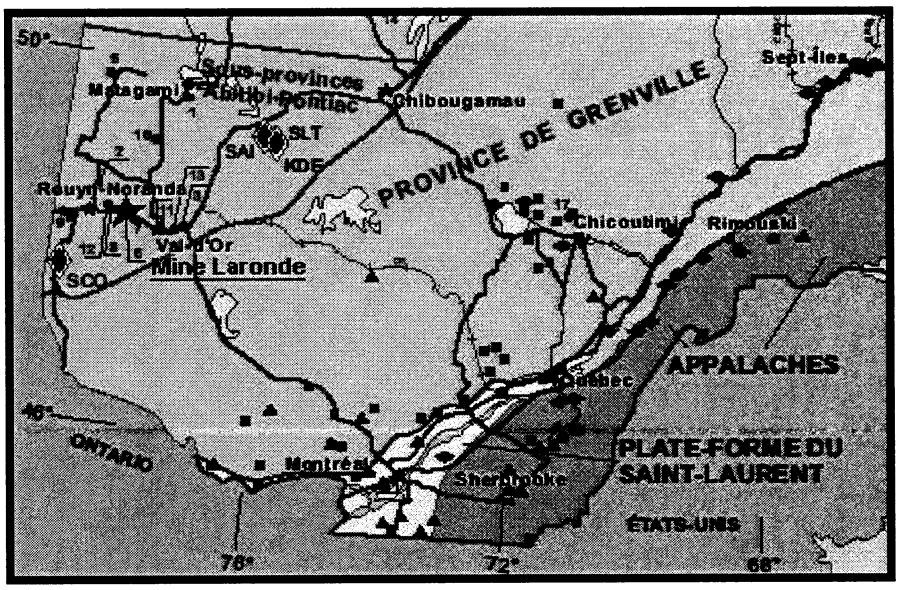


Figure 3.1 : Localisation de la mine Laronde (source : Ministère des Ressources Naturelles du Québec)

3.2 Halde à stériles

3.2.1 Géologie et minéralogie de la halde à stériles

Les roches formant la halde à stériles étudiée proviennent principalement d'une ancienne exploitation à ciel ouvert, nommée la zone 4, sur le site de la mine Laronde. Contrairement au minerai principal de la mine qui est de type sulfure massif, le minerai de la zone 4 consiste en une zone aurifère à sulfures dissiminés. Cette dernière se présente sous la forme d'une bande étroite (moins de 10 mètres) de sulfures siliceux qui se trouve dans un schiste à séricite. La minéralisation de cette zone est constituée de 5-7% de pyrite, de sphalérite et un peu de chalchopyrite-bornite. La roche encaissante consiste en un tuf à lapilli felsique et un tuf felsique œillé de cristaux de quartz. La figure 3.2 montre une photo de la halde à stériles de la mine Laronde.



Figure 3.2 : Halde à stériles à la mine Laronde

3.2.2 Géochimie des stériles

Les roches stériles contenues dans la halde sont riches en silice (entre 65 et 75%), avec un contenu moyen en pyrite inférieur à 5%. Le tableau 3.1 montre les résultats d'analyses géochimiques effectuées sur un forage avant la mise en exploitation de la zone 4.

Un test de génération d'acide a été effectué sur les roches de la zone 4 avant la mise en exploitation de la fosse. Le type de test n'est pas spécifié par le document fourni par la mine Laronde. Les résultats de ce test sont présentés au tableau 3.2. Ils permettent d'identifier deux matériaux potentiellement générateurs d'acide, soit le tuf felsique et le minerai. Les prévisions faites avant la construction de la halde à stériles minimisaient la problématique de ces résultats (source : document interne, Mines Agnico-Eagle Ltée.):

> *« Un seul type de stériles (tuf felsique) est légèrement producteur théorique d'acide. Cependant, sa faible teneur en soufre (1,58%) rend peu probable qu'il soit un producteur réel d'acide.*
> *Les résultats de ce test indiquent qu'il est possible et même avantageux d'utiliser les stériles pour le remblai souterrain et pour construire les digues du parc à résidus. »*

Tableau 3.1 : Composition des stériles et du minerai de la zone 4 (source : document interne, Mines Agnico-Eagle Ltée.)

Profondeur:		39-42m	42-52m	52-55m	55-63m	63-69m	69-72m	72-75m
Type		Stérile	Stérile	Stérile	Minerai	Minerai	Stérile	Stérile
SiO_2	%	74,8	69,5	65	57,2	67,9	66,0	65,2
Al_2O_3	%	13,16	13,4	16,36	4,04	5,23	11,67	15,5
FeO	%	2,18	5,25	6,58	21,14	14,74	2,53	4,9
MgO	%	1,30	1,08	0,28	0,02	0,02	0,78	0,7
CaO	%	1,75	1,39	0,11	0,07	0,09	1,03	0,5
Na_2O	%	0,83	0,85	0,89	0,47	0,68	5,05	0,5
K_2O	%	1,94	2,27	3,44	0,16	0,23	0,96	3,6
TiO_2	%	0,50	0,59	1,25	0,51	0,40	0,80	0,8
P_2O_5	%	0,25	0,21	0,21	0,01	0,04	0,19	0,4
MnO	%	0,07	0,13	0,01	0,01	0,01	0,04	0,0
Co_2	%	1,01	1,01	0,39	0,48	0,67	0,64	0,4
SiO_2	%	0,24	2,05	2,25	21,66	13,05	2,98	2,0
H_2O^-	%	1,30	2,01	3,04	0,01	0,01	2,78	2,2
L.O.I.	%	2,50	5,07	5,68	15,39	10,22	6,40	4,7
Cu	ppm	4	12	41	475	270	68	30
Pb	ppm	21	25	15	30	16	16	15
Zn	ppm	37	55	550	60	44	89	330
Ni	ppm	2	3	2	9	11	4	3
Co	ppm	3	4	4	28	39	9	10
Ag	ppm	0,3	1,2	0,5	1,7	2,1	1,5	0,9
Au	ppm	6	79	74	407	1005	141	63
As	ppm	0,5	2,5	5	144	26	3	1,5
Sb	ppm	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1	0,5
Ba	ppm	357	667	2762	95	48	381	619
Rb	ppm	5	11	16	52	32	18	11

Tiré du trou de forage no.202, niveau 6, section 6420 Az = Nord

SOURCE: Mine Dumagami Ltée, 1985.

Tableau 3.2 : Test de génération d'acide sur les roches de la zone 4; 1985 (source : document interne, Mines Agnico-Eagle Ltée.)

Type d'échantillon	Ph initial	Pourcentage de soufre	Potentiel d'acidité en $kgCaCO_3/t$	Potentiel de neutralisation en $kgCaCO_3/t$	Producteur d'acide
Tuff intermédiaire	9,8	1,4	42,8	53,9	Non
Tuff felsique	9,7	1,58	48,3	29,4	Oui
Schiste à séricite	9,4	1,45	44,3	58,7	Non
Stériles	9,1	0,15	4,6	9,8	Non
Inconnu (minerai)	4,5	19,2	587,4	2,9	Oui
Minerai	4,1	30,5	933,1	0,5	Oui
Minerai	3,9	30,5	933,1	0,5	Oui

Les observations faites sur le terrain montrent que la halde produit d'importantes quantités de DMA. La mine Laronde procède à la collecte et au traitement de ces eaux qui sont captées à l'aide de fossés situés sur le périmètre de la halde. Des échantillons recueillis lors des travaux de terrain montrent que les stériles présents dans la zone échantillonnée comportent une fraction non oxydée sur les deux premiers mètres et une fraction oxydée en profondeur. Ceci laisse croire qu'à certains endroits les roches stériles ont été exposées à l'air ambiant avant d'être recouverts, plus récemment, par une autre couche de roches stériles. La fraction oxydée est constituée principalement du schiste à séricite dans lequel on retrouve de la pyrite disséminée. Des analyses préliminaires sur les échantillons montrent la présence de gypse et de jarosite dans la partie oxydée, ce qui indique un état d'oxydation avancé. Le tableau 3.3 montre les conductivités et le pH pour la fraction fine de trois échantillons recueillis sur le terrain.

Tableau 3.3 : Propriétés chimiques des stériles échantillonnés (fournies par L. Bernier, 2003)

Type d'échantillon	Conductivité (mS/cm)	pH
Stérile gris #1	2,35	7,67
Stérile gris #2	2,25	7,65
Stérile oxydé	2,4	3,96

Des échantillons ont été recueillis sur la halde à stériles de la mine Laronde lors des travaux de terrain parallèles à cette étude en 2002 et lors de travaux subséquents en 2003 (Gamache-Rochette, 2004). Le tableau 3.4 présente les résultats d'analyses chimiques de la roche totale pour ces échantillons. Les échantillons O1 et O2 correspondent à des stériles gris recueillis en octobre 2002. L'échantillon T1 correspond à des stériles gris recueillis en mai 2003. L'échantillon O3 correspond à des stériles orangés recueillis en octobre 2002 tandis que l'échantillon T2 correspond à des stériles orangés recueillis en mai 2003. Le paramètre PN est le pouvoir neutralisant exprimé en kg de $CaCO_3$ par tonne de matériel et le paramètre P.A.F. représente la quantité de volatiles exprimée en pourcentage massique.

Tableau 3.4 : Résultats des analyses chimiques de la roche totale pour les échantillons recueillis à la mine Laronde (tiré de Gamache-Rochette, 2004)

	FeO	Fe_2O_3	MnO	Fe	C (tot)	S (tot)	SO_4 tot
Échantillons	%	%	%	%	%	%	%
O1 5-20	2.36	0.16	0.11	1.95	0.37	0.29	0.12
O1 < 5	2.14	1.31	0.11	2.58	0.29	0.71	0.69
O2 5-20	1.95	1.25	0.11	2.39	0.16	0.59	0.12
O2 < 5	2.09	1.66	0.12	2.79	0.33	0.68	0.57
O3 5-20	1.43	1.02	0.06	1.83	0.08	0.33	0.00
O3 < 5	1.44	4.79	0.08	4.48	0.24	1.90	4.07
T1 5-20	2.21	1.17	0.13	2.54	0.20	0.39	0.09
T1 < 5	1.80	1.20	0.11	2.24	0.24	0.47	0.09
T2 5-20	1.67	4.89	0.14	4.73	0.15	3.10	2.37
T2 < 5	1.17	8.15	0.07	6.63	0.12	3.24	4.02

Tableau 3.4 (suite) : Résultats des analyses chimiques de la roche totale pour les échantillons recueillis à la mine Laronde (tiré de Gamache-Rochette, 2004)

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Échantillons	%	%	%	%	%	%	%
O1 5-20	73	0.50	10.90	3.50	1.10	2.76	2.15
O1 < 5	71	0.51	11.50	3.44	0.94	2.89	2.31
O2 5-20	71	0.48	13.10	3.12	0.86	3.05	2.21
O2 < 5	70	0.48	12.60	3.52	1.00	2.97	2.39
O3 5-20	72	0.58	12.70	3.38	1.00	3.49	1.84
O3 < 5	65	0.35	11.00	2.83	1.09	1.70	2.28
T1 5-20	70	0.46	13.80	2.63	1.21	2.36	3.36
T1 < 5	73	0.52	10.3	3.00	0.90	2.84	2.52
T2 5-20	67	0.35	11.2	3.39	1.40	1.11	1.93
T2 < 5	59	0.29	12.20	3.24	1.2	1.57	2.25

	Cu	Pb	Zn	Ba	Cd	PN	P.A.F.
Échantillons	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		%
O1 5-20	17	43	76	450	< 2	28.1	1.78
O1 < 5	87	79	215	550	< 2	20.6	2.32
O2 5-20	21	39	82	480	< 2	15.6	1.54
O2 < 5	90	64	220	600	< 2	21.3	2.13
O3 5-20	19	30	46	500	< 2	9.38	1.20
O3 < 5	128	105	84	660	< 2	-	7.72
T1 5-20	15	45	82	670	< 2	16.3	1.81
T1 < 5	57	61	175	630	< 2	16.0	2.22
T2 5-20	56	64	65	330	< 2	9.38	5.71
T2 < 5	145	138	61	540	< 2	-	10.17

En comparant ces données avec celles du tableau 3.1, on constate que ces échantillons peuvent s'apparenter aux stériles de la zone 4 provenant des profondeurs de 39 à 52 mètres. Cependant, les concentrations en métaux ne sont pas tout à fait les mêmes que celles de la zone 4. Ceci laisse croire que les stériles échantillonnés sur la halde ne proviennent pas strictement de cette ancienne zone, mais aussi d'autres sources.

Le tableau 3.5 présente les résultats d'analyses statiques effectuées sur ces mêmes échantillons. On peut y voir plusieurs paramètres utilisés pour déterminer le potentiel

de génération d'acide de l'échantillon. D'après ces résultats, tous ces échantillons sont considérés comme étant potentiellement générateurs d'acide (Gamache-Rochette, 2004). Ces résultats ne sont pas similaires à ceux présentés au tableau 3.2, où ce ne sont pas toutes les roches qui seraient productrices d'acide. On peut donc croire que les stériles de la halde sont composés d'un mélange de roches qui n'est pas homogène.

Tableau 3.5 : Résultats pour les analyses statiques pour les échantillons recueillis sur la halde de la mine Laronde (tiré de Gamache-Rochette, 2004)

	PAM	PAS	PN	PNN	PAG	PNC
	kg_{CaCo3}/t	kg_{CaCo3}/t	kg_{CaCo3}/t	kg_{CaCo3}/t	kg_{CaCo3}/t	kg_{CaCo3}/t
O1 5-20mm	9.19	7.94	28.10	18.91	-18.91	31.02
O1 <5mm	22.47	15.28	20.60	-1.87	1.87	24.51
O2 5-20mm	18.44	17.19	15.6	-2.84	2.84	13.17
O2 <5mm	21.44	15.50	21.30	-0.14	0.14	27.68
O3 5-20mm	10.59	10.59	9.38	-1.21	1.21	6.17
O3 <5mm	59.38	16.98	-1.25	-60.63	60.63	19.34
T1 5-20mm	12.59	11.66	16.30	3.71	-3.71	16.93
T1 <5mm	14.81	13.88	16.00	1.19	-1.19	20.01
T2 5-20mm	97.09	72.41	9.38	-87.71	87.71	12.42
T2 <5mm	101.25	59.38	-6.25	-107.50	107.5	10.34

- le potentiel d'acidité maximal (PAM = $\%S_{tot}$*31.25 kg_{CaCo3}/t)
- le potentiel d'acidité des sulfures (PAS = $\%S_{sulf}$*31.25 kg_{CaCo3}/t)
- le potentiel de neutralisation brut (PN, titration acide-base en kg_{CaCo3}/t)
- le potentiel de neutralisation des carbonates (PNC = $\%CO_{2inorg}$*22.74 kg_{CaCo3}/t)
- le potentiel de neutralisation net (PNN = PN – PAM)
- le potentiel de génération d'acide (PGA = PAM – PN)

3.2.3 Morphologie de la halde à stériles

La halde à stériles de la mine Laronde à été construite sous forme d'empilement en tas sur une surface d'environ 50 000 m^2. L'empilement contient deux bancs principaux, d'environ 15 m de hauteur pour le premier et d'environ 10 m pour le deuxième, pour une hauteur totale d'environ 25 m. L'angle de repos des matériaux sur les pentes de la halde est estimé à environ 35 degrés. La halde est munie d'une rampe permettant d'accéder aux deux niveaux. La figure 3.3 est une image numérique de l'empilement, réalisée par l'équipe d'arpentage de la mine Laronde.

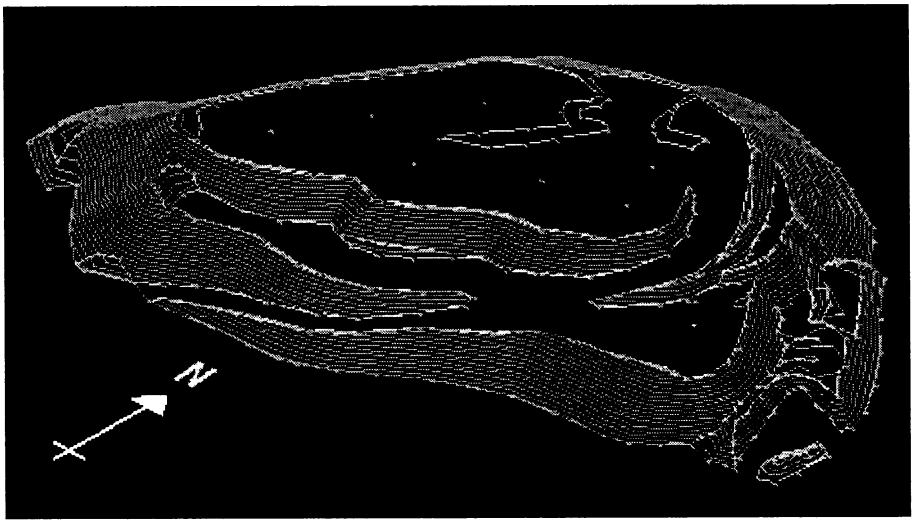


Figure 3.3 : Image numérique de la halde à stériles de la mine Laronde (courbes de niveau tous les mètres)

La distribution des matériaux observée dans la halde est typique de celle d'un empilement en tas à couches superposées. Le profil granulométrique des stériles de cette halde est par conséquent très étalé. Les courbes granulométriques pour la fraction inférieure à 100 mm de trois échantillons recueillis sur le terrain sont présentées à la figure 3.4. Le tableau 3.6 présente les propriétés des stériles déterminées par des essais de laboratoire sur ces échantillons. Les stériles non-oxydés présentent des propriétés similaires tandis que la fraction oxydée contient une plus grande proportion de particules fines. Cette dernière possède également une

porosité plus élevée et une conductivité hydraulique plus faible que les stériles non-oxydés.

Une ségrégation entre des blocs de stériles peut être observée le long des pentes. En effet, des blocs de gros volume sont présents au pied de la halde, tandis que des blocs plus petits se retrouvent sur les flancs. En surface de la halde, les stériles sont souvent oxydés et plus compacts que ceux que l'on retrouve sur les pentes. Cette compacité est d'ailleurs plus forte aux endroits tels que la rampe d'accès, où la machinerie lourde a circulé davantage. On retrouve une analyse plus exhaustive de la minéralogie, ainsi que des propriétés géotechniques des stériles de la mine Laronde dans les travaux présentés par Gamache-Rochette (2004).

Tableau 3.6 : Propriétés des stériles déterminées par les essais en laboratoire (adapté de Gamache-Rochette, 2004)

Type d'échantillon	C_u	Densité des solides	Porosité	Indice des vides	Conductivité hydraulique (cm/s)
Stérile gris #1	274,3	2,78	0,31	0,45	2,96E-03
Stérile gris #2	253,5	2,78	0,35	0,54	3,74E-03
Stérile oxydé	435,5	2,82	0,50	1,01	1,73E-04

C_u = coefficient d'uniformité

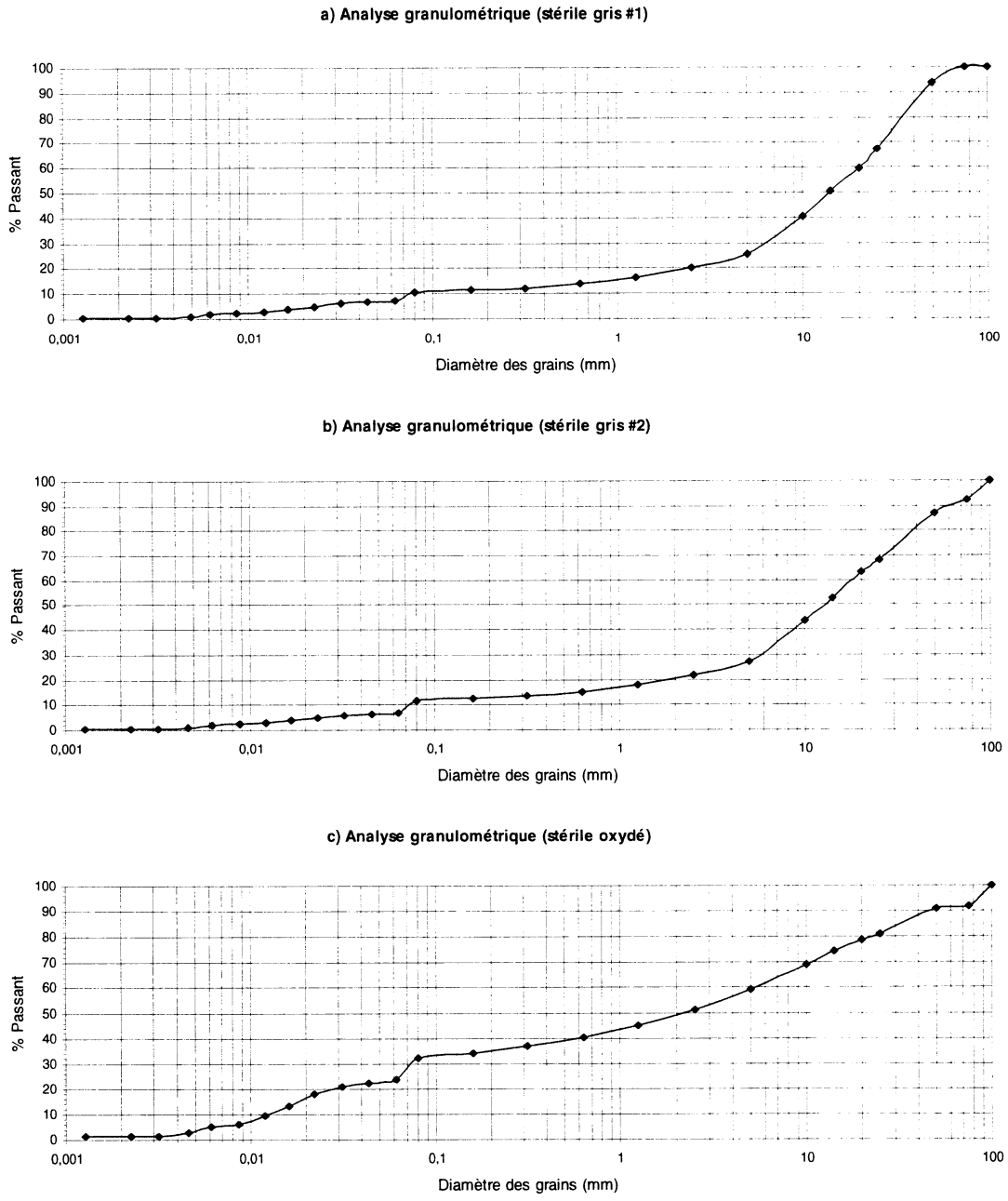


Figure 3.4 : Courbes granulométriques des stériles de la mine Laronde; a) stérile gris #1, b) stérile gris #2, c) stérile oxydé (adapté de Gamache-Rochette, 2004)

3.3 Travaux de terrain

3.3.1 Choix du site d'étude

Lors de l'acquisition de données géophysiques, la présence d'une topographie irrégulière est un obstacle qui peut être aisément corrigé lors du traitement des données. Cependant, lorsque les conditions de terrain le permettent, il est préférable d'effectuer les levés sur une surface plane afin de minimiser les erreurs et le temps alloué au traitement. Dans le cas des travaux sur la halde à stériles de la mine Laronde, la zone où les levés ont été effectués devait de préférence répondre à ce critère, mais aussi permettre autant que possible de sonder près des pentes de la halde. En effet, des simulations numériques d'écoulement sur une halde à stériles typique (Fala 2002) montrent qu'un front de mouillage est présent sur les 5-6 premiers mètres en profondeur, ainsi que sur les pentes de la halde. La superficie de la zone d'étude devait aussi être assez grande pour permettre une bonne caractérisation des stériles en profondeur. Tenant compte de ces considérations, une grille de 30 m par 30 m a été délimitée sur le banc supérieur ouest de la halde (Fig. 3.5) dans une zone où la topographie était relativement plane. Les axes de la grille sont orientés plus ou moins est-ouest/nord-sud avec un azimut de 250 degrés W pour l'axe des Y.

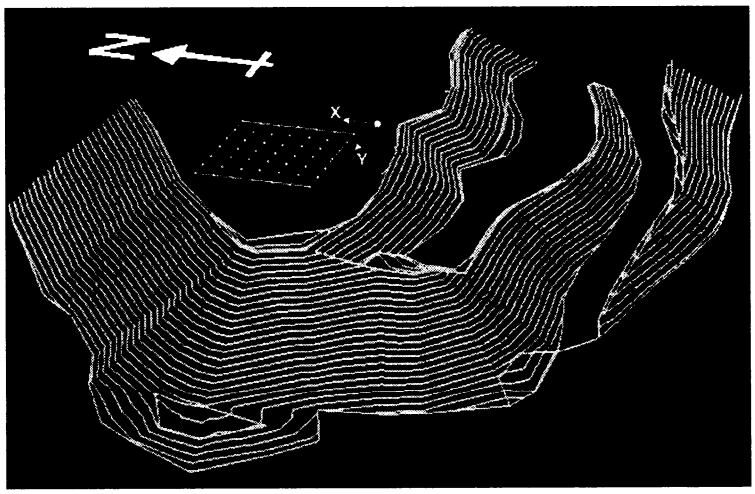


Figure 3.5 : Emplacement de la grille sur la halde à stériles.

3.3.2 Exécution des travaux

3.3.2.1 Phase I

Une première phase de terrain sur la halde à stériles de la mine Laronde a eu lieu au début du mois de juillet 2002. Cette phase avait comme objectif une caractérisation préliminaire de la zone d'étude choisie en obtenant une image générale de la structure de la halde à l'aide des deux méthodes géophysiques envisagées. De plus, cette phase a permis d'ajuster les paramètres d'acquisition des appareils afin d'obtenir des résultats optimaux pour les phases de terrain subséquentes. Enfin, ces mesures ont aussi permis d'évaluer le temps nécessaire pour mener une campagne de mesures géophysiques sur ce type de terrain. La figure 3.6 montre l'emplacement des levés sur la grille d'étude.

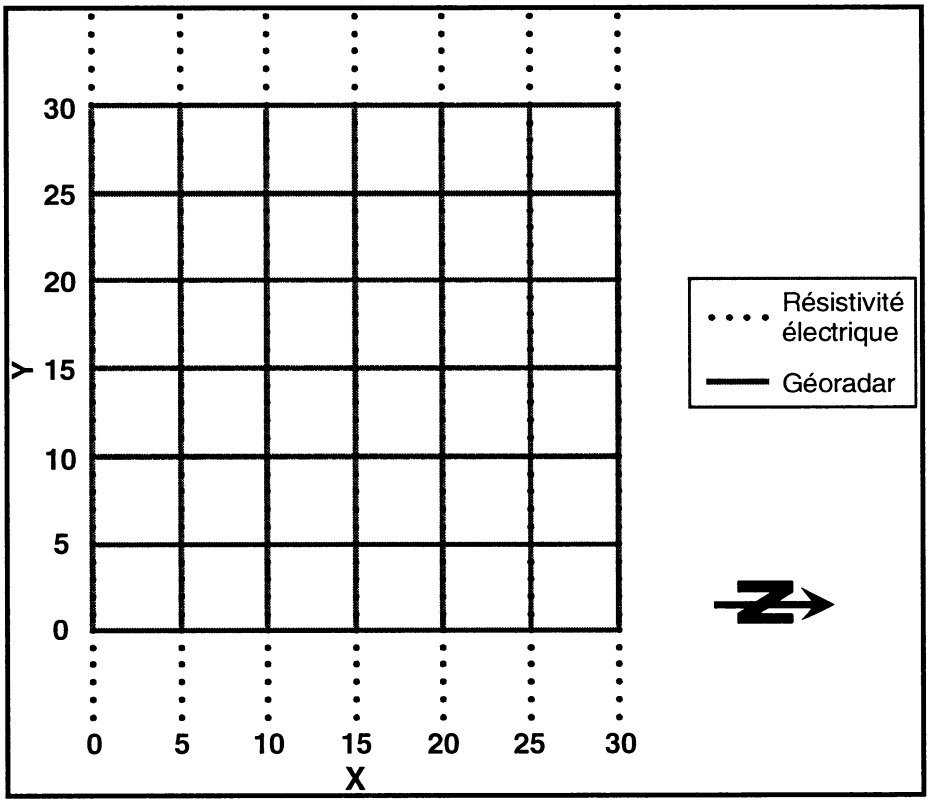


Figure 3.6 : Emplacement des levés sur la grille d'étude; 1ère phase

Les mesures de résistivité électrique ont été effectuées à l'aide du Lund Imaging System de ABEM Instruments qui comprend une console principale, le Terrameter SAS 4000, couplée au dispositif multi-électrodes ES464, qui permet d'effectuer des profils ayant 41 électrodes. La disposition typique de ce système consiste en 4 câbles joints ensemble au centre par le dispositif multi-électrodes qui est rattaché à la console principale (Fig. 3.7). Dans le cas de profilages sur de longues distances qui nécessiteraient plus de 41 électrodes, ce système permet d'effectuer un déplacement latéral du dispositif (technique du « roll-along »), d'où l'utilité d'avoir quatre câbles. L'acquisition des données dans le système, pour une configuration d'électrodes donnée, se fait automatiquement à l'aide d'un protocole chargé dans le disque dur de l'appareil.

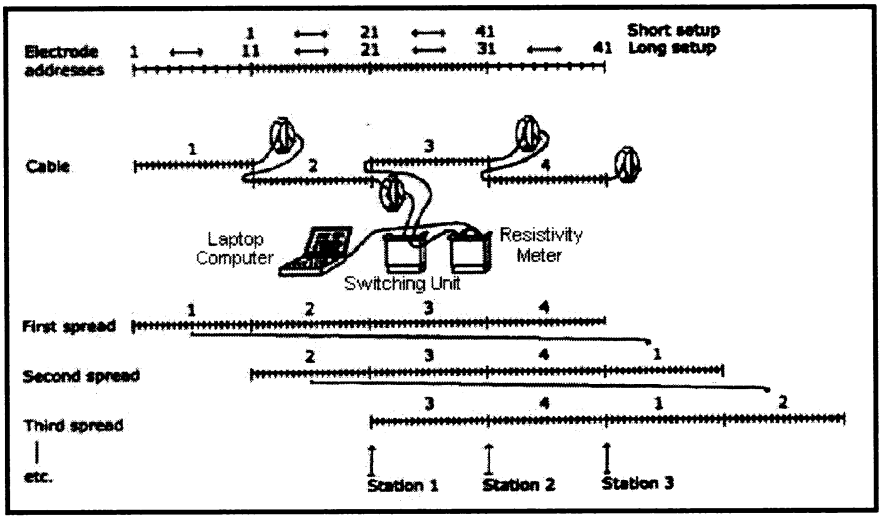


Figure 3.7 : Disposition typique du Lund Imaging System : profilage à 4 câbles et 41 électrodes avec déplacement latéral (tirée de Locke 2002).

Dans le cas des travaux sur la halde à stériles de la mine Laronde, les profils ont été effectués avec un espacement minimal de 1 mètre entre les électrodes, de sorte que la longueur de chaque profil était de 40 mètres. La configuration d'électrodes Wenner alpha a été utilisée pour effectuer sept profils parallèles espacés de 5 mètres. Un marteau-piqueur a été utilisé afin de percer des trous d'environ 20 cm dans les stériles.

Les électrodes étaient par la suite introduites dans les trous et leur mise en place était assurée par un mélange de gravier fin absorbant (litière pour chats), d'eau et de sel de déglaçage. Cette technique a été utilisée afin de favoriser le contact électrique entre les électrodes et les stériles tout en facilitant l'insertion des électrodes dans les stériles compactés. Les profils sont orientés selon l'axe Y de la grille d'étude, soit selon une orientation plus ou moins est-ouest. Le choix de la configuration des électrodes est justifié par sa rapidité d'exécution par rapport aux autres protocoles de la console SAS 4000. De plus cette configuration permet une bonne résolution verticale (Reynolds 1997). Par contre, cette configuration ne permet pas une très grande pénétration dans le sol, soit d'environ 6 mètres. Cependant, tenant compte des objectifs des levés, elle a été jugée acceptable.

Le courant injecté dans le sol par l'appareil a été fixé à 100 mA. Cependant, lorsque les résistances de contact sont élevées, le voltage nécessaire pour injecter le courant peut dépasser la capacité du système (400 V) et l'appareil se réajuste automatiquement en injectant un courant moins élevé. Pour cette raison, les courants d'injection variaient entre 20 mA et 100 mA. Enfin, afin de diminuer le bruit engendré par les lignes électriques de haute tension du secteur, un filtre réjection à 60Hz a été appliqué lors de l'acquisition des données.

Les mesures de géoradar ont pour leur part été faites à l'aide du système Pulse EkkoIV de Sensors & Software Inc. Ce système est composé de deux antennes reliées à une console principale par des fibres optiques. La console est à son tour reliée à un ordinateur de contrôle. La figure 3.8 présente un schéma montrant les composantes principales du système Pulse EkkoIV. L'acquisition des données nécessite deux opérateurs, soit un qui déplace les antennes d'un incrément donné et un qui enregistre les données sur l'ordinateur de contrôle. Puisque le temps d'acquisition des données radar est beaucoup plus rapide qu'en résistivité électrique, quatorze profils espacés de 5 mètres ont été effectués sur la grille d'étude. Sept de ceux-ci correspondent aux mêmes profils effectués en résistivité électrique et sept autres sont perpendiculaires à l'axe des Y, soit dans une orientation plus ou moins nord-sud (Figure 3.6).

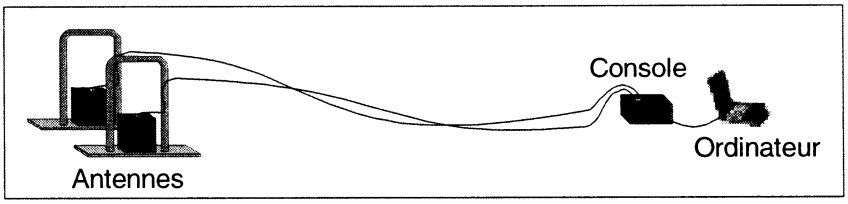


Figure 3.8 : Composantes principales de système EkkoIV

Les paramètres d'acquisition utilisés pour les profils radar sont présentés au tableau 3.7. Étant donné que la vitesse des ondes radar dans les milieux géologiques varie généralement entre 0,06 m/ns à 0,1 m/ns, un temps de lecture de 250 ns représente une pénétration maximale de 7,5 m à 12,5 m. Ce temps de lecture a été jugé suffisant puisque le signal était atténué avant la fin de la période d'enregistrement.

Tableau 3.7 : Paramètres d'acquisition des profils radar : phase I

Fréquence des antennes	100 MHz
Distance emmeteur/récepteur	0,8 m
Longueur des profils	30 m
Incrément des mesures	0,2 m
Nombre de traces	151
Incrément d'échantillonnage	0,801282 ns
Nombre d'échantillons par trace	312
Temps de lecture	250 ns

3.3.2.2 Phase II

Une deuxième campagne de terrain a eu lieu au début du mois d'octobre 2002. Contrairement à la première série de mesures sur la halde à stériles de la mine Laronde, cette campagne de terrain a été réalisée en deux étapes. Premièrement, une première série de mesures quasi-identique à celle de juillet 2002 a été faite afin de vérifier les données obtenues durant la première campagne de terrain. De plus, cette série de mesures devait permettre de voir s'il y avait eu des variations des propriétés des stériles durant la période entre les deux campagnes de terrain. En second lieu, une deuxième série de mesures a été effectuée conjointement à un essai d'infiltration

d'eau *in situ* afin d'étudier l'effet de l'écoulement de l'eau sur les propriétés géophysiques des stériles.

Afin de réduire le temps d'acquisition des données de résistivité électrique, des électrodes fixes ont été installées sur chacune des sept lignes où les levés ont été menés. Ces électrodes ont été mises en place de la même manière que lors de la première phase, soit à l'aide d'un marteau-piqueur pour percer des trous et un mélange d'eau salée et de litière pour assure le contact. Par conséquent, l'acquisition des données radar a dû être décalée entre les lignes de résistivité électrique pour éviter qu'il y ait interférence avec les électrodes métalliques. Cette modification entraîne donc une réduction du nombre de lignes radar dans la direction est-ouest, de sorte que treize profils radar ont été effectués au lieu des quatorze mesurés lors de la première phase de terrain. La figure 3.9 montre l'emplacement des levés sur la grille d'étude pour les deux séries de mesures faites lors de la deuxième phase de terrain.

Les mesures de résistivité électrique ont à nouveau été effectuées à l'aide du Lund Imaging System. Les paramètres d'acquisition utilisés ont été les mêmes que lors de la première phase de terrain, mis à part le courant d'injection qui a été fixé a 200 mA. Tel qu'indiqué précédemment, le courant injecté réel peut varier d'une lecture à l'autre dépendamment de la résistance de contact aux électrodes, c'est pourquoi les courants d'injection ont varié entre 50 mA et 200 mA.

Pour cette série de mesures, les donnés de géoradar ont été prises avec le système RAMAC de MALA Geoscience. Tout comme le Pulse EkkoIV, ce système est composé de deux antennes reliées à une console principale à l'aide de fibres optiques. Cependant, cet appareil est plus robuste et ne nécessite qu'un seul opérateur sur le terrain. La figure 3.10 montre les composantes principales du système RAMAC. Les paramètres d'acquisition utilisés avec le système RAMAC sont présentés au tableau 3.8.

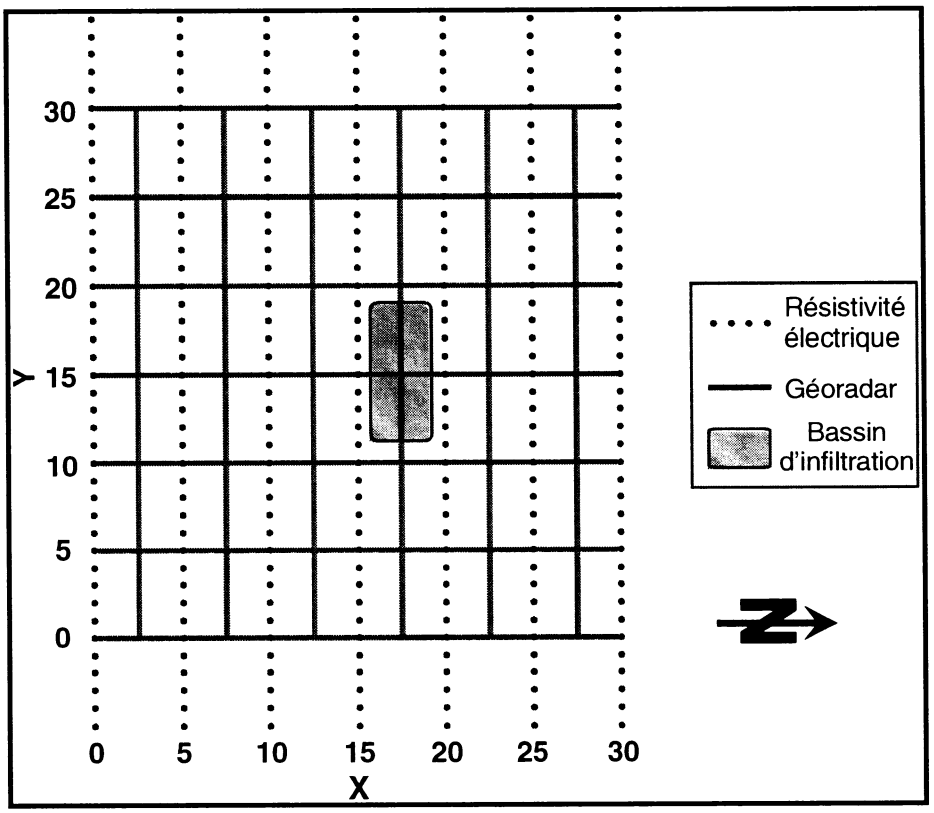


Figure 3.9 : Emplacement des levés sur la grille d'étude; Phase II

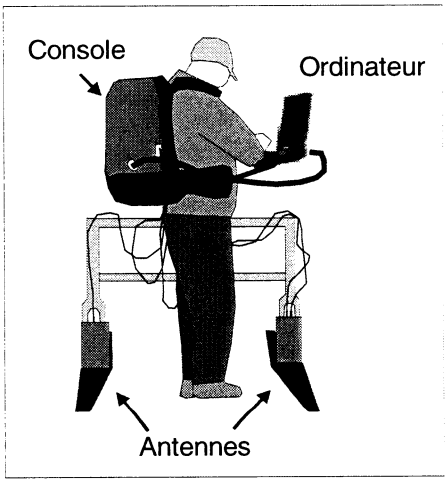


Figure 3.10 : Composantes principales du système RAMAC

Tableau 3.8 : Paramètres d'acquisition des profils radar : Phase II

Fréquence des antennes	100 MHz
Distance emmeteur/récepteur	1,0 m
Longueur des profils	30 m
Incrément des mesures	0,2 m
Nombre de traces	151
Incrément d'échantillonnage	0,7927236 ns
Nombre d'échantillons par trace	316
Temps de lecture	250,5 ns

Afin d'effectuer l'essai d'infiltration, un bassin d'environ 40 m^2 a été construit pour contenir l'eau dans une zone restreinte et maintenir une charge constante (fig. 3.11 et 3.12). L'apport en eau a été assuré par un camion citerne situé à l'extérieur de la grille d'étude afin de ne pas interférer avec l'acquisition des données géophysiques. L'essai d'infiltration s'est déroulé sur une période de deux jours pour une durée cumulative de 7,33 heures. Par ailleurs, le débit d'infiltration estimé durant l'essai a varié entre 30 l/min et 40 l/min.

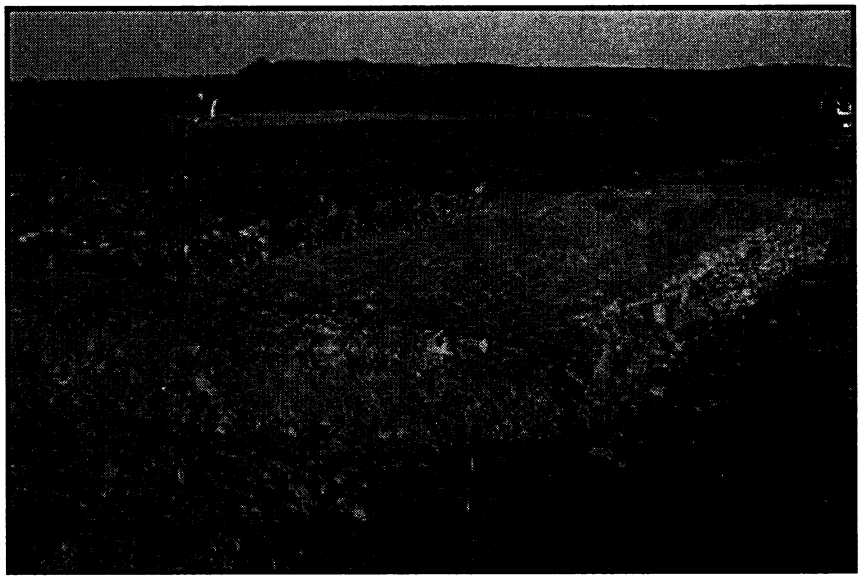


Figure 3.11: Photo du bassin avant l'infiltration (dimensions : environ 8 m par 5 m)

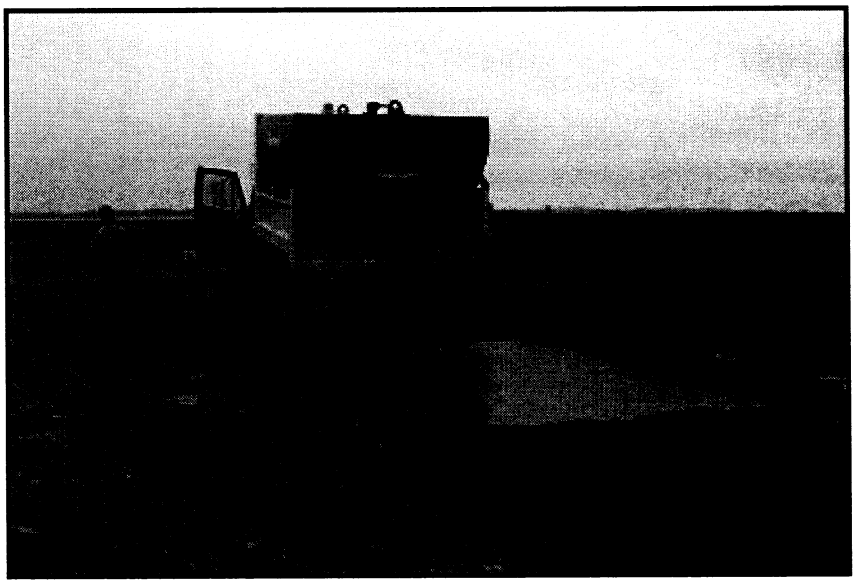


Figure 3.12 : Photo du bassin pendant l'infiltration

La majorité des profils géophysiques de la deuxième série de mesures ont été faits au moment où avait lieu l'infiltration. Cependant, puisque les mesures de résistivité électrique prennent un temps plus long, certains profils ont du être terminés après l'arrêt de l'infiltration. Afin de minimiser l'effet causé par cette variation dans l'écoulement, les profils les plus éloignés du bassin d'infiltration ont été réalisés en dernier en supposant que l'écoulement de l'eau prend plus de temps à influencer les zones plus lointaines du bassin. Les périodes d'acquisition pour chaque profil par rapport aux périodes d'infiltration sont présentées à la figure 3.13. Enfin, dans le cas des profils radar, seuls ceux qui passaient au-dessus du bassin ont dû être faits une fois l'infiltration terminée pour éviter d'avoir les antennes en contact direct avec l'eau.

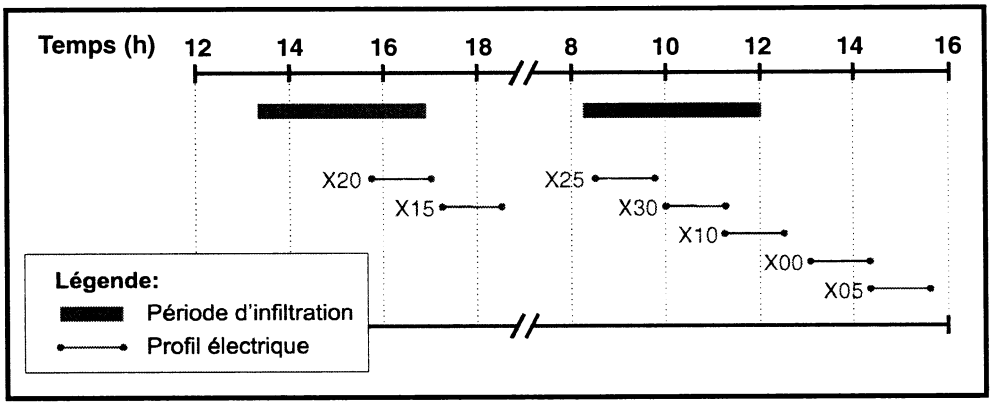


Figure 3.13 : Durée de l'exécution des profils électriques par rapport aux périodes d'infiltration d'eau dans le bassin.

3.3.2.3 Autres travaux

Plusieurs autres projets ont été effectués en parallèle et à la suite des travaux présentés dans le cadre de cette étude. Bien que ces travaux sortent du cadre de la présente étude, ces derniers apportent des informations complémentaires à la compréhension de la structure interne de la halde à stériles de la mine Laronde. Ainsi, des travaux de terrain se sont poursuivis lors de quatre campagnes de terrain durant l'été 2003. Ces travaux ont consisté en la caractérisation de l'écoulement de l'eau dans les stériles de la halde de la mine Laronde (Gamache-Rochette, 2004). De nouveaux levés géophysiques ont également été effectués durant l'été 2003 afin de prolonger les travaux présentés dans cet ouvrage (Poisson 2004). Ces derniers ont consisté en l'application de diverses méthodes géophysiques pour approfondir la caractérisation de la structure de la halde entamée par la présente étude. Les méthodes électromagnétiques fréquentielles et temporelles (TDEM), la résistivité électrique et le géoradar ont été utilisées pour la caractérisation de la structure interne de la halde, ainsi que les pentes de cette dernière. De nouveaux essais d'infiltration ont également été effectués au même endroit avec un monitoring par géoradar à grand angle et par résistivité électrique en « mode parallèle ». Une brève comparaison entre les résultats de la présente étude et ceux issus des travaux de 2003 est présentée lors de l'interprétation des résultats au chapitre 5.

Chapitre 4 - Présentation des résultats

4.1 Généralités

Ce chapitre présente les résultats des deux campagnes de terrain effectuées en 2002 à la mine Laronde. De plus, des résultats de modélisation électrique effectuée dans le but de prédire la réponse du terrain à l'essai d'infiltration sont présentés.

Afin de garder une cohérence dans la présentation des profils, une numérotation spécifique a été adoptée. Par conséquent, chaque profil est identifié par quatre ou six caractères, soit une lettre (x ou y) pour l'axe du profil, deux ou trois chiffres pour la position du profil (00 à 30) et une autre lettre (a, b ou c) pour identifier le moment où le profil à été effectué. Plus précisément, la lettre *a* correspond à la phase I, la lettre *b* à la phase II avant l'essai d'infiltration et la lettre *c* à la phase II après l'essai d'infiltration. Par exemple la numérotation « X17,5b » correspond au profil situé sur l'axe des X à la position 17,5 mètres et il a été mesuré durant la phase II des travaux avant l'essai d'infiltration.

4.2 Résistivité électrique

4.2.1 Traitement des données

Afin d'obtenir une représentation adéquate des résultats des mesures de résistivité effectuées sur le terrain, les données recueillies doivent être soumises à une série de traitements. La séquence habituelle de traitement est la suivante :

1) Transfert et conversion des données.
2) Analyse des erreurs de mesure.
3) Élimination des données aberrantes.
4) Visualisation des données sous forme de profils de résistivité apparente.
5) Inversion numérique des profils de résistivité apparente.
6) Présentation des résultats d'inversion sous forme de profils de résistivité.

Dans le cas de cette étude, les étapes 3 à 6 de la séquence de traitement ont été effectuées à l'aide du logiciel RES2DINV de Geotomo Software (2002a).

RES2DINV permet d'effectuer plusieurs types d'inversion numérique des données de résistivité apparente. Chacun de ces types correspond à différentes contraintes appliquées au modèle afin d'obtenir un résultat qui tient compte des conditions de terrain présentes. Trois types d'inversion ont été utilisés dans le cadre de cette étude soit l'inversion standard, l'inversion robuste et l'inversion « time-lapse ».

Tel qu'indiqué par son nom, l'inversion standard est le type d'inversion « par défaut » de RES2DINV et correspond à une inversion par moindres carrés. Ce type d'inversion applique une contrainte de lissage au modèle afin de ne pas avoir des variations trop brusques dans les résistivités électriques du modèle final (Locke, 2002). Cette méthode s'applique lorsque les variations de résistivité sont graduelles, telles qu'en présence d'un panache de contamination.

L'inversion robuste consiste à appliquer une contrainte au modèle afin de minimiser la différence absolue entre les valeurs de résistivité apparentes mesurées et calculées (Locke, 2002). Cette méthode s'applique préférentiellement lorsqu'on est en présence de variations de résistivité qui sont brusques, telles qu'un contact géologique ou une cavité.

L'inversion « time-lapse » est utilisée lorsqu'il est nécessaire de comparer des profils de résistivité effectués à différents intervalles de temps. Cette méthode permet donc d'effectuer l'inversion simultanée de plusieurs profils en appliquant une contrainte qui fait en sorte que chaque étape d'inversion tient compte d'un modèle initial obtenu lors de la première inversion (Locke, 1999). L'inversion « time-lapse » est particulièrement utile dans les cas où les propriétés du milieu changent avec le temps, comme dans le cas d'essais d'infiltration.

4.2.2 Résultats phase I

4.2.2.1 Analyse des erreurs

Tel que mentionné à la section 4.1.1, une analyse des erreurs de mesure est faite sur les données de résistivité apparente afin d'évaluer la fiabilité de chaque profil et d'éliminer des valeurs aberrantes qui risquent de nuire à la convergence de l'inversion numérique. L'erreur de mesure fournie par l'appareil correspond au pourcentage d'écart entre des mesures successives faites pour un point donné. Par défaut le système Terrameter SAS4000 prend 4 évaluations du voltage à chaque point et il répète ce cycle jusqu'à l'obtention d'une erreur (σ_ρ/ρ) inférieure à 1% ou jusqu'à ce que le nombre maximum de cycles spécifiés par l'utilisateur est atteint. Dans le cadre de ce projet, le nombre maximal de cycles a été fixé à 4. L'erreur de mesure est donc calculée par l'appareil à partir de ces mesures.

L'analyse des erreurs consiste en une analyse des statistiques descriptives de la série de données. Les résultats de cette analyse pour la phase I sont montrés dans le tableau 4.1. Ce tableau présente les statistiques des erreurs des mesures pour chaque profil de résistivité effectué. Ces données permettent d'effectuer un contrôle de qualité des données selon la grandeur des erreurs obtenues. Des histogrammes de la répartition des erreurs pour chaque profil sont aussi présentés à la figure 4.1. Ces derniers montrent la fréquence des erreurs en fonction de leur grandeur à des intervalles de 0,1%. Ces graphiques servent également à identifier les données douteuses.

Tableau 4.1 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité; phase I

(en %)	Profil						
	X00a	X05a	X10a	X15a	X20a	X25a	X30a
Minimun	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum	0,2997	0,1340	0,0373	0,0771	1,0109	7,1431	0,0656
Moyenne	0,0206	0,0164	0,0148	0,0167	0,0214	0,1061	0,0165
Médiane	0,0150	0,0157	0,0140	0,0156	0,0155	0,0183	0,0167
Écart type	0,0341	0,0118	0,0074	0,0098	0,0730	0,6133	0,0090
Variance	0,001160	0,000140	0,000055	0,000097	0,005323	0,376101	0,000082

Ces résultats montrent que dans le cas de la phase I des travaux de résistivité, aucune tendance d'anomalies majeure n'a été détectée dans les résultats puisque les erreurs de mesure sont faibles. En général, l'erreur de mesure se situe en dessous de 0,2%. De plus, la figure 4.1 montre que presque la totalité des erreurs est inférieure à 0,1%. Cependant, quelques points de mesure montrent des erreurs élevées aux profils X20a et X25a. Une attention particulière doit donc être accordée lors de l'inversion de ces profils et des corrections peuvent s'appliquer au besoin.

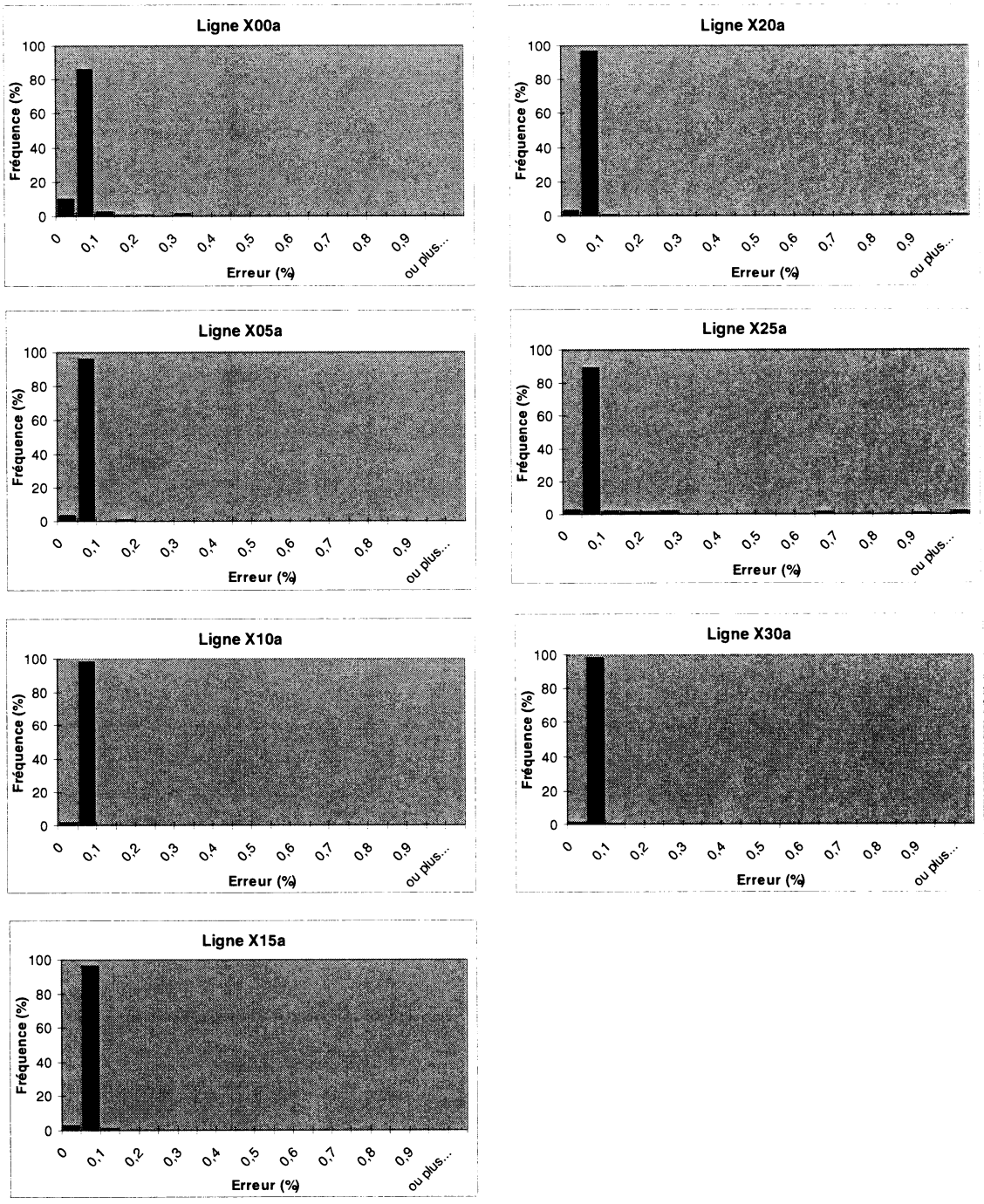


Figure 4.1 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs de mesure pour les profils de résistivité électrique; phase I (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%)

4.2.2.2 Inversion des données de résistivité apparente

Deux types d'inversion ont été appliqués aux données de la phase I, soit l'inversion standard et l'inversion robuste. La figure 4.2 montre les profils d'inversion par la méthode standard. Ces profils permettent de voir le modèle de distribution de la résistivité dans les stériles obtenus par inversion numérique en fonction de la profondeur. L'erreur RMS correspond à l'erreur par moindres carrées entre les données réelles et les valeurs obtenues avec le modèle. La figure 4.3 présente les profils d'inversion pour la méthode robuste. Ces profils permettent de voir un modèle de distribution de la résistivité similaire à la méthode standard, mais avec un contact plus franc entre les différentes lithologies. Dans le cas de la méthode robuste, l'erreur est exprimée en erreur absolue entre les données réelles et les valeurs obtenues avec le modèle. La configuration Wenner à 41 électrodes espacées de 1 mètres a permis d'obtenir des modèles jusqu'à une profondeur d'environ 6 mètres.

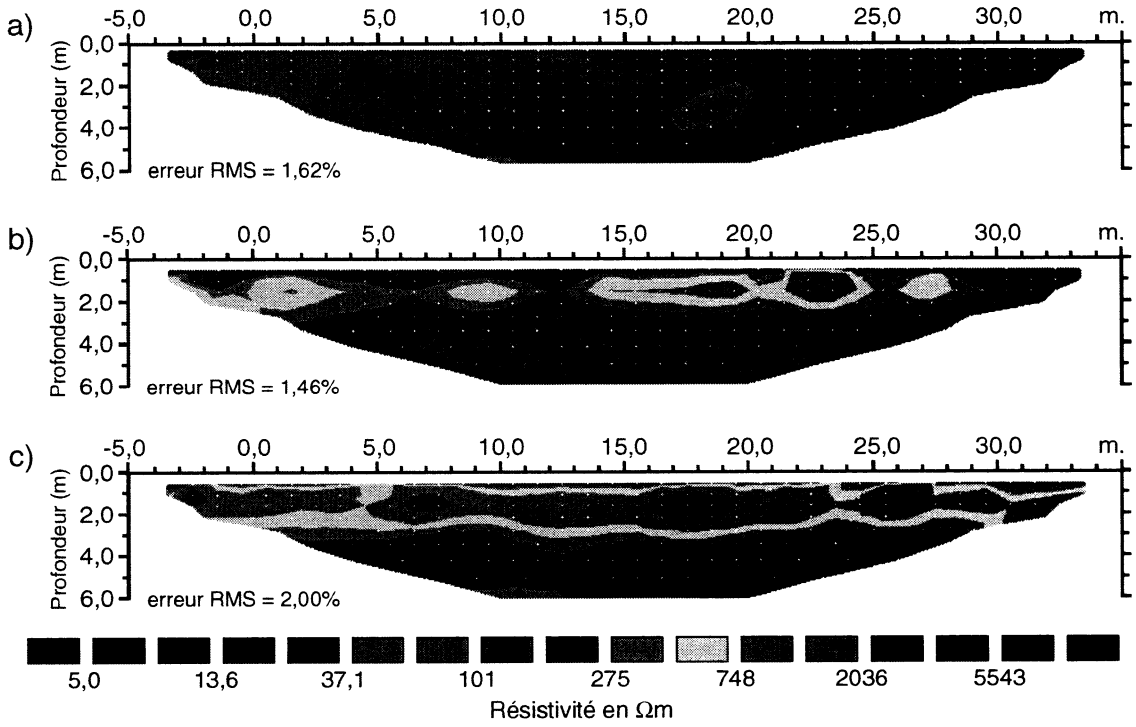


Figure 4.2 : Profils d'inversion de résistivité par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

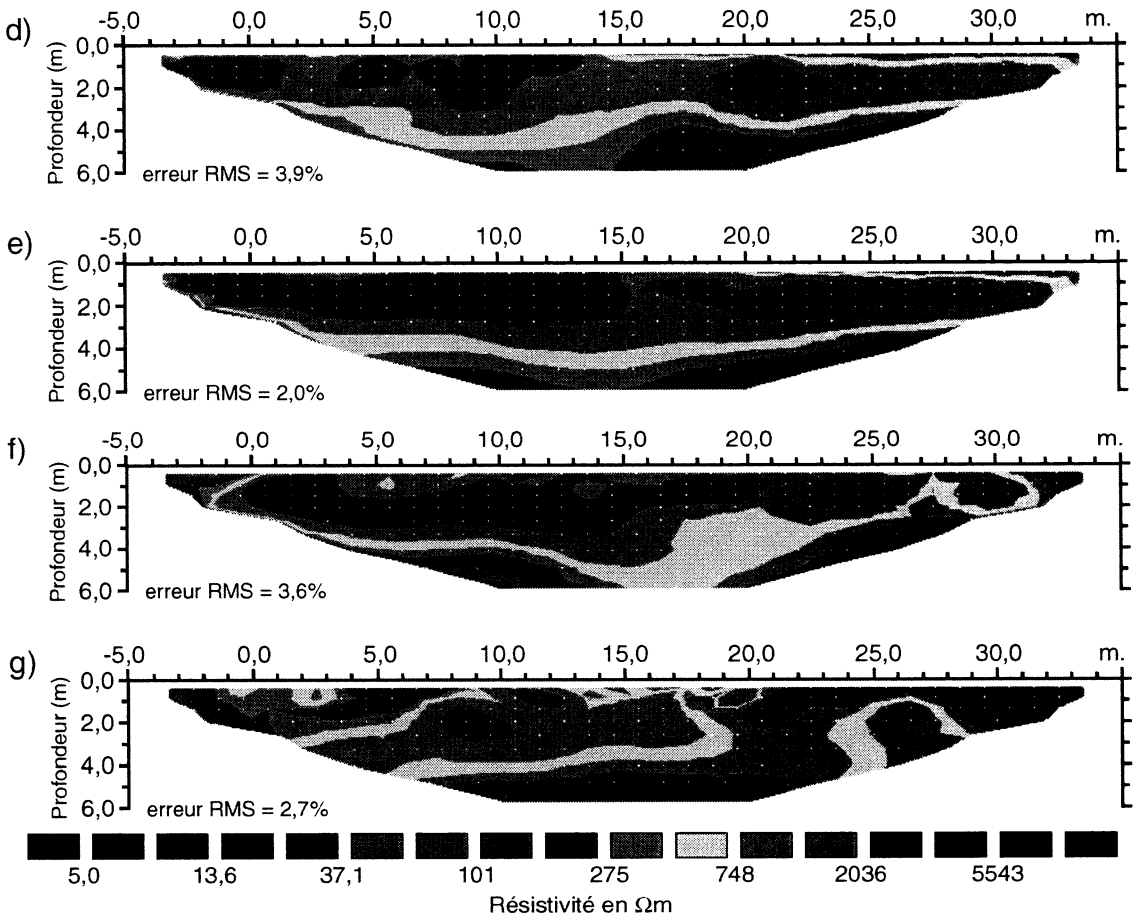


Figure 4.2 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

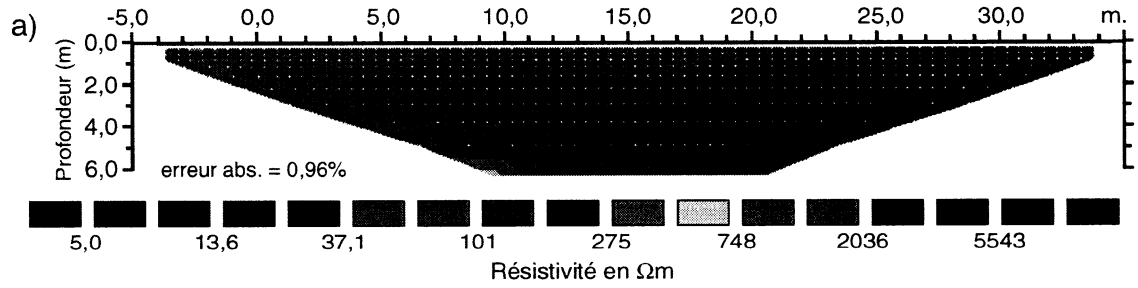


Figure 4.3 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

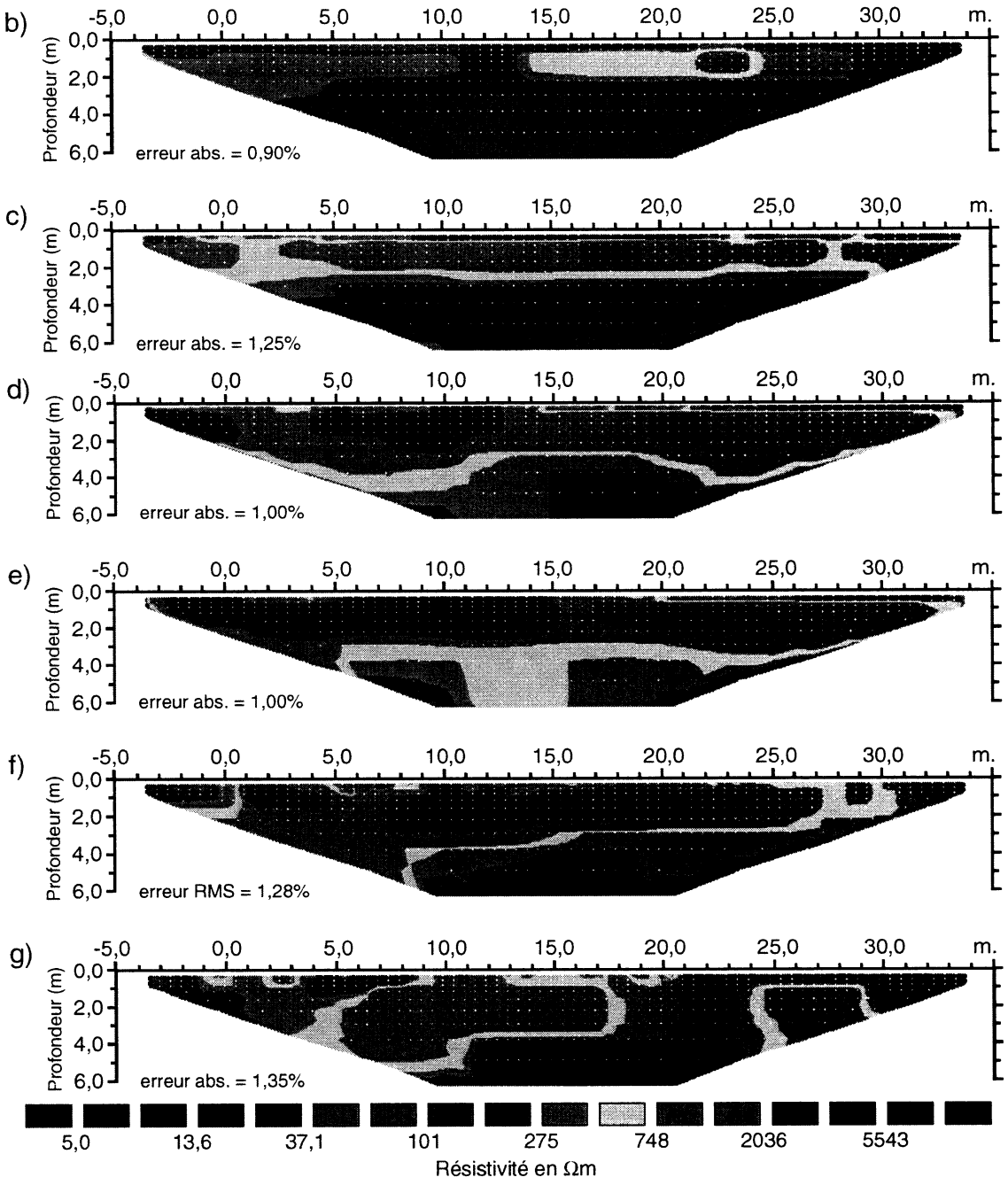


Figure 4.3 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

Les résultats des deux types d'inversion montrent de fortes variations de la résistivité électrique (>5000 Ωm) au sein de la halde à stériles. La partie au sud de la grille d'étude (profils X00a et X05a) montre un terrain relativement homogène avec des résistivités n'excédant pas 300 Ωm, mis à part quelques endroits où des résistivités de plus de 700 Ωm sont observées. Cette augmentation de la résistivité, qui se fait beaucoup plus importante sur les autres profils situés plus au nord, prend la forme d'un noyau dont la résistivité atteint parfois des valeurs supérieures à 5000 Ωm. Le « cœur » de ce noyau résistif se situe aux profils X15a, X20a et X25a. De plus, cette zone à forte résistivité est limitée à des profondeurs variant entre 2 à 4 mètres dépendant du profil et de la méthode d'inversion. Au-delà de ces profondeurs, la résistivité du terrain diminue à des valeurs comparables à celles observées sur les profils situés dans la partie plus au sud de la grille d'étude.

Une tranchée effectuée à quelques mètres au nord de la zone d'étude indique un changement lithologique à une profondeur variant entre 1,5 et 2 mètres tel que montré à la figure 4.4. Ces images montrent que le changement lithologique est relativement net. La zone oxydée correspondrait aux résistivités faibles observées en profondeur tandis que la roche non altérée coïnciderait avec les résistivités plus fortes. Dans le cas où cette hypothèse est vraie, les résultats de l'inversion robuste seraient plus appropriés pour interpréter cette frontière. Par conséquent, les profils d'inversion (voir figures 4.2 et 4.3) montrent que la limite entre les deux zones est plus ou moins horizontale. De plus, une fine couche conductrice est observée près de la surface le long des profils X05a et X10a et dans la partie ouest des profils X15a et x20a. L'altération des stériles qui sont exposés à la surface de la halde pourrait expliquer cette baisse de la résistivité des stériles sur environ 50 cm.

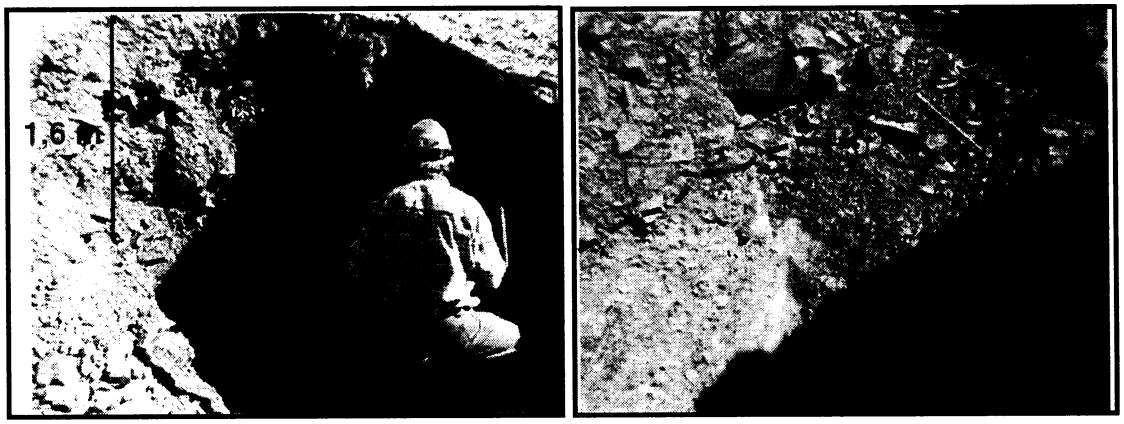


Figure 4.4 : Photos de la tranchée près de la grille d'étude montrant les deux types de matériaux observés (2003)

Quelques autres structures peuvent être observées sur les profils d'inversion, notamment une extension en profondeur de la zone résistive, à l'est, sur les profils X25a et X30a. Une autre zone similaire est présente à l'ouest, sur le profil X30a. Dans ce cas, cette anomalie pourrait être causée par un effet topographique dû à la présence d'un talus qui élève le terrain d'environ 1 mètre à partir de la position y = 25 mètres.

Afin d'avoir une meilleure représentation de la distribution de la résistivité dans l'espace, une inversion 3D de type standard a été exécutée sur les données à l'aide du logiciel RES3DINV de Geotomo Software (2002b). Il est important de spécifier que cette inversion a été faite pour complémenter les inversions 2D puisque l'acquisition des données s'est faite sous la forme de profils 2D et non selon un mode tridimensionnel. Par conséquent, l'inversion 3D n'est qu'approximative, d'autant plus que les profils sont espacés de 5 mètres dans la direction de l'axe des x. La figure 4.5 montre les résultats de cette inversion où l'on voit le modèle de résistivité 3D en fonction de la profondeur.

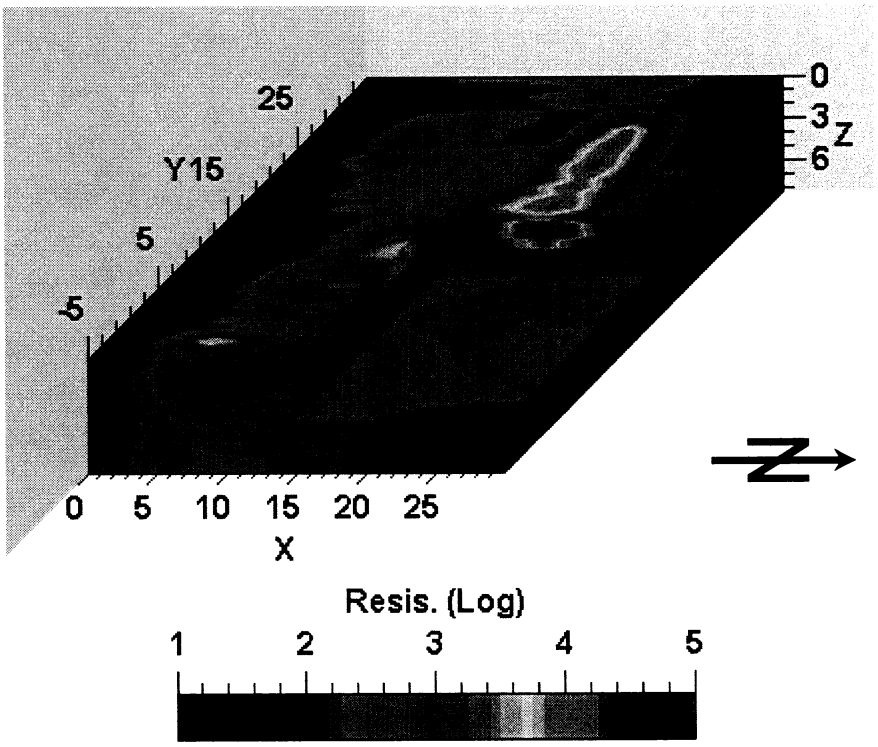


Figure 4.5 : Inversion 3D des données de résistivité de la phase I par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; (dimensions en mètres)

Les résultats de l'inversion 3D confirment les observations faites pour les profils d'inversion 2D, soit la présence d'une zone plus résistive au nord de la zone d'étude. Cependant, la résolution selon l'axe des x est faible ce qui crée une anisotropie directionnelle puisque le taux d'échantillonnage est beaucoup plus élevé selon l'axe des y (points de mesure au 1 mètre) que selon l'axe des x (aux 5 mètres). Cela a tendance à donner aux structures une forme allongée dans le sens de l'axe des y, ce qui n'est pas nécessairement le cas dans la réalité.

4.2.3 Modélisation de l'essai d'infiltration

4.2.3.1 Génération du modèle

En vue des mesures géophysiques effectuées lors de l'essai d'infiltration d'eau durant la phase II des travaux, des simulations numériques ont été effectuées afin d'évaluer l'applicabilité de la méthode sur les conditions présentes à la halde à stériles de la mine Laronde.

Le logiciel RES3DMOD, qui est distribué par Geotomo Software (2001), a été utilisé pour générer un modèle tridimensionnel par différences finies d'une portion de la halde. Les résultats obtenus lors de la Phase I des travaux ont été utilisés pour définir les propriétés électriques du modèle. Par conséquent, le modèle est composé de deux couches représentant de façon simplifiée la stratification observée lors de la Phase I des travaux. La couche supérieure possède des résistivités élevées variant entre 1000 et 2000 Ωm et la couche inférieure a une résistivité plus faible, soit 200 Ωm. La figure 4.6 montre une vue tridimensionnelle de ce modèle. De plus, les paramètres du modèle sont présentés au tableau 4.2.

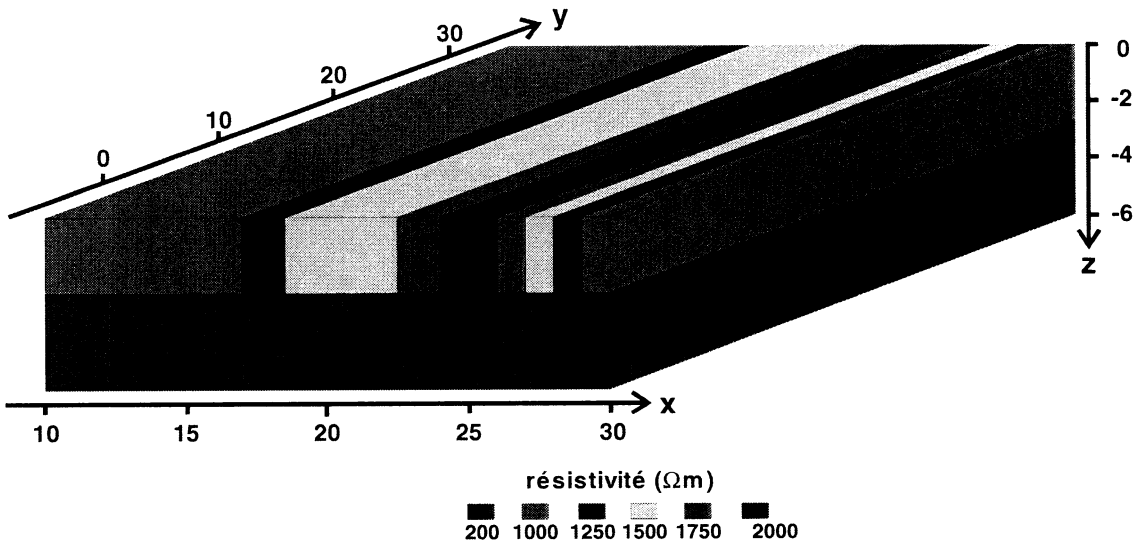


Figure 4.6 : Modèle utilisé pour la modélisation numérique de la résistivité des stériles (dimensions en mètres)

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle utilisé pour la modélisation numérique de l'effet d'un essai d'infiltration sur la résistivité des stériles

		nombre de nœuds	espacement entre les nœuds (m)	espacement entre les électrodes (m)
direction	x	41	0,5	1,0
	y	81	0,5	1,0
	z	11	croissance exponentielle	-

Une fois le modèle généré, RES3DMOD calcule la résistivité apparente qui serait mesurée par la grille d'électrodes définie dans les paramètres du modèle. Dans ce cas-ci, la configuration d'électrodes qui a été simulée est la configuration Wenner alpha classique qui a été également utilisée sur le terrain. Afin d'avoir des données plus rapprochées de ce que l'on pourrait obtenir sur le terrain, un niveau de bruit égal à 5 % est ajouté à la réponse du modèle. La figure 4.7 montre ainsi les profils de résistivité apparente extraits du modèle où l'on peut voir la variation de la résistivité en fonction de la profondeur.

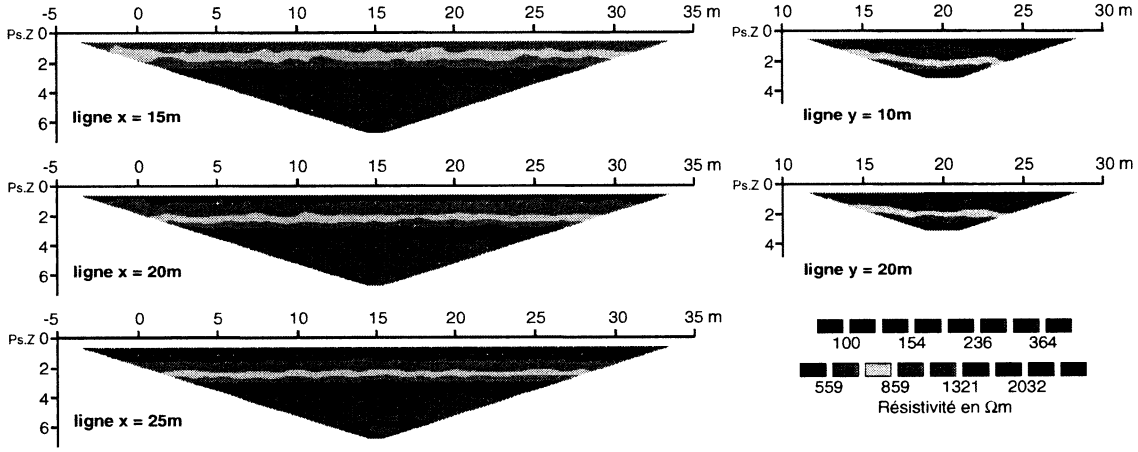


Figure 4.7 : Profils de résistivité apparente extraits du modèle montrant la variation de résistivité en fonction de la profondeur

Afin de simuler l'essai d'infiltration, une nouvelle zone de faible résistivité a été introduite dans le modèle. Cette dernière a été fixée à 100 Ωm et correspond à la résistivité d'un gravier saturé avec une porosité moyenne de 40% et une résistivité de l'eau de 32,5 Ωm tel que calculé avec la formule d'Archie avec les paramètres a = 0,88

et m = 1,37 correspondant à un matériau détritique faiblement cimenté avec une porosité entre 25 et 45% (Chouteau, 2001). De plus, la zone affectée par ce changement possède les mêmes dimensions et la même localisation que le bassin construit sur la halde de la mine Laronde. La figure 4.8 montre le modèle de résistivité modifié où l'on peut voir l'emplacement de la zone d'infiltration.

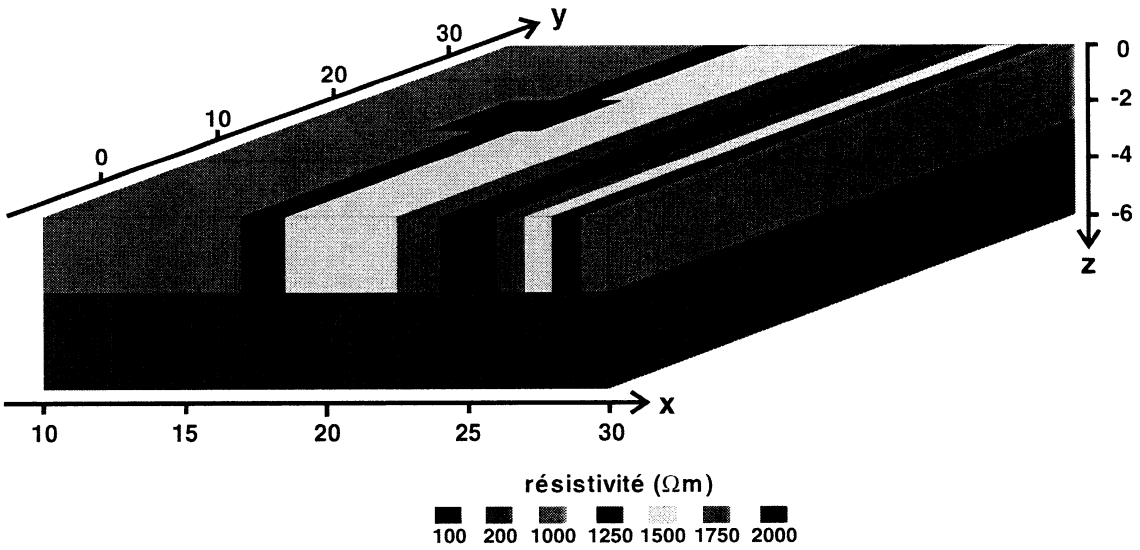


Figure 4.8 : Modèle modifié utilisé pour la modélisation numérique afin de simuler l'essai d'infiltration dans les stériles (dimensions en mètres)

Quatre modèles différents ont été générés à partir de cette modification afin de simuler des fronts de mouillage atteignant des profondeurs différentes dans la halde. Les fronts de mouillage pour chaque modèle sont de 0,42m, 0,96m, 1,92m et 2,64m respectivement en supposant un écoulement vertical. Ces valeurs ont été imposées par le modèle généré par RES3DMOD, car la grandeur des cellules du modèle dans la direction verticale est faite de façon automatique par le logiciel. Tout comme pour le modèle initial, les résistivités apparentes ont été calculées pour chacun de ces modèles avec un niveau de bruit de 5 %.

4.2.3.2 Inversion des profils de résistivité apparente

De façon à comparer les résultats de la simulation avec les mesures de terrain, des profils de résistivité apparente ont été extraits des modèles afin d'être soumis à

l'inversion numérique 2D (à l'aide de RES2DINV) tout comme les données réelles. Ces profils ont été par la suite soumis à une inversion numérique de type « time-lapse » en prenant le modèle initial comme référence. Cinq profils de référence ont été soumis à l'inversion, soit les lignes x = 15m, x = 20m, x = 25m, y = 10m et y = 20m. Ces dernières étant les lignes les plus rapprochées du bassin et par conséquent, celles qui risquent le plus d'être affectées par l'infiltration de l'eau. Les figures 4.9 à 4.18 montrent les résultats de ces inversions numériques, ainsi que les rapports de résistivité par rapport au modèle initial. Les profils d'inversion numérique présentés dans ces figures montrent l'influence de l'essai d'infiltration sur la résistivité des matériaux en fonction de la profondeur au fur et à mesure que le front de mouillage progresse dans la halde. Les profils de rapport de résistivité présentés dans ces figures montrent la proportion, en pourcent, de la distribution de résistivité en fonction de la profondeur entre les modèles avec le front de mouillage et le modèle initial sans front de mouillage. Ce type de présentation permet d'identifier les zones où l'on observe des variations par rapport au modèle initial, soit des valeurs inférieures à 100% dans le cas d'une baisse de la résistivité et des valeurs supérieures à 100% dans le cas d'une augmentation de la résistivité. Les figures 4.9 à 4.14 présentent des profils est-ouest, parallèles à l'axe des y, tandis que les figures 4.15 à 4.19 présentent des profils nord-sud, parallèles à l'axe des x.

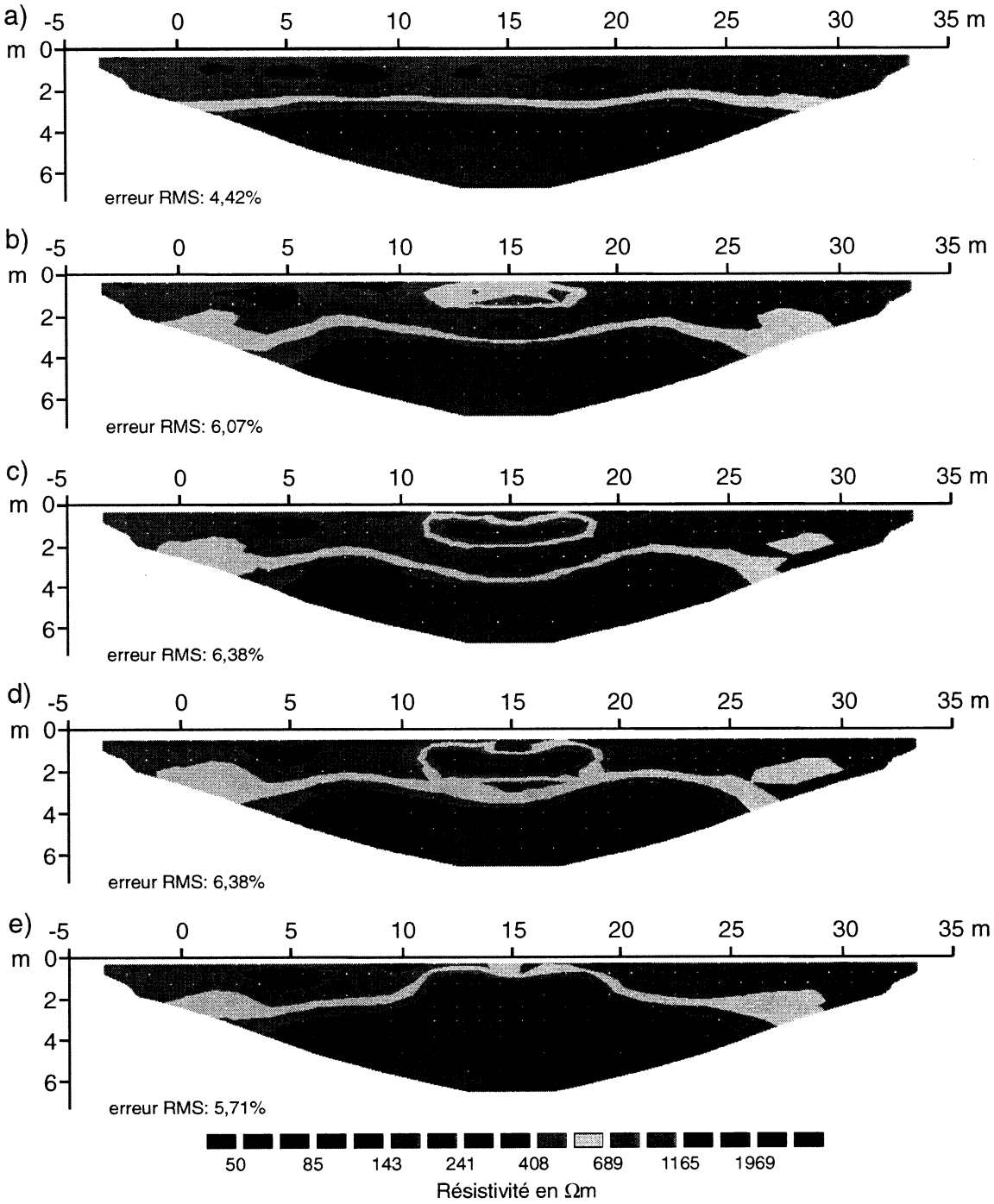


Figure 4.9 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse » , profil x = 15m; a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m

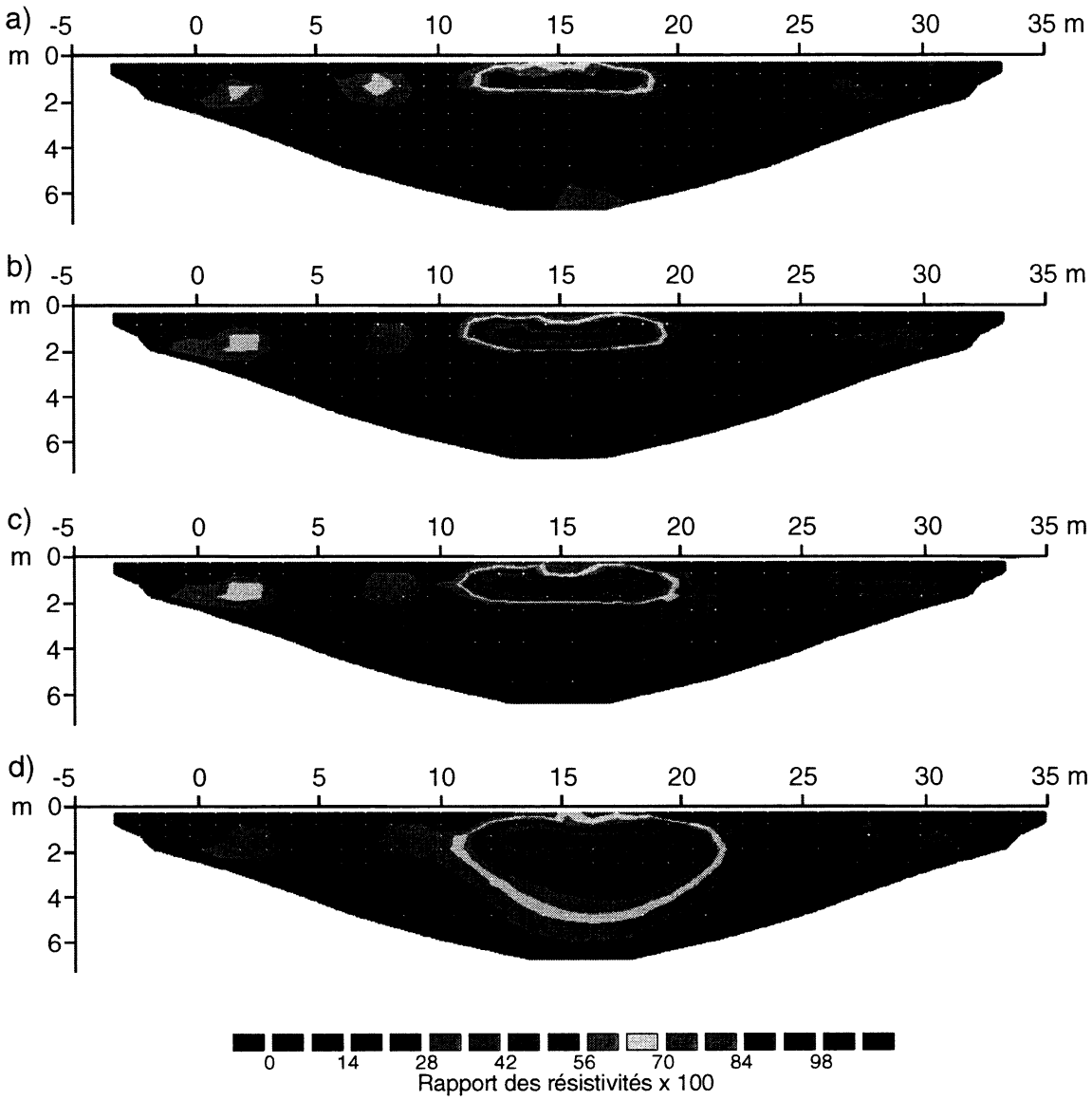


Figure 4.10 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 15m; a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m

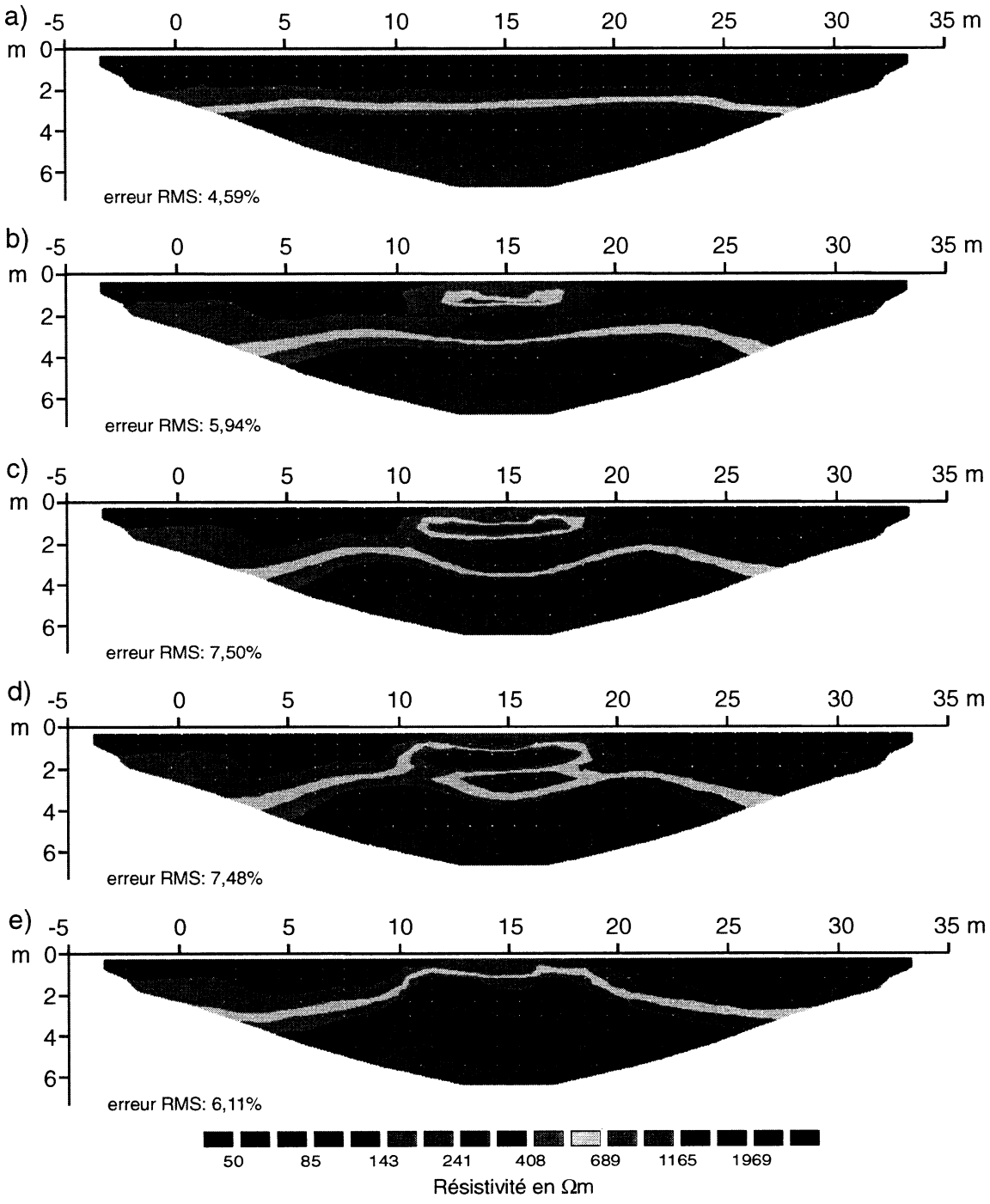


Figure 4.11 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil x = 20m; a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m

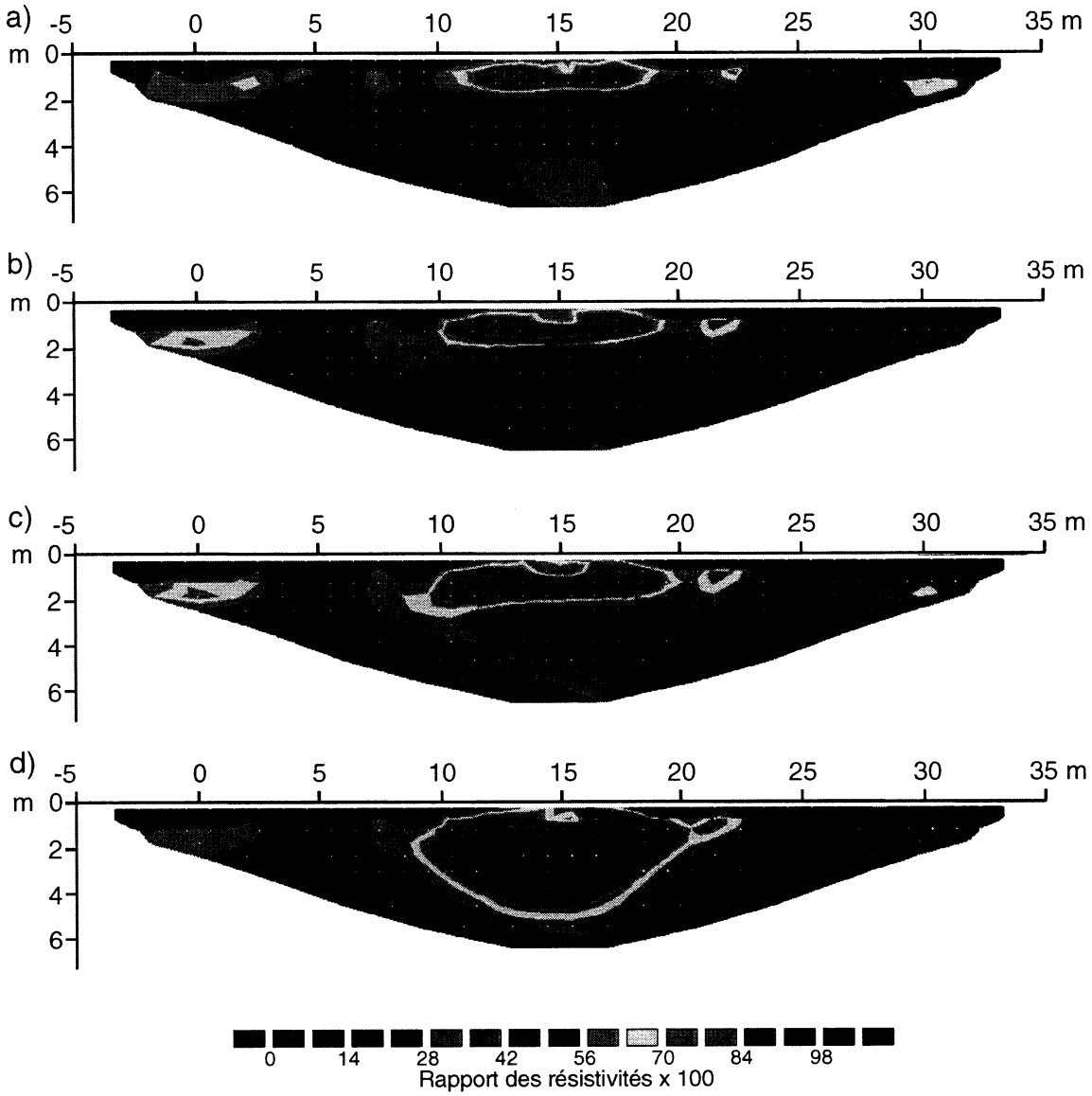


Figure 4.12 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 20m; a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m

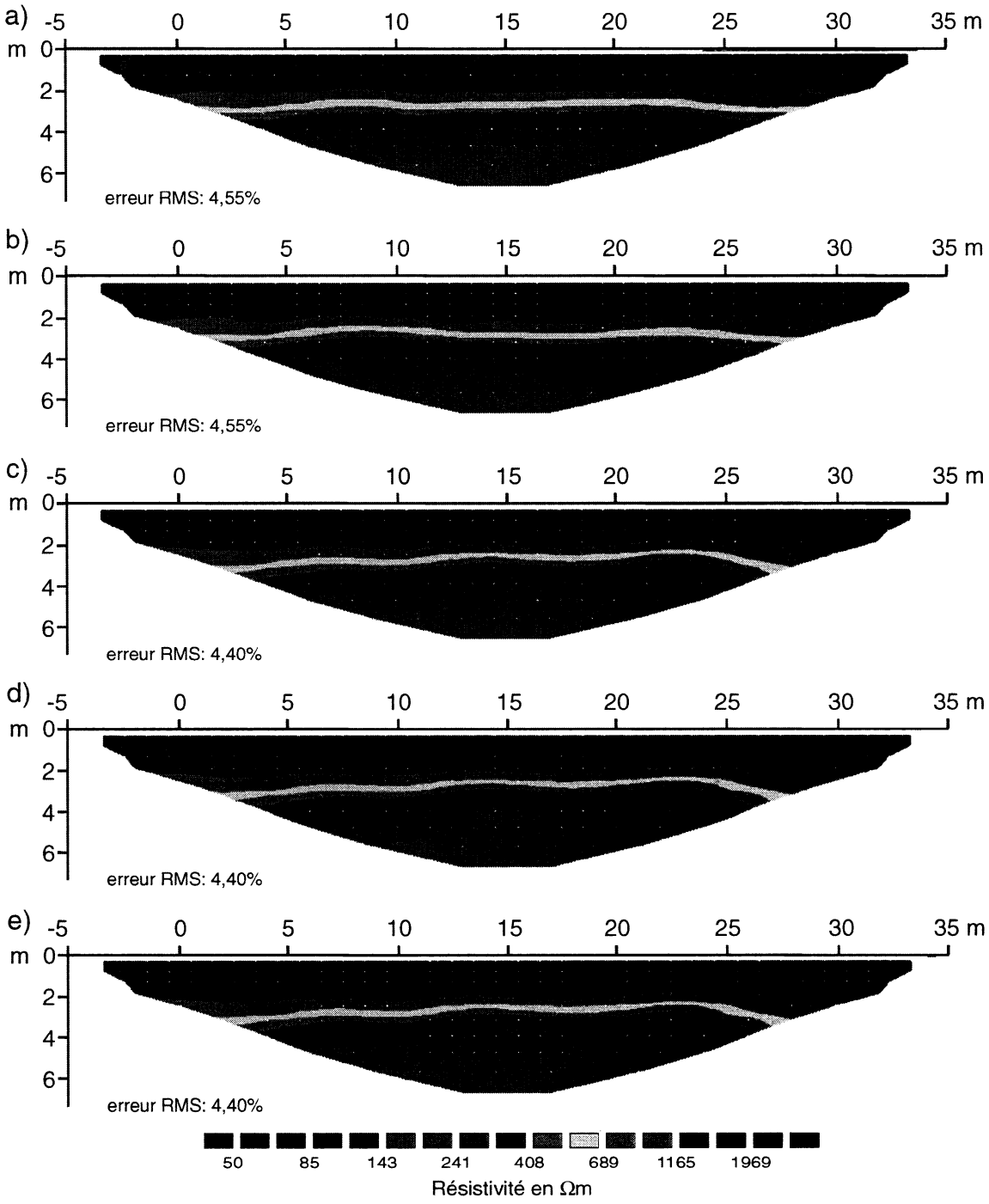


Figure 4.13 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil x = 25m; a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m

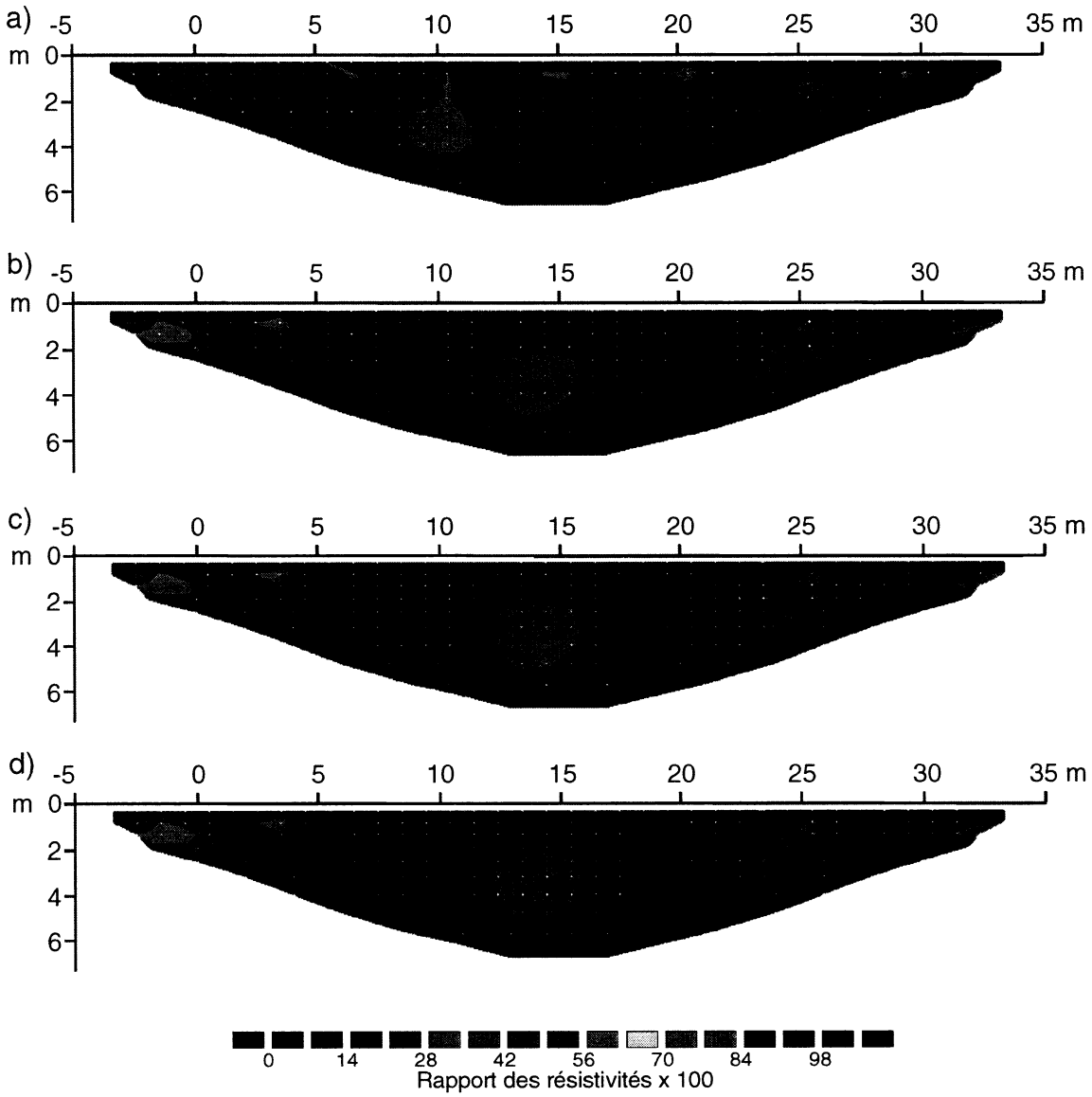


Figure 4.14 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil x = 25m; a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m

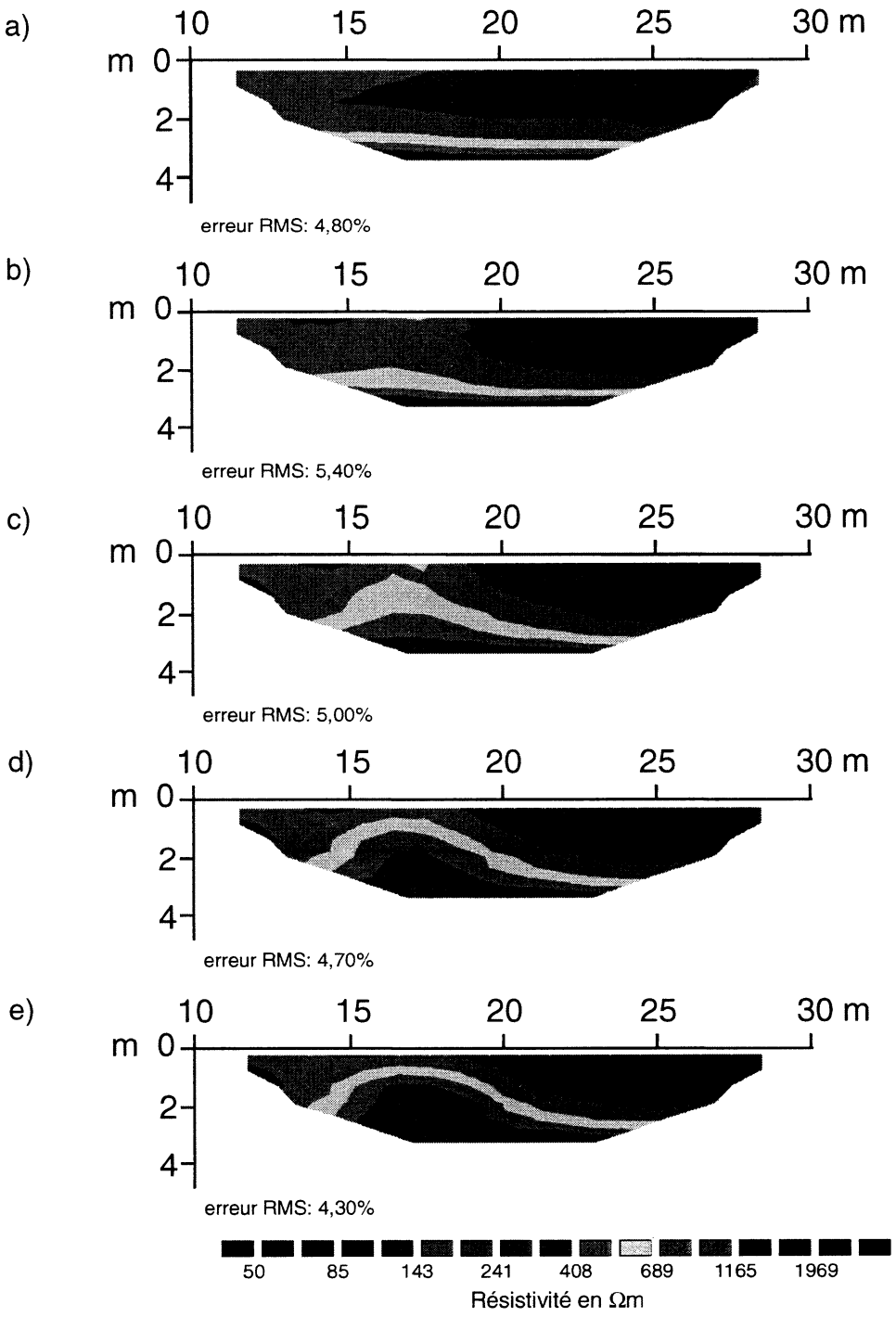


Figure 4.15 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil y = 10m; a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m

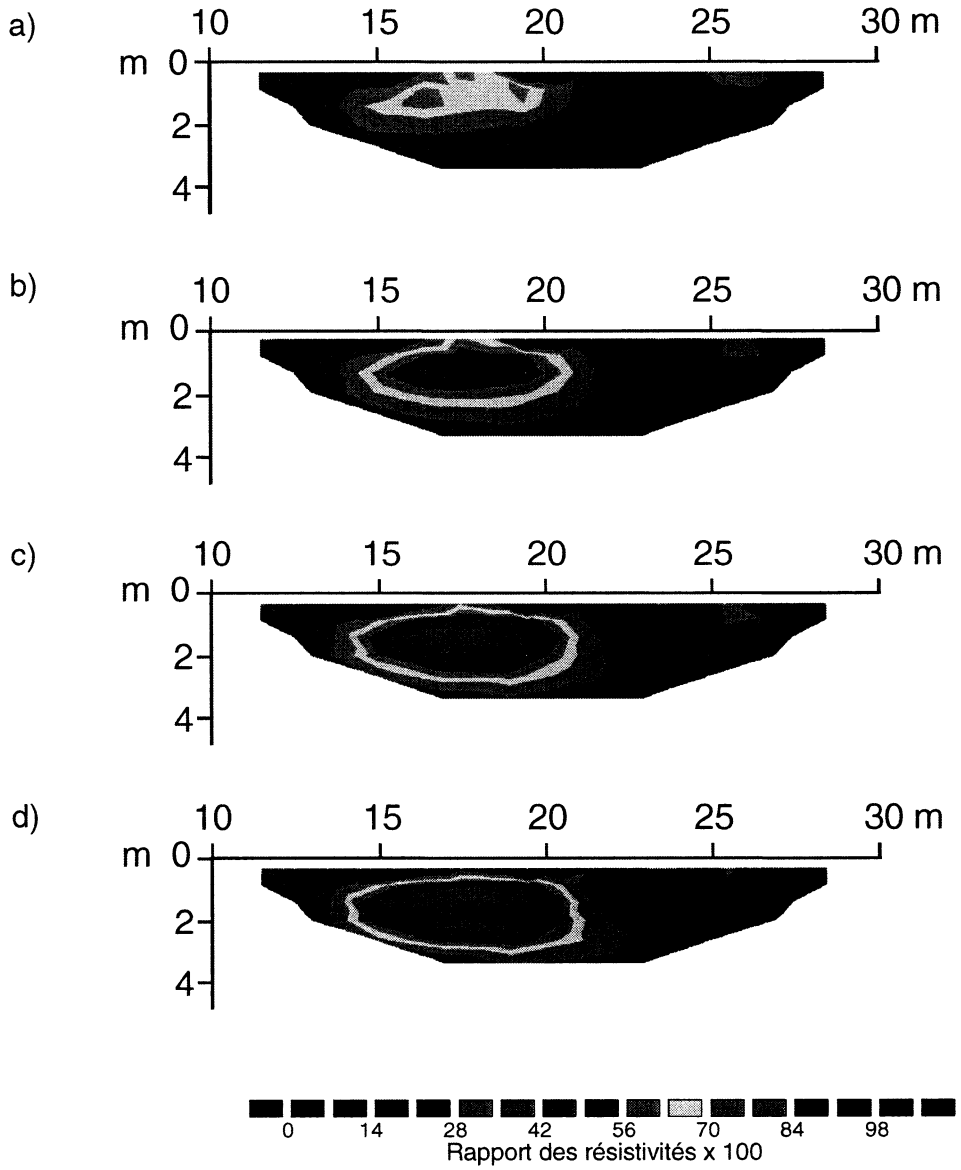


Figure 4.16 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil y = 10m; a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m

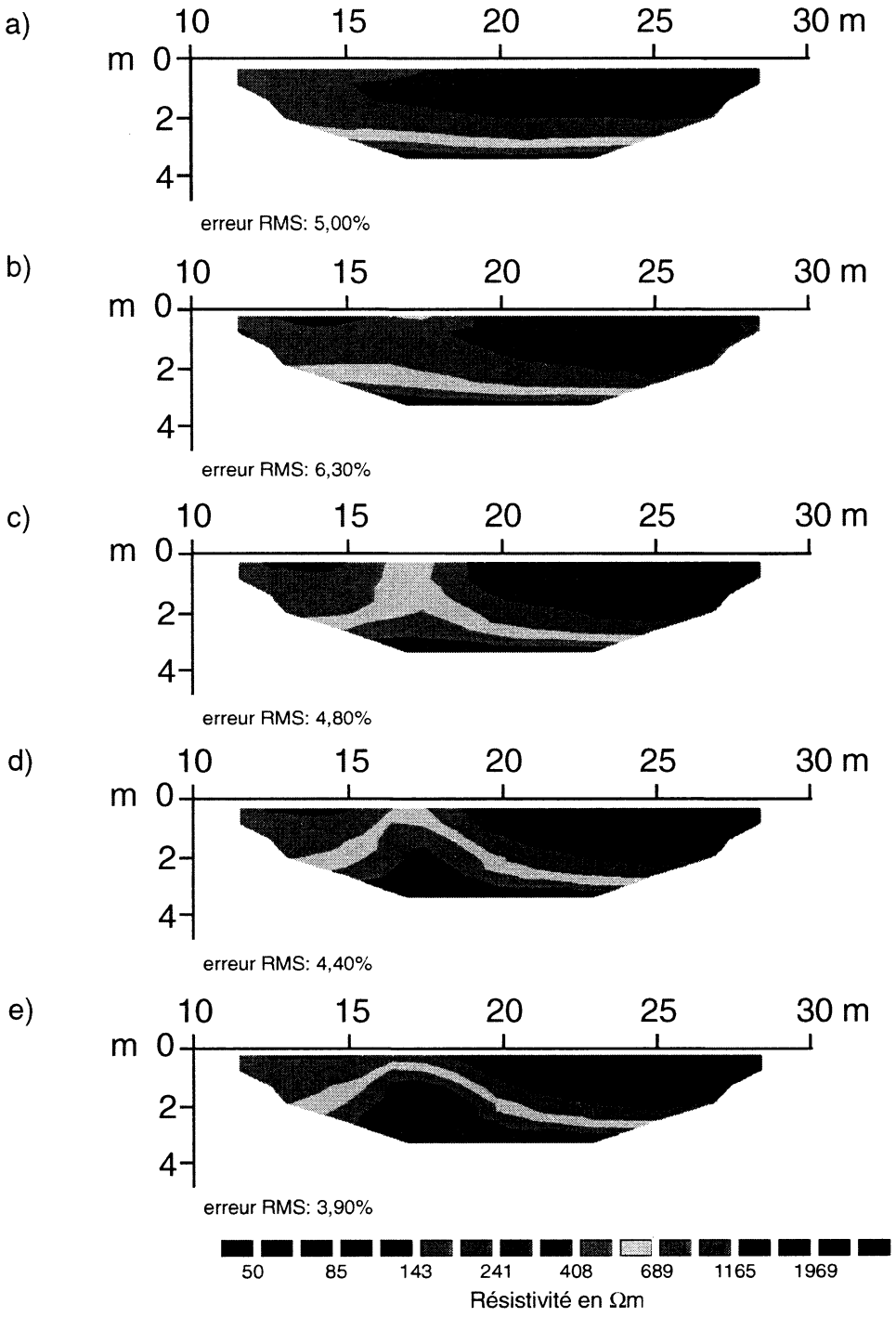


Figure 4.17 : Résultats d'inversion numérique par méthode « time-lapse », profil y = 20m; a) modèle initial, b) front de mouillage à 0,42m, c) front de mouillage à 0,96m, d) front de mouillage à 1,92m et e) front de mouillage à 2,64m

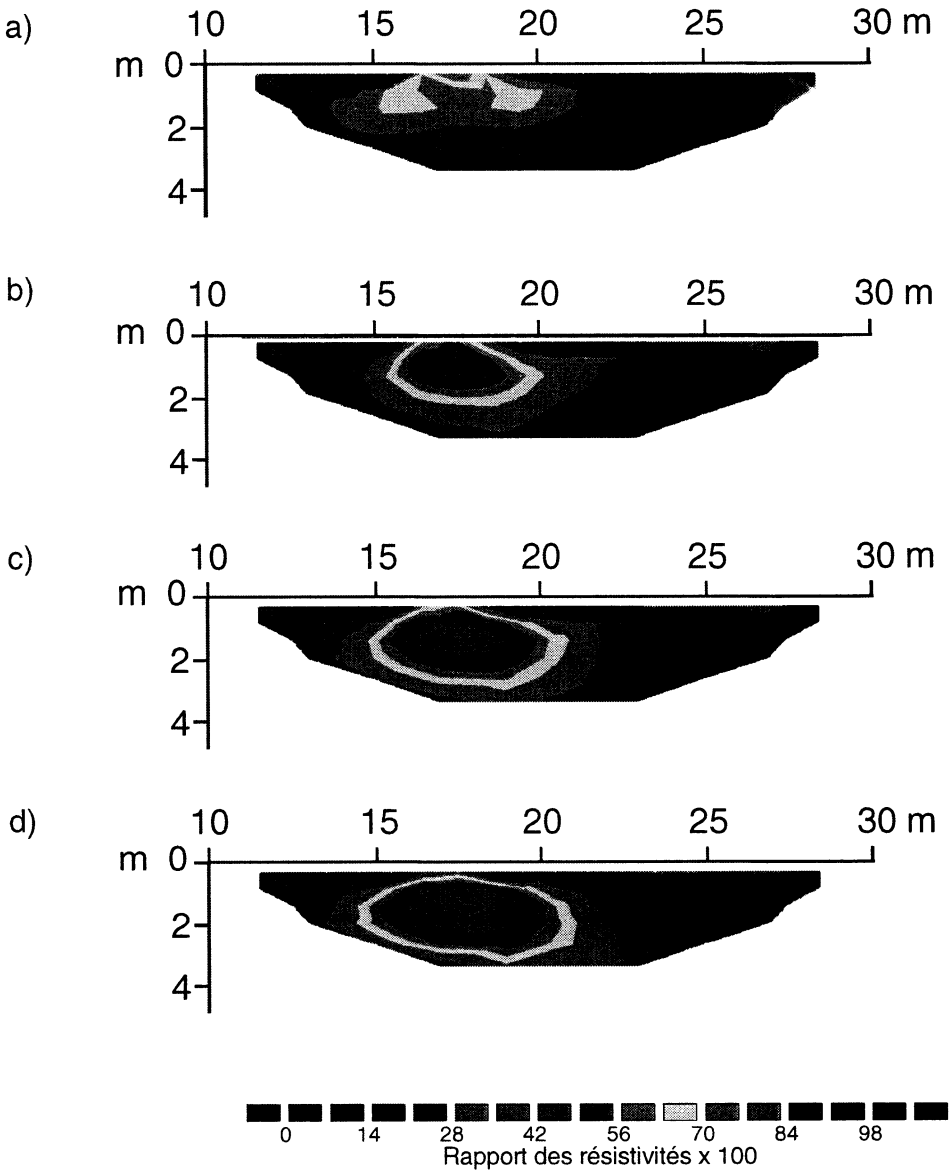


Figure 4.18 : Rapport des résistivités par rapport au modèle initial, profil y = 20m; a) front de mouillage à 0,42m, b) front de mouillage à 0,96m, c) front de mouillage à 1,92m et d) front de mouillage à 2,64m

Les simulations numériques montrent que la présence d'eau dans le sol affecte la résistivité de ce dernier même lorsque le front de mouillage se situe à une profondeur aussi faible que 0,42 m (e.g. figures 4.9b et 4.10a). La présence de cette zone à faible résistivité cause une importante diminution de la résistivité du sol pour les profils situés près du bassin d'infiltration. Cependant, bien qu'on observe une légère diminution de la résistivité du sol dans le cas du profil situé à cinq mètres du bassin (figures 4.13 et 4.14 : profil x = 25m), il est difficile d'affirmer que cette diminution soit due à la présence de la zone d'infiltration. En effet, une chute de résistivité d'environ 20% par rapport au modèle initial est présente à une profondeur d'environ 3 mètres dans les limites du bassin d'infiltration (entre les positions y = 10m et y = 20m), mais une autre zone similaire est aussi présente aux environs de la position y = 25m qui ne pourrait pas être expliquée par la présence de la zone d'infiltration puisqu'elle n'apparaît pas sur les profils situés plus près du bassin. Ces variations de la résistivité pourraient être dues au bruit ambiant rajouté sur les profils de résistivité apparente qui ont été utilisés pour faire les inversions numériques. Une autre cause possible de ces variations sont les effets numériques résultant de l'inversion.

Lorsque le front de mouillage est plus profond, la zone affectée montre des chutes de résistivité pouvant aller jusqu'à 80% par rapport au modèle initial. Cette zone affectée se limite plus où moins aux limites de la zone d'infiltration dans le plan x-y. Cependant, le panache semble atteindre des profondeurs légèrement supérieures au front de mouillage du modèle lorsque ce dernier atteint la couche inférieure qui possède une faible résistivité (e.g. figures 4.9e et 4.10d). Notons aussi que les profils d'inversion numérique montrent que la variation de résistivité causée par la zone d'infiltration est graduelle et non franche. Il y a donc une incertitude quand à la position du front de mouillage.

Les profils x = 15m et x = 20 m (figures 4.10 et 4.12) montrent aussi des chutes de résistivité systématiques aux extrémités du modèle à une profondeur d'environ 2 mètres. Ces variations semblent être le résultat d'effets de frontière reliés à la discrétisation du modèle.

4.2.4 Résultats phase II

4.2.4.1 Analyse des erreurs

Mesures avant l'essai d'infiltration

Les résultats d'une analyse statistique pour les mesures prises avant l'essai d'infiltration lors de la phase II sont présentés dans le tableau 4.3. Ce tableau présente les statistiques des erreurs des mesures pour chaque profil de résistivité effectué avant l'essai d'infiltration. Des profils montrant des erreurs de mesure élevées indiquent la présence de données douteuses. Des histogrammes de la répartition des erreurs pour chaque profil sont aussi présentés à la figure 4.19. Ces derniers montrent la fréquence des erreurs en fonction de leur grandeur à des intervalles de 0,1%. Ces graphiques servent également à identifier les données douteuses.

Tableau 4.3 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité; phase II avant infiltration

(en %)	Profils						
	X00b	X05b	X10b	X15b	X20b	X25b	X30b
Minimun	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum	0,7680	2,9972	0,0653	0,0505	0,1731	0,0856	79,1589
Moyenne	0,0193	0,0316	0,0126	0,0127	0,0165	0,0185	1,0024
Médiane	0,0134	0,0121	0,0118	0,0125	0,0149	0,0178	0,0989
Écart type	0,0569	0,2192	0,0068	0,0081	0,0149	0,0120	5,8884
Variance	0,003237	0,048030	0,000047	0,000065	0,000221	0,000144	34,673615

Tous ces profils présentent des erreurs de mesures relativement faibles mis à part le profil X30b. La moyenne des erreurs pour ce profil se situe tout juste au dessus de 1%, soit deux ordres de grandeurs plus élevées que les valeurs habituelles. En tout, 13% des points de mesure présentent une erreur supérieure à 1% avec une erreur maximale de 79,16% pour un point de mesure. L'histogramme de la répartition des erreurs pour ce profil (figure 4.19) montre par ailleurs une distribution différente de celle des autres profils. Ces erreurs anormales pour le profil X30b peuvent êtres dues au fait que le profil a été mesuré en fin de journée et par conséquent, lorsque les batteries du système sont à leur niveau le plus bas. La performance du système peut donc être affectée.

Les points de mesure ayant des erreurs excessivement élevées sont éliminés afin de procéder à l'inversion numérique du profil X30b. Une attention particulière devra être apportée à ce profil lors de l'interprétation des résultats puisque la fiabilité de certaines données de ce profil reste douteuse. Dans le cas des autres données, les profils X00b, X10b, X15b, X20b, X25b montrent des erreurs moyennes inférieures à 0,02%. La moyenne des erreurs pour le profil X05b est légèrement supérieure à 0,03% en raison de deux valeurs élevées.

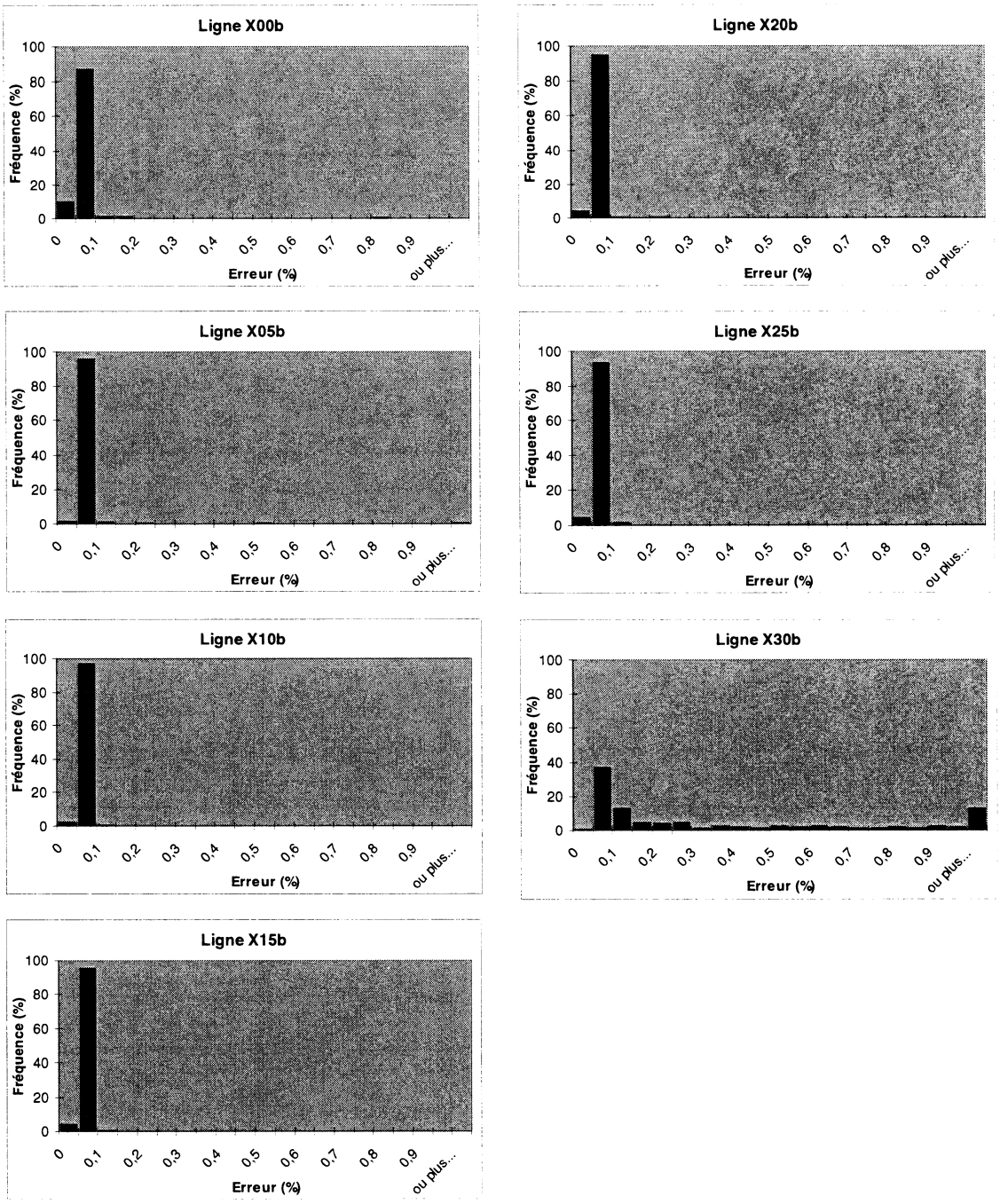


Figure 4.19 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs de mesure pour les profils de résistivité électrique; phase II avant infiltration (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%)

Mesures après l'essai d'infiltration

Les résultats d'une analyse statistique pour les mesures prises après l'essai d'infiltration lors de la phase II sont présentés dans le tableau 4.4. Ce tableau présente les statistiques des erreurs des mesures pour chaque profil effectué après l'essai d'infiltration. Des histogrammes de la répartition des erreurs pour chaque profil sont aussi présentés à la figure 4.20. Ces derniers montrent la fréquence des erreurs en fonction de leur grandeur à des intervalles de 0,1%. Ces graphiques servent également à identifier les données douteuses

Tableau 4.4 : Analyse statistique des erreurs de mesure de résistivité électrique pour chaque profil de résistivité; phase II après infiltration

(en %)	Profils						
	X00c	X05c	X10c	X15c	X20c	X25c	X30c
Minimun	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maximum	0,2498	0,1798	0,7144	0,2731	10,5465	9,6582	2,9855
Moyenne	0,0276	0,0183	0,0286	0,0319	0,4066	0,1475	0,0525
Médiane	0,0160	0,0132	0,0133	0,0172	0,0549	0,0229	0,0168
Écart type	0,0368	0,0222	0,0737	0,0406	1,2467	0,7362	0,2257
Variance	0,001355	0,000495	0,005439	0,001647	1,554162	0,541972	0,050960

De façon générale, les erreurs de mesure pour cette série de mesures sont légèrement plus élevées que pour les deux autres séries (phase I et phase II avant infiltration). Les profils où cette hausse est la plus remarquée sont les profils X20c et X25c. Ces derniers montrent quelques points ayant des erreurs au dessus de 1%.

Une hypothèse qui peut être amenée pour expliquer ces augmentations de l'erreur de mesure pour les mesures après l'essai d'infiltration est l'influence de l'infiltration de l'eau sur les propriétés électriques du milieu. En effet, contrairement aux deux autres séries de mesures qui ont été menées dans des conditions statiques, cette troisième série de mesures a été faite en présence de mouvements d'eau au sein de la halde. Par conséquent, la réponse globale du milieu à l'injection de courant peut varier en fonction du temps et du coup, créer une plus grande variabilité dans les potentiels mesurés par l'appareil. L'augmentation de l'erreur des mesures peut également être due à la polarisation des électrodes qui passent de points d'injection à des points de mesure de potentiel durant le protocole d'acquisition.

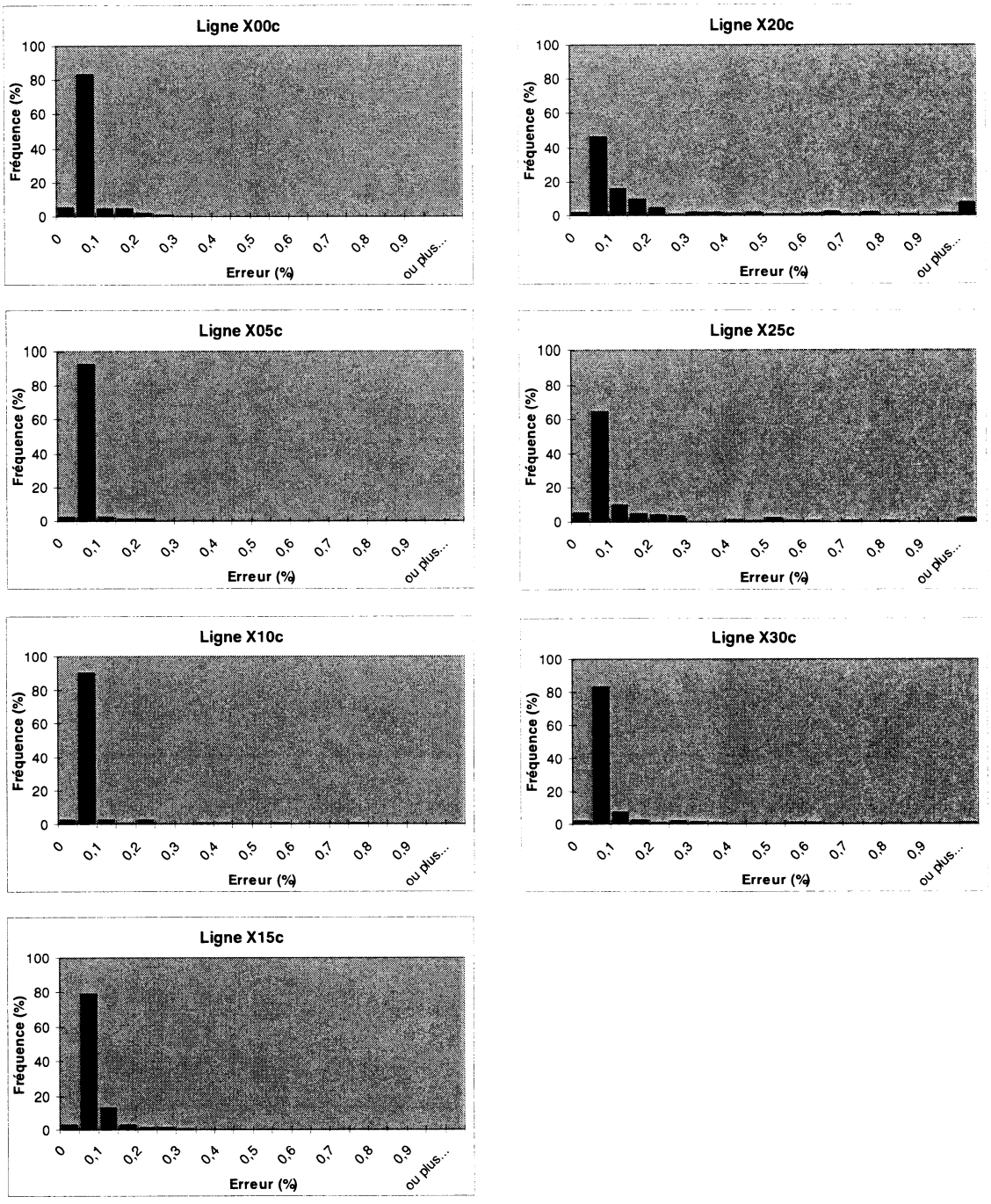


Figure 4.20 : Histogrammes de répartition de la grandeur des erreurs pour les profils de résistivité électrique; phase II après infiltration (fréquence des erreurs à des intervalles de 0,1%)

4.2.4.2 Inversion des données de résistivité apparente

Trois types d'inversion ont été appliqués aux données de la phase II, soit l'inversion standard, l'inversion robuste et l'inversion « time-lapse ». La figure 4.21 montre les profils d'inversion par la méthode standard pour les profils mesurés avant l'essai d'infiltration. Ces profils permettent de voir le modèle de distribution de la résistivité dans les stériles obtenus par inversion numérique en fonction de la profondeur. L'erreur RMS correspond à l'erreur par moindres carrées entre les données réelles et les valeurs obtenues avec le modèle. La figure 4.22 présente les profils d'inversion pour la méthode robuste. Ces profils permettent de voir un modèle de distribution de la résistivité similaire à la méthode standard, mais avec un contact plus franc entre les différentes lithologies. Dans le cas de la méthode robuste, l'erreur est exprimée en erreur absolue entre les données réelles et les valeurs obtenues avec le modèle. Les résultats d'inversion pour les profils mesurés après le début de l'essai d'infiltration sont montrés de façon similaire aux figures 4.23 et 4.24. Ces résultats permettent de voir l'influence de l'essai d'infiltration sur la résistivité des stériles par comparaison avec les profils avant infiltration. Les périodes de mesure par rapport aux périodes d'infiltration ont été présentées à la figure 3.13. La configuration Wenner à 41 électrodes espacées de 1 mètre a permis d'obtenir des modèles jusqu'à une profondeur d'environ 6 mètres. Les résultats des inversions de type « time-lapse » seront présentés plus loin dans cette section.

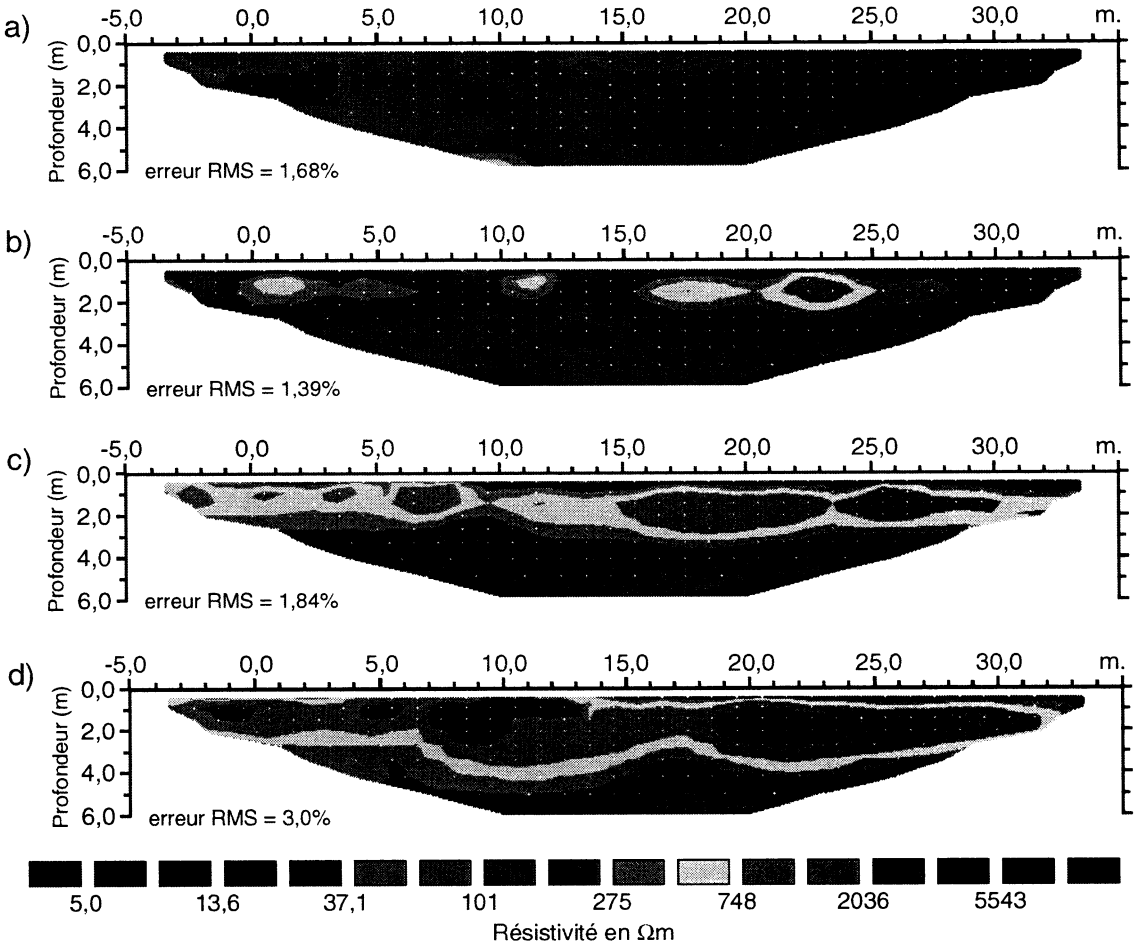


Figure 4.21: Profils d'inversion de résistivité par méthode standard pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

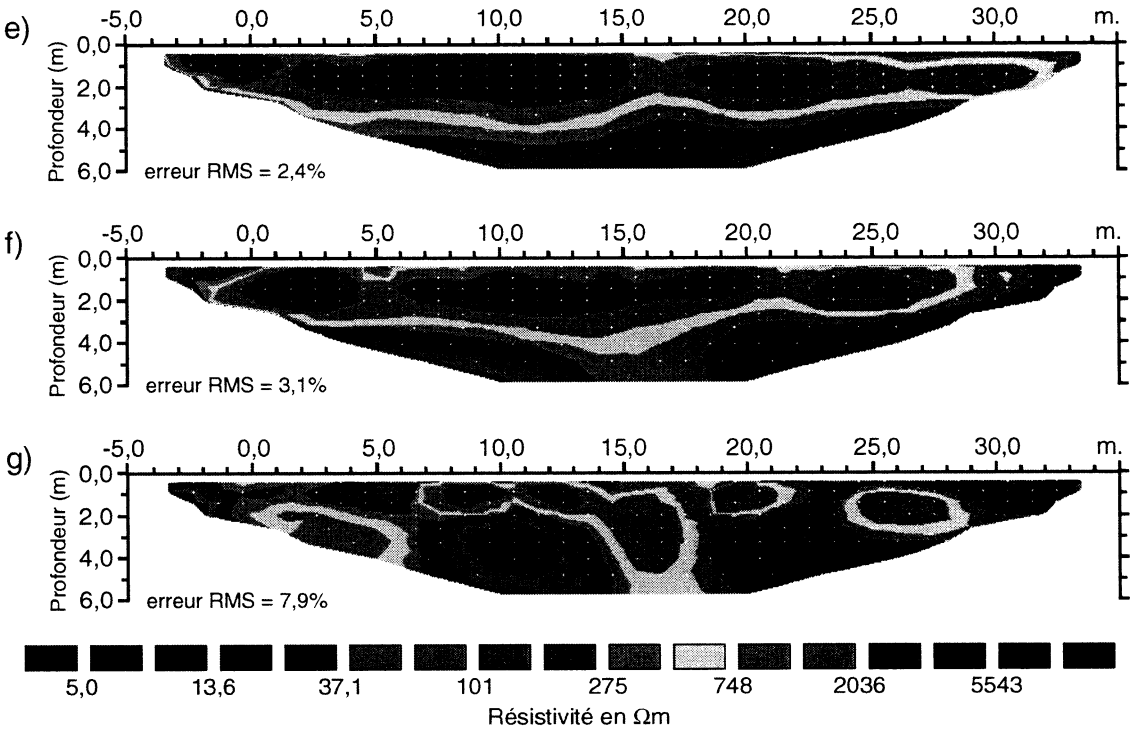


Figure 4.21 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode standard pour les mesures avant l'infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

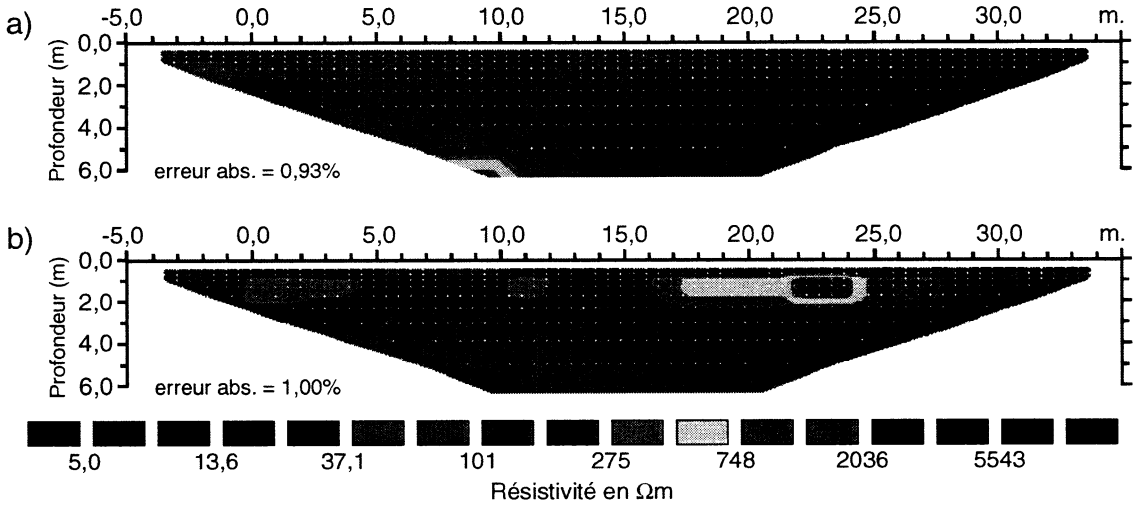


Figure 4.22 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

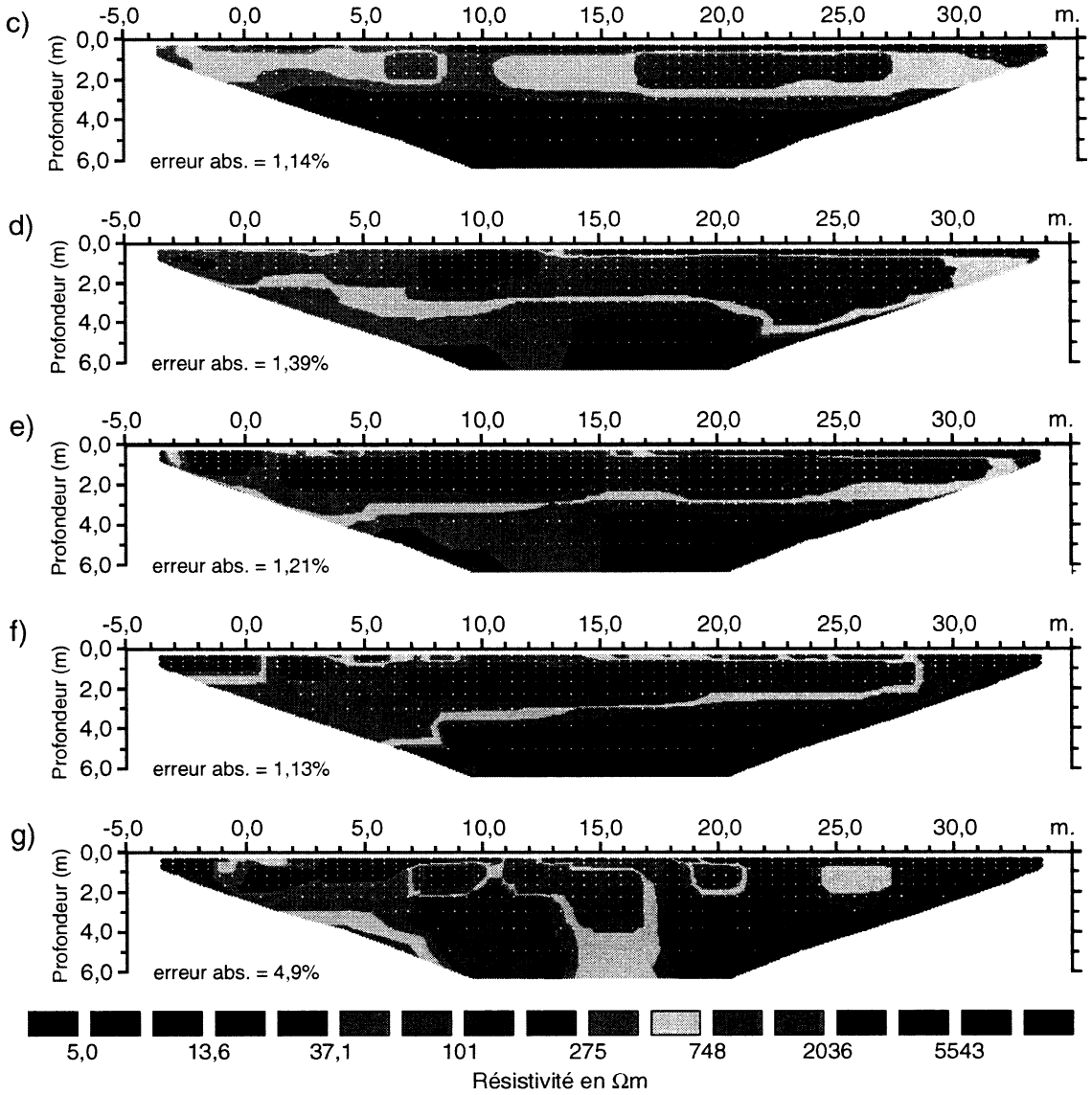


Figure 4.22 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

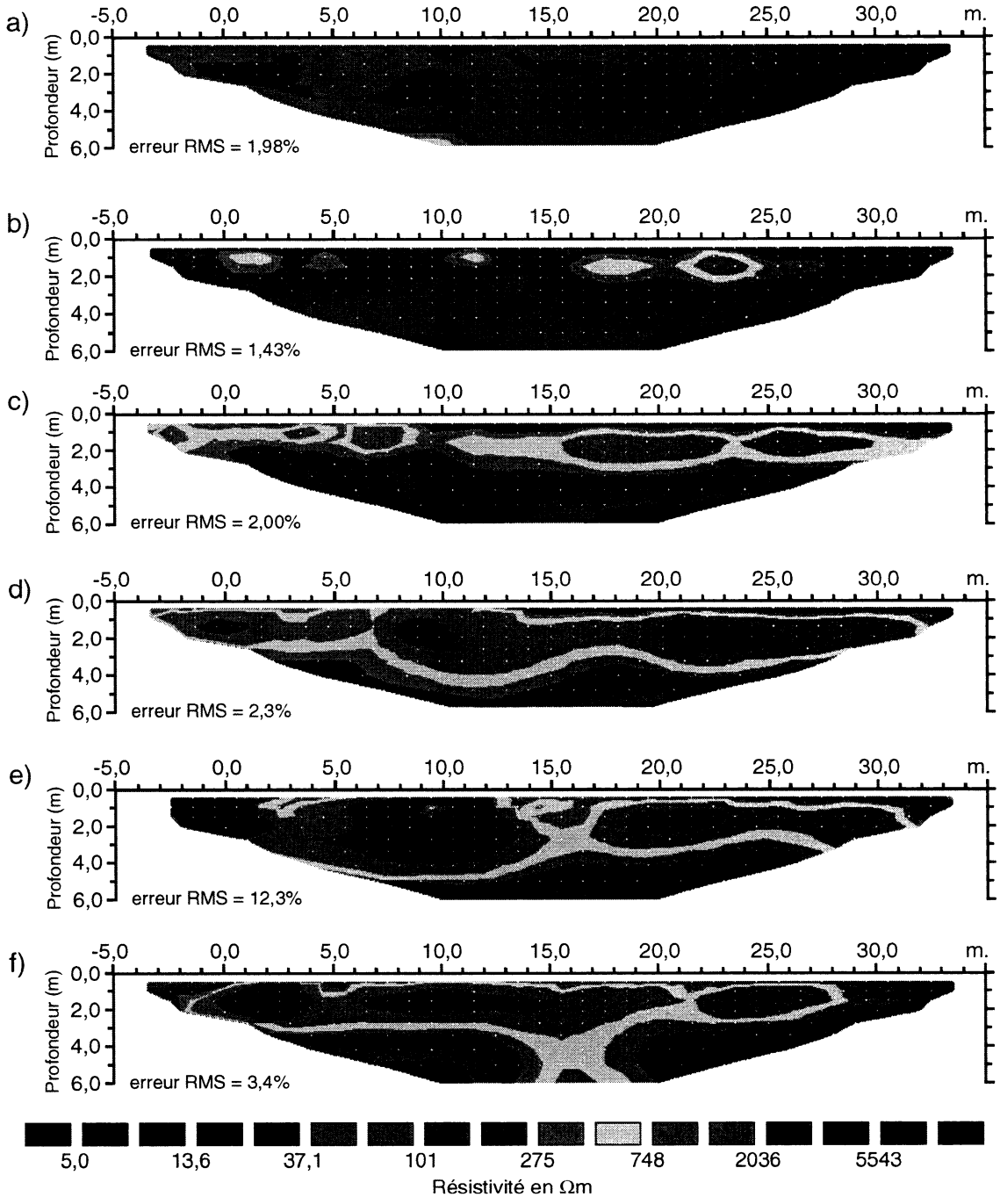


Figure 4.23 : Profils d'inversion de résistivité par méthode type standard pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

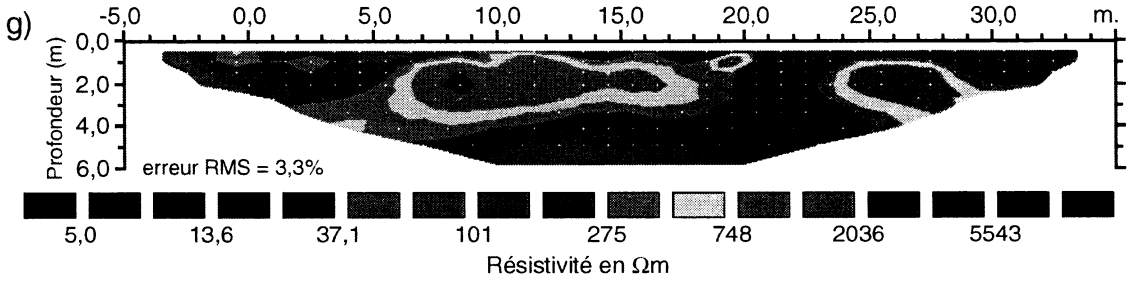


Figure 4.23 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode standard pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

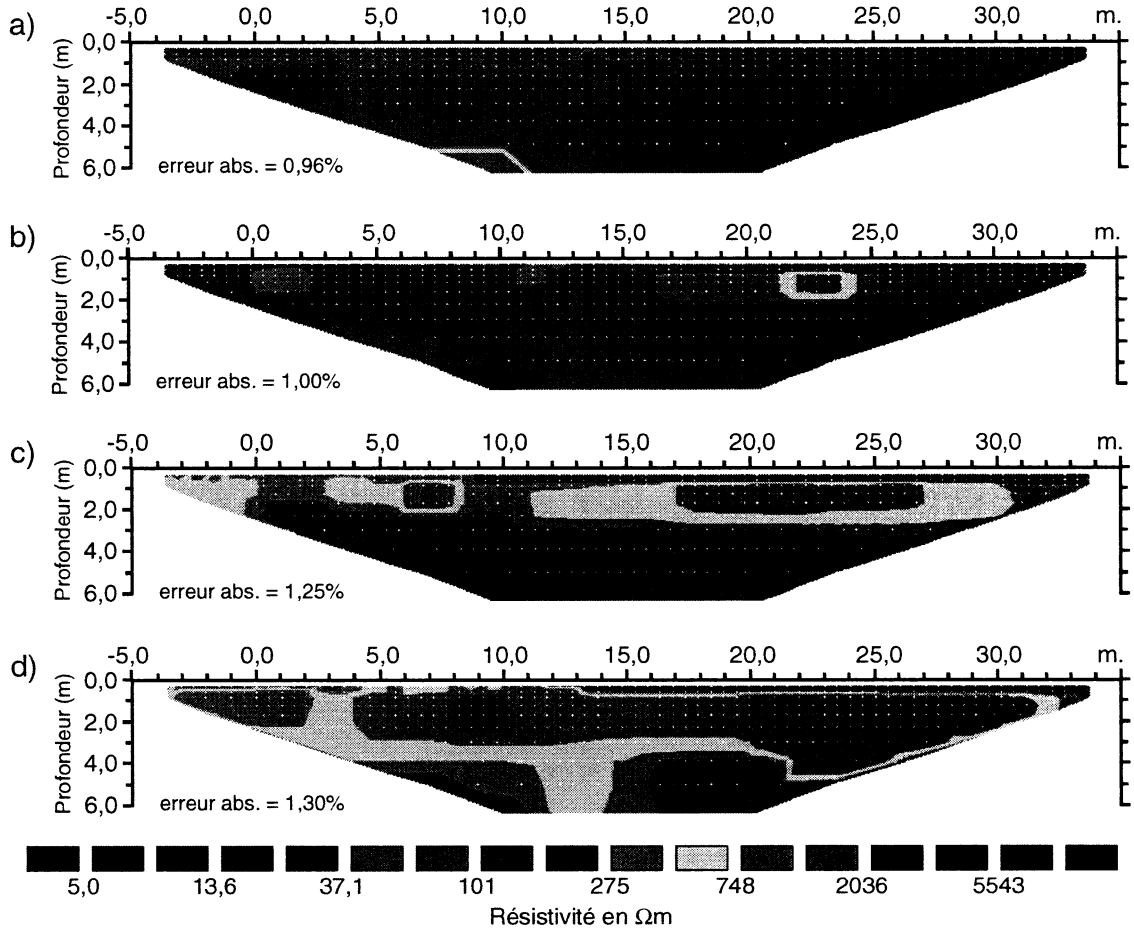


Figure 4.24 : Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

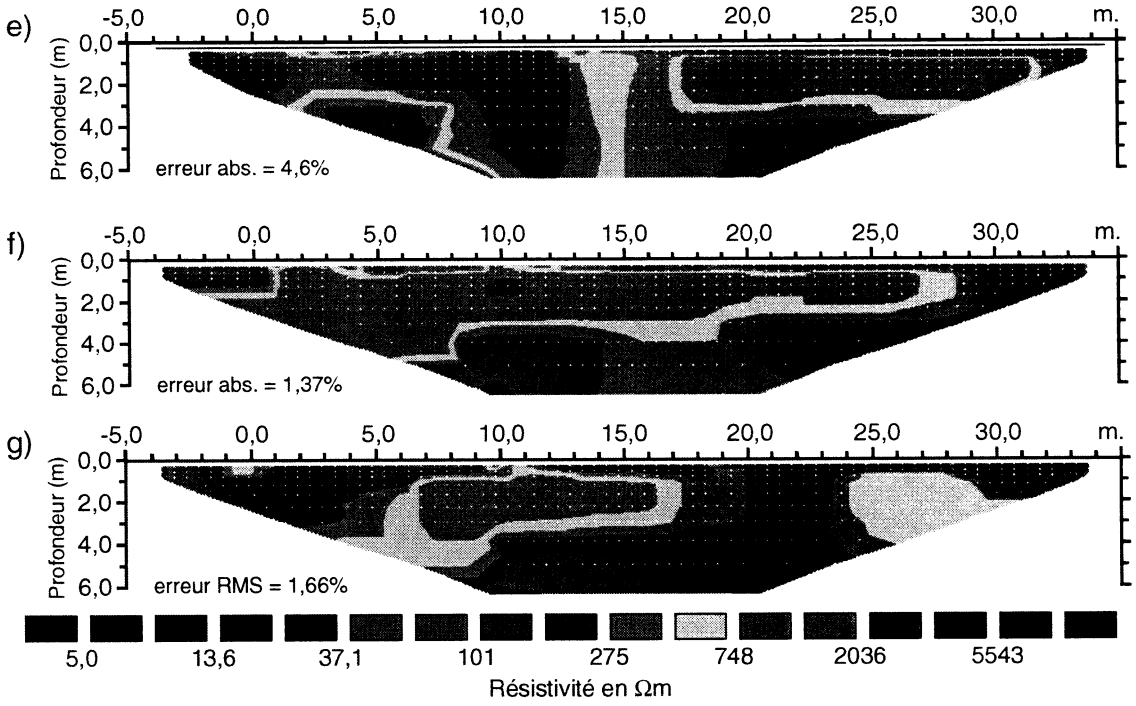


Figure 4.24 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode robuste pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

Observations générales

De façon générale, les profils d'inversion standard et robuste pour la phase II montrent les mêmes structures qui ont été observées lors de la première série de mesures sur le terrain. Ces résultats confirment donc les informations structurales présentées à la section 4.2.2.2.

Une anomalie marquante se distingue cependant sur le profil X30b, à la position y = 10m, où l'on observe une forte baisse de la résistivité dans une zone circulaire d'environ 4 mètres de diamètre dont le centre se situe approximativement à 3,5 mètres sous la surface. Cependant, plusieurs indices laissent croire que cette anomalie résulte d'erreurs de mesure et non d'un changement dans les propriétés électriques des stériles. Tout d'abord, l'analyse des erreurs à la section 4.2.4.1 a montré des erreurs

très élevées pour ce profil, ce qui est typique d'une série de mesures problématique. Ensuite, cette anomalie n'est pas du tout présente sur les profils X30c bien que ces deux profils aient été mesurés à moins de 48 heures d'intervalle. De plus, le profil X30c est très similaire au profil X30a. Enfin, une telle anomalie pourrait avoir un effet sur les profils adjacents, ce qui n'est pas le cas.

L'inversion des données de la phase II ont aussi été effectuées à l'aide du logiciel RES3DINV. Les résultats de ce type d'inversion sont présentés à la figure 4.25. Cette figure montre les modèles de résistivité 3D en fonction de la profondeur obtenus pour les mesures effectuées avant l'infiltration (fig. 4.25a) et pour les mesures effectuées après l'infiltration (fig. 4.25b). Comme dans le cas des résultats obtenus pour la phase I, les inversions 3D sont utiles pour une visualisation plus générale des résultats, mais elles n'apportent pas vraiment d'informations complémentaires aux inversions 2D.

Effets de l'essai d'infiltration

De manière générale, on constate que l'exécution d'un essai d'infiltration d'eau engendre une légère diminution de la résistivité du sol, cette dernière étant plus marquée près de la zone d'infiltration (profils X15, X20 et X25). Cependant, les profils d'inversion ne permettent pas de délimiter clairement une zone d'influence de l'essai d'infiltration sur la résistivité du sol. Une quantification plus détaillée de l'influence de l'essai sera présentée lors de l'analyse des résultats au prochain chapitre.

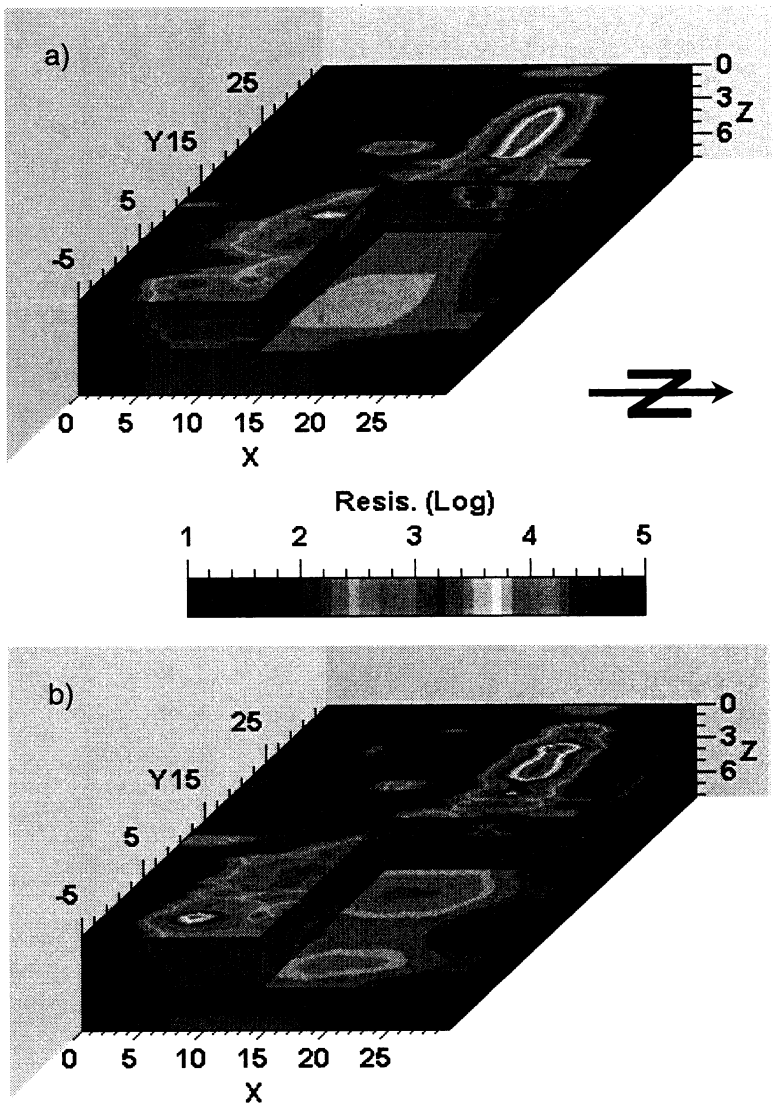


Figure 4.25 : Inversion 3D des données de résistivité de la phase II par méthode standard, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) avant l'essai d'infiltration, b) après l'essai d'infiltration

4.2.4.3 Inversion de type « time-lapse »

L'inversion de type « time-lapse », tel que mentionné dans une section précédente, est utilisée lorsqu'on fait le suivi de conditions variables sur un même terrain. Ce type d'inversion prend en considération le modèle initial lors de l'inversion des séries de données subséquentes. Dans ce cas-ci, le modèle initial considéré est la série de profils mesurés lors de la première phase de terrain dans le cas où l'on compare les

variations de résistivité entre la première et la seconde phase de terrain. Dans le cas où l'on compare les mesures avant et après l'infiltration, le modèle initial considéré est la série de profils mesurés avant l'essai d'infiltration.

La figure 4.26 montre les profils d'inversion par la méthode « time-lapse » pour les profils mesurés avant l'essai d'infiltration. Ces profils permettent de voir le modèle de distribution de la résistivité dans les stériles obtenus par inversion numérique en fonction de la profondeur. L'erreur RMS correspond à l'erreur par moindres carrés entre les données réelles et les valeurs obtenues avec le modèle. La figure 4.27 présente les profils d'inversion par la méthode « time-lapse » pour les profils mesurés après l'essai d'infiltration. De manière générale, les résultats obtenus ici sont similaires à ceux provenant des méthodes d'inversion standard et robuste. On note cependant que ce type d'inversion élimine la forte anomalie observée sur le profil X30b lors des inversions antérieures. Puisque ce type d'inversion considère le modèle initial obtenu lors de l'inversion des données de la première phase de terrain, cette dernière accorde un moindre poids à une si forte variation de la résistivité du terrain. Par conséquent, cette anomalie est beaucoup moins importante puisque, tel qu'avancé dans la section précédente, ces faibles valeurs de résistivité seraient dues à des erreurs de mesure et non à un changement réel dans les propriétés électriques des stériles.

En plus de permettre d'identifier les anomalies douteuses, l'inversion de type « time-lapse » s'avère beaucoup plus utile lors de l'analyse des données par le logiciel RES2DINV, tel qu'il sera montré au chapitre 5.

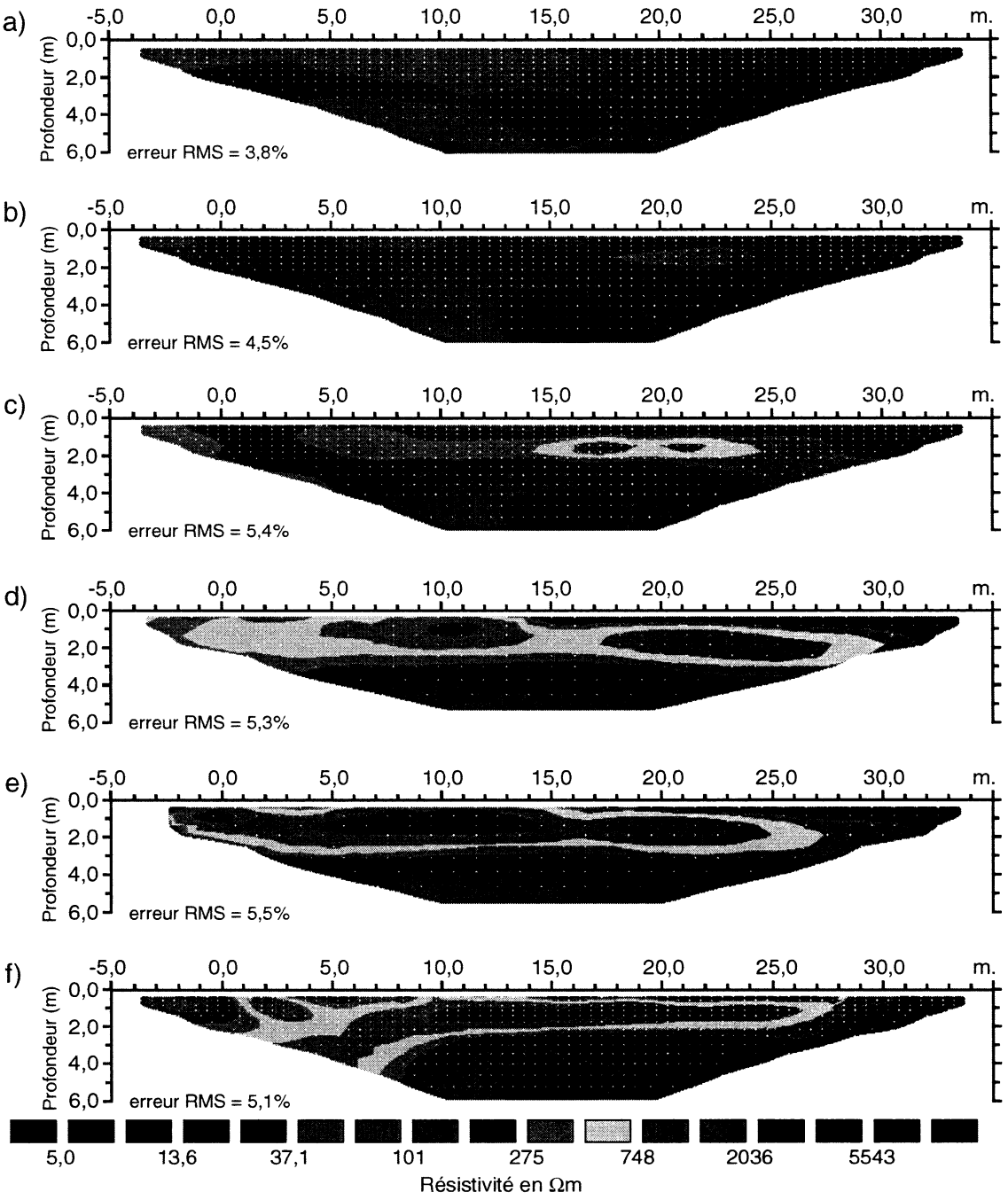


Figure 4.26 : Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

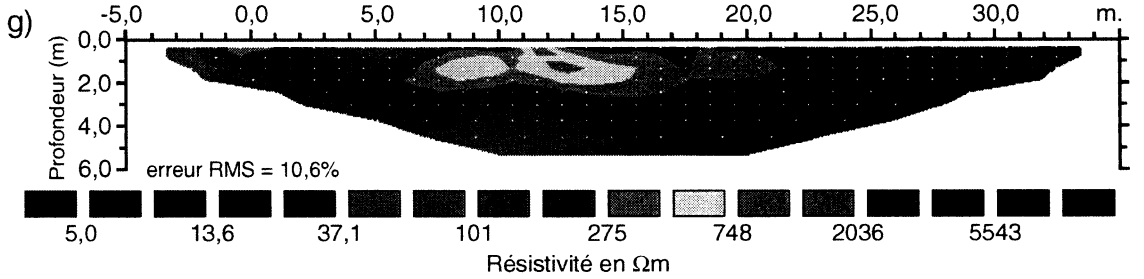


Figure 4.26 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures avant infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00b, b) X05b, c) X10b, d) X15b, e) X20b, f) X25b et g) X30b

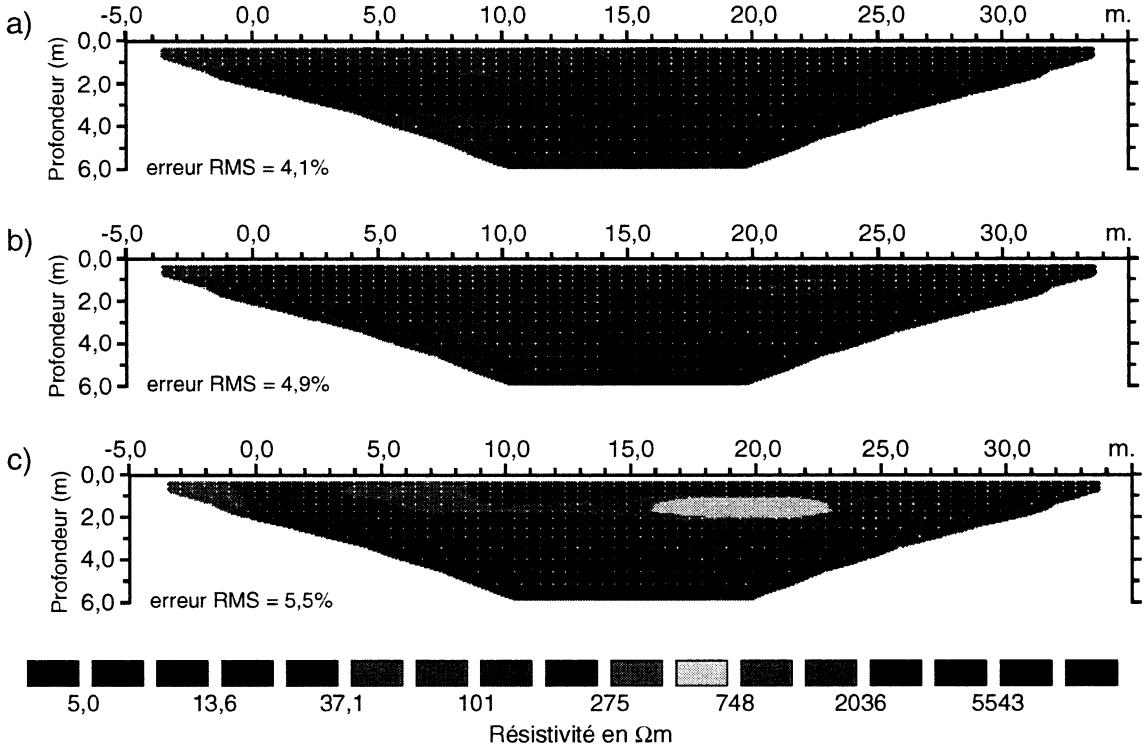


Figure 4.27 : Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

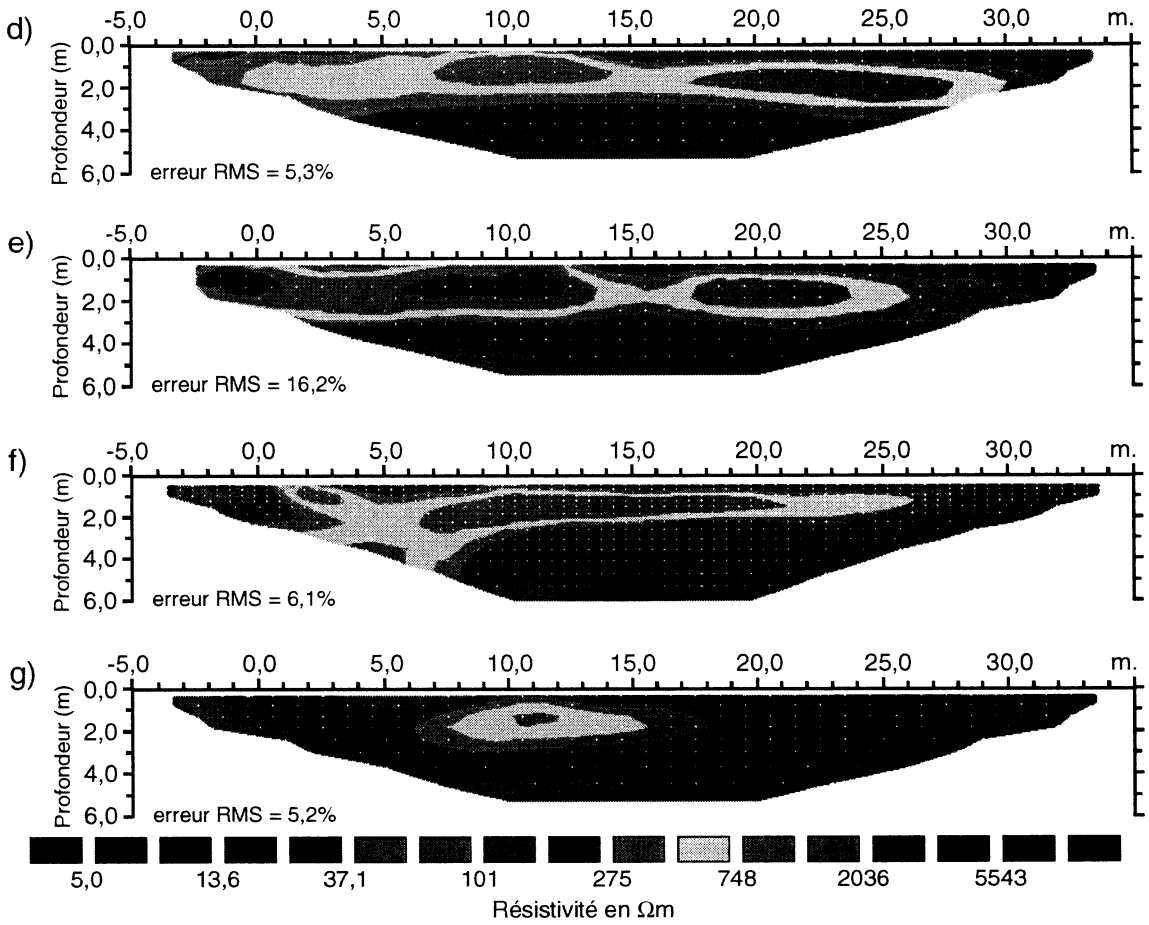


Figure 4.27 (suite): Profils d'inversion de résistivité par méthode « time-lapse » pour les mesures après infiltration, modèle de résistivité en fonction de la profondeur; a) X00c, b) X05c, c) X10c, d) X15c, e) X20c, f) X25c et g) X30c

4.3 Géoradar

4.3.1 Traitement des données

Tout comme la résistivité électrique, les données de géoradar nécessitent une séquence de traitement afin d'obtenir une image correspondant au terrain sondé. Dans le cas du géoradar, cette séquence comprend une série de filtres nécessaires afin de faire ressortir les signaux réels provenant du sol tout en éliminant des signaux parasites. La séquence de traitement utilisée sur les profils est la suivante :

1) Transfert des données.
2) Filtre *dewow*.
3) Corrections statiques.
4) Application d'une fonction de gain.
5) Filtre passe bande.
6) Lissage des traces par interpolation.

Dans le cas de cette étude, les étapes 2 à 6 de la séquence de traitement ont été effectuées à l'aide du logiciel REFLEXW de Sandmeier Software (2003). Le gain a été appliqué selon une fonction indépendante pour chaque profil. Le filtre passe bande a été appliqué afin d'éliminer les basses fréquences ainsi que les très hautes fréquences. Le lissage des traces consiste à interpoler les traces entre elles afin d'obtenir un profil plus lisse. La figure 4.28 montre un profil radar avant et après la série de traitements. Dans ce cas, des corrections statiques importantes ont dues être effectuées puisque le profil a été mené en deux parties en raison d'un déphasage du signal dans le temps. On voit bien que le traitement de signal est essentiel, car ceci permet d'accentuer les informations importantes et de minimiser le bruit et les autres artéfacts pouvant masquer de l'information.

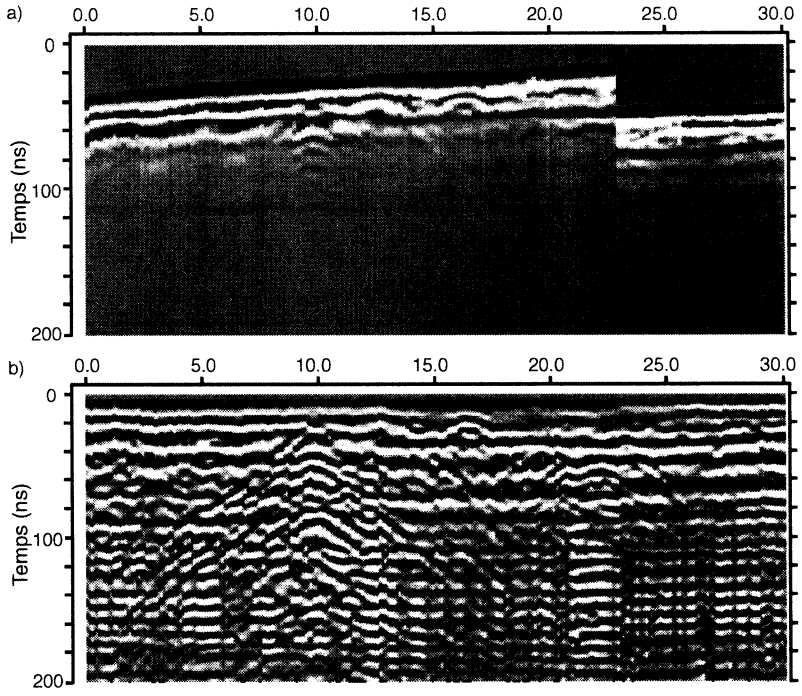


Figure 4.28 : Exemple du traitement appliqué aux sections de géoradar; a) données brutes, b) après la séquence de traitement

4.3.2 Résultats phase I

4.3.2.1 Analyse des structures

Cette section présente les profils radar obtenus pour la première campagne de terrain effectuée sur la halde à stériles de la mine Laronde. Les figures 4.29 et 4.30 montrent les profils effectués en direction est-ouest et sud-nord respectivement. L'image présentée sur un profil montre les variations d'amplitude de l'onde réfléchie captée par l'antenne réceptrice du système en fonction du temps. Une analyse des vitesses de propagation est nécessaire pour convertir cet axe en profondeur. Dans le cas de cette étude, l'analyse de la vitesse de propagation dans les stériles s'est avérée complexe, notamment par le fait que l'hétérogénéité des matériaux fait en sorte que les vitesses varient en fonction de la profondeur et de la position latérale. C'est pourquoi les profils radar sont présentés par la position (en mètres) sur l'axe horizontal et le temps (en nanosecondes) sur l'axe vertical. La prochaine section traitera de l'analyse des vitesses plus en détail.

On distingue deux types de structures principales sur la majorité des profils, soit les réflecteurs horizontaux et les hyperboles de diffraction. Un ou plusieurs réflecteurs sub-horizontaux peuvent être facilement identifiés sur les profils. Tout d'abord un fort réflecteur peut-être identifié sur tous les profils dont le temps de réflexion varie entre 60 et 80 ns. Sur certains des profils, tel que celui de la ligne X15a, ce réflecteur semble avoir un léger pendage vers l'est. Cette pente peut être réelle ou peut être due à une variation de la vitesse de propagation du signal dans le matériau. Il est important de noter que sous ce réflecteur, les longueurs d'onde ainsi que les amplitudes du signal radar sont différentes par rapport à la zone située au-dessus. Par conséquent, ce réflecteur pourrait être la limite entre deux matériaux différents. D'autres réflecteurs horizontaux sont présents sur certains des profils, notamment entre 20 et 40 ns. On note aussi la présence de couches légèrement inclinées au sein de ces réflecteurs comme par exemple aux profils Y00a aux environs du chaînage x=25m et Y10a près du chaînage x=7,5m (figure 4.30 a) et c) respectivement).

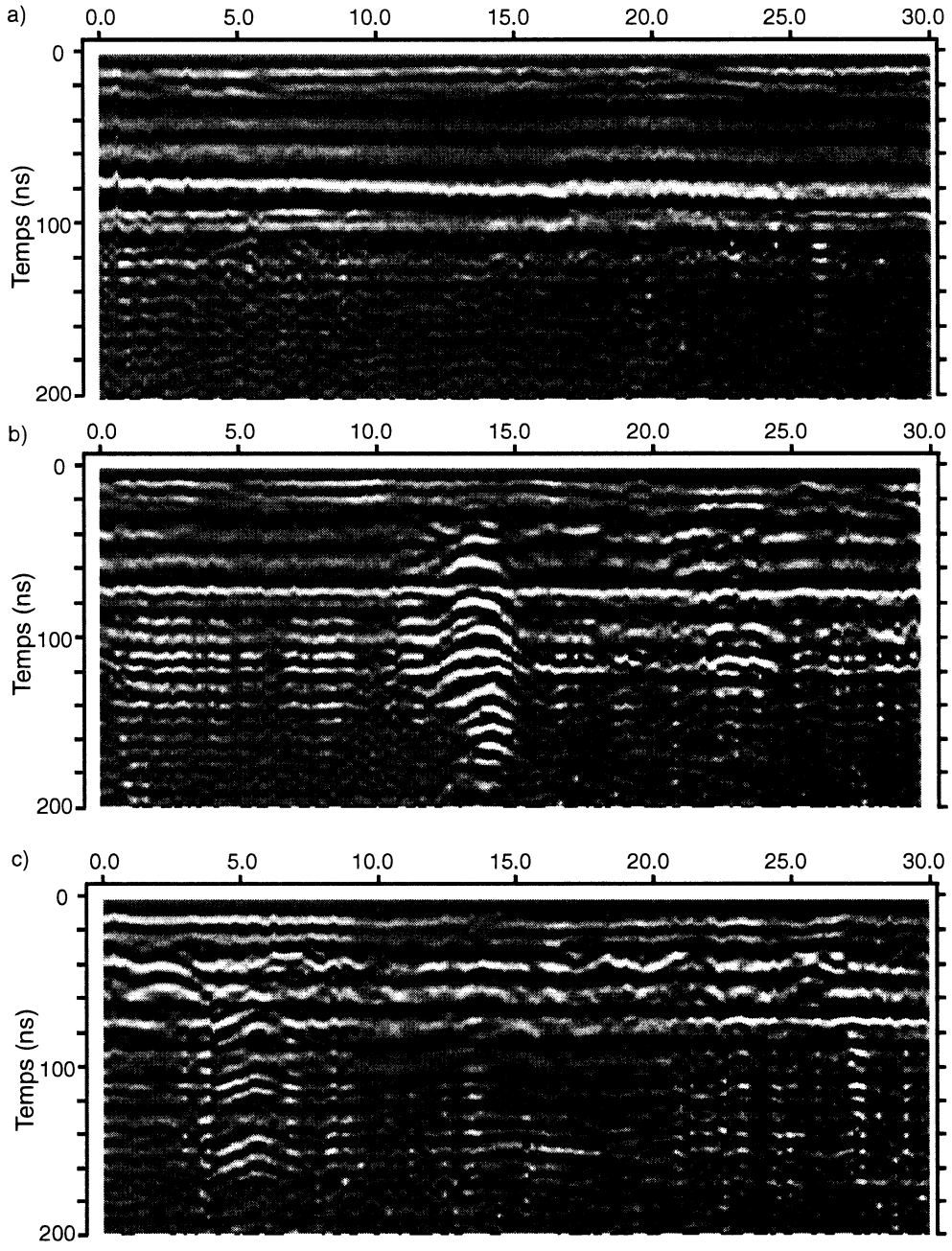


Figure 4.29 : Profils radar direction est-ouest, phase I; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

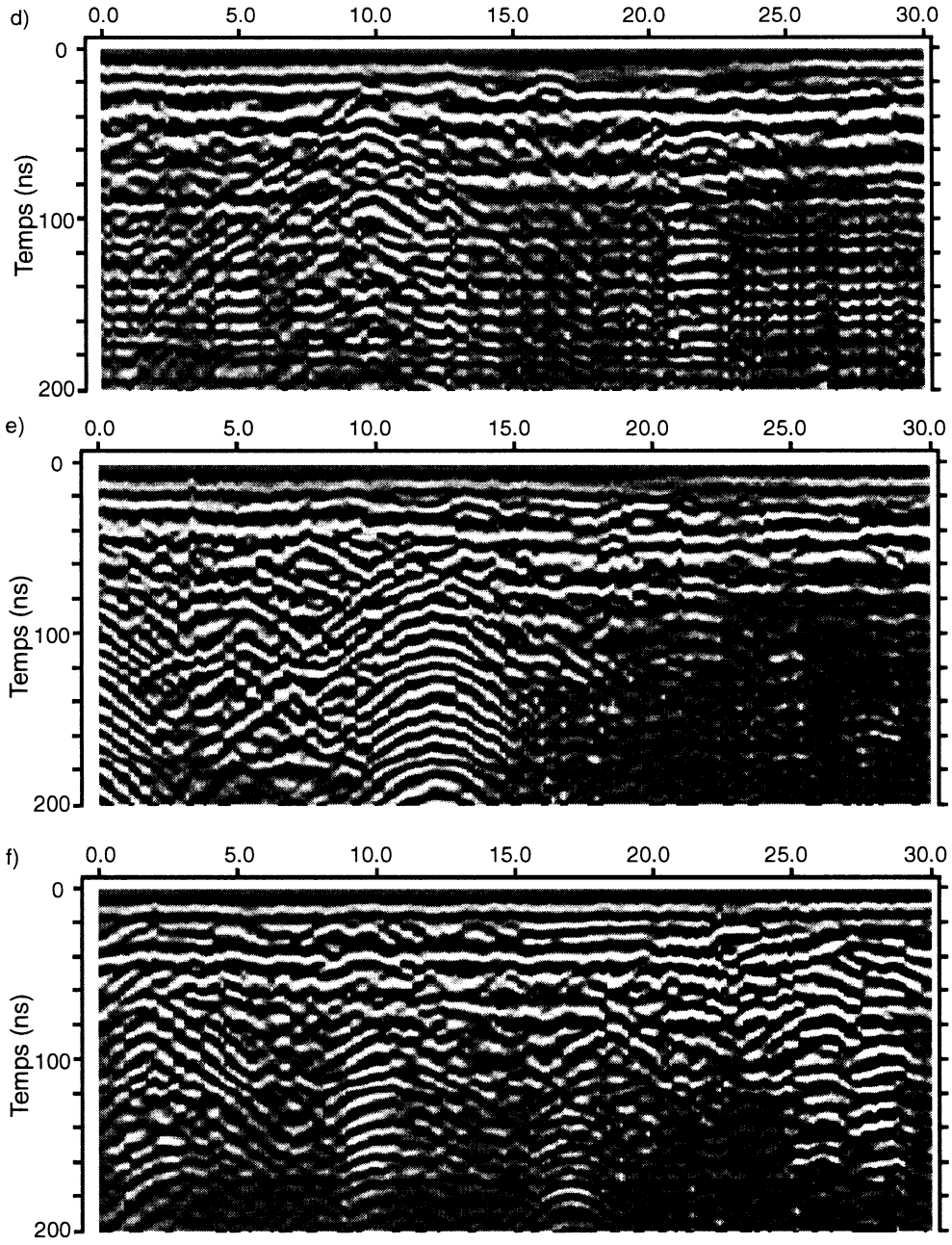


Figure 4.29 (suite): Profils radar direction est-ouest, phase I; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

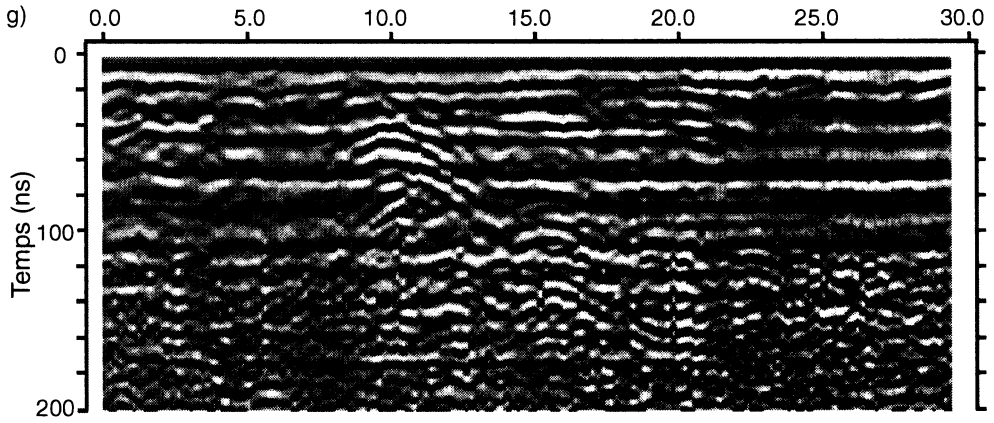


Figure 4.29 (suite): Profils radar direction est-ouest, phase I; a) X00a, b) X05a, c) X10a, d) X15a, e) X20a, f) X25a et g) X30a

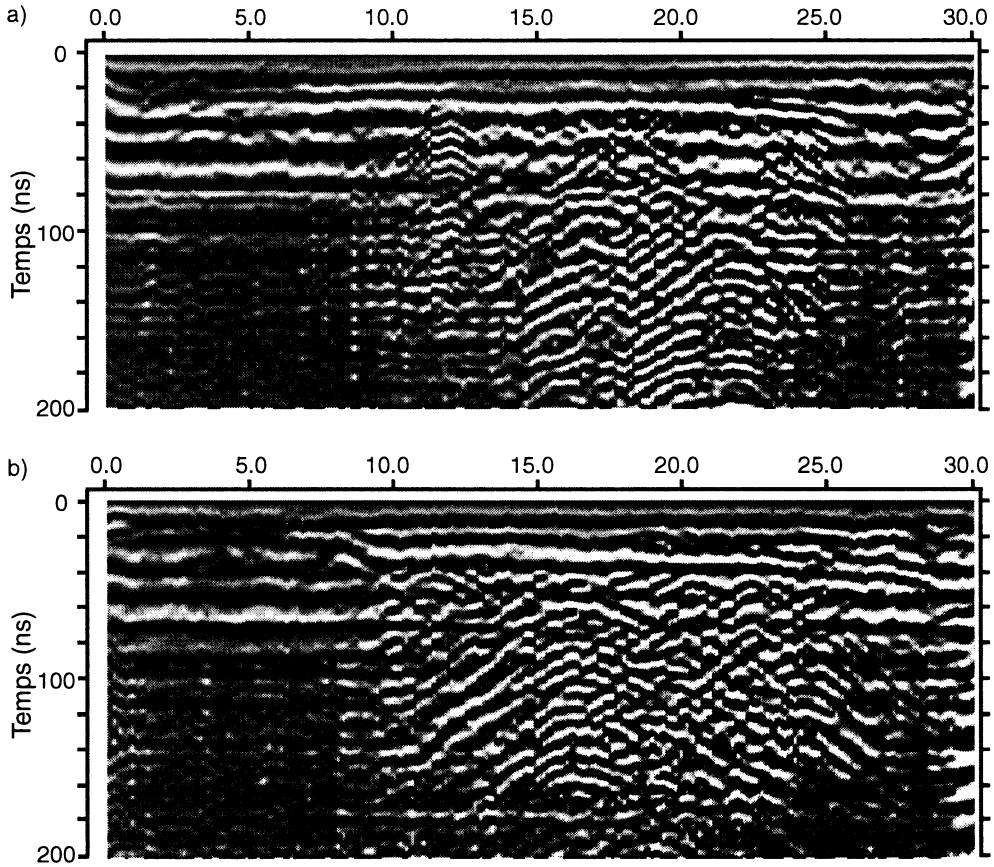


Figure 4.30 : Profils radar direction sud-nord, phase I; a) Y00a, b) Y05a, c) Y10a, d) Y15a, e) Y20a, f) Y25a et g) Y30a

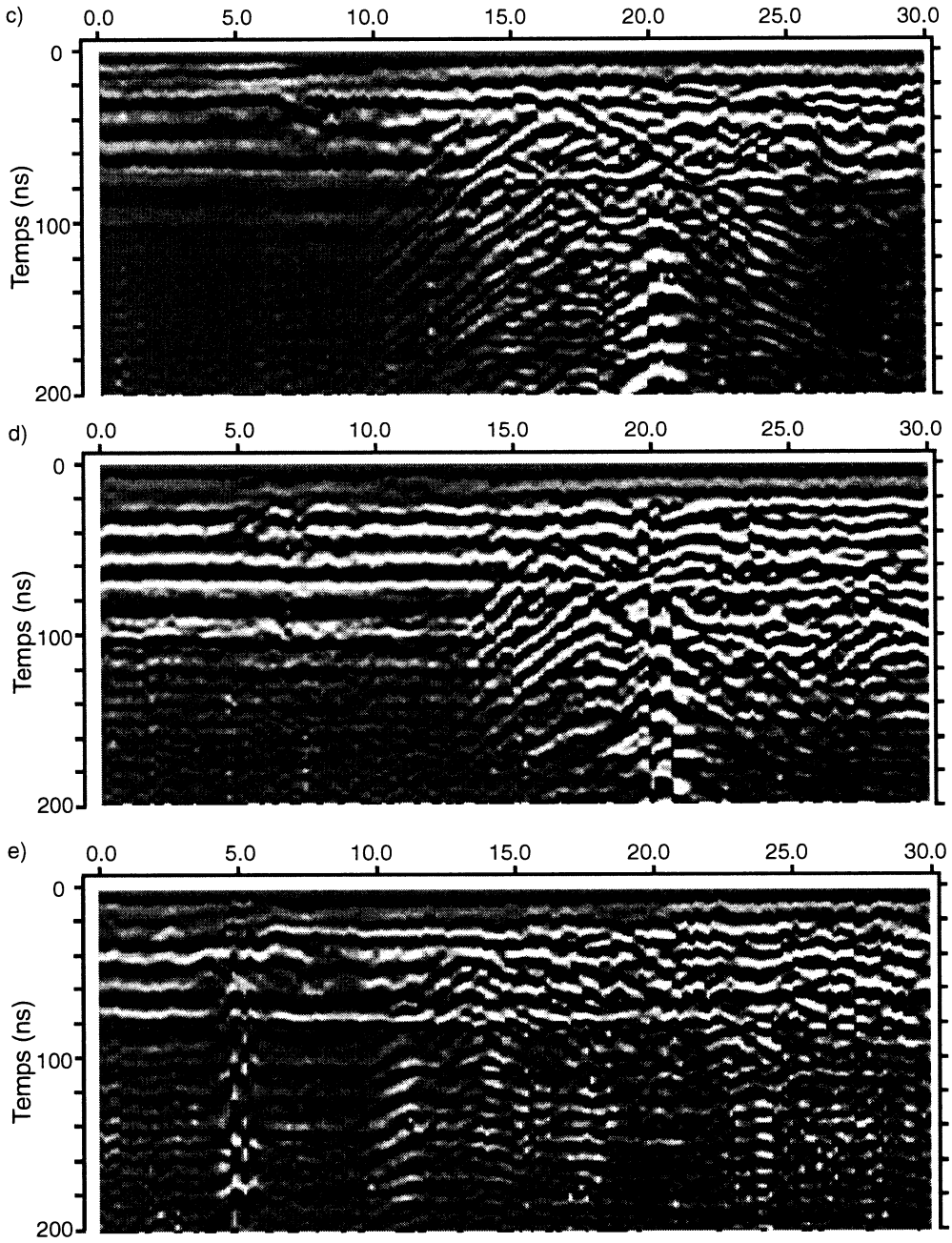


Figure 4.30 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase I; a) Y00a, b) Y05a, c) Y10a, d) Y15a, e) Y20a, f) Y25a et g) Y30a

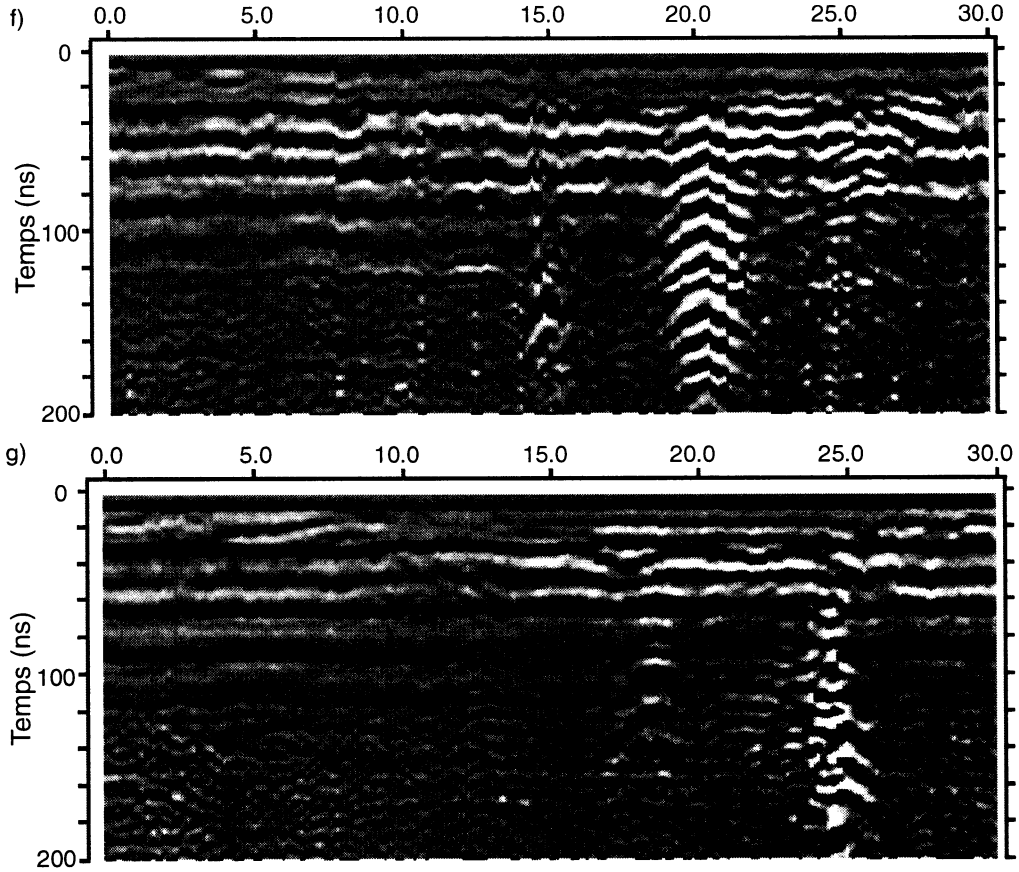


Figure 4.30 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase I; a) Y00a, b) Y05a, c) Y10a, d) Y15a, e) Y20a, f) Y25a et g) Y30a

Les hyperboles de diffraction observées sur les figures 4.29 et 4.30 sont causées par la présence d'un objet ponctuel sur lequel le signal radar est diffracté au fur et à mesure que l'antenne avance dans le profil. Lorsque cette dernière est située juste au dessus de l'objet, le temps que prend le signal pour voyager des antennes à l'objet et vice-versa est le plus court. Par conséquent, l'apex de l'hyperbole correspond à la position exacte de l'objet sur l'axe si ce dernier est situé exactement en dessous du profil. De plus, la pente des branches de l'hyperbole nous donne une approximation de la vitesse de propagation du signal dans le matériau. Ceci sera traité en détail dans une section subséquente.

La présence d'objets diffractants est perçue clairement dans les profils radar obtenus sur la halde à stériles comme par exemple aux profils X15 au chaînage y = 10m (figure

4.29d) et Y10 au chaînage x = 16m (figure 4.30c). De plus, la concentration maximale des hyperboles de diffraction peut être délimitée dans une zone précise, soit dans la partie nord-est de la grille entre les chaînages x=10m à x=25m et y=0m à y=15m. La présence des ces corps diffractants induit des réflexions et des réverbérations multiples à très forte intensité ce qui a tendance à masquer le signal au dessous des hyperboles de diffraction. Par conséquent, certains éléments structuraux pourraient être masqués dans les zones où il y a forte densité d'hyperboles.

Les hyperboles de diffraction présentes dans ces profils peuvent être dues à la présence de blocs de roche de taille décimétrique qui agiraient comme des diffracteurs ponctuels. Des objets métalliques, tels que des barres d'acier ou des câbles enfouis dans les stériles, pourraient aussi être la cause d'hyperboles de diffraction, mais la présence très zonée de ces anomalies laisse croire qu'elles sont plutôt dues à la nature du terrain à cet endroit de la halde. De plus, une étude des temps de l'apex des hyperboles montre que ces corps diffractants se limitent à la zone située au dessus de 130 ns.

4.3.2.2 Vitesses de propagation

Habituellement, l'analyse des vitesses s'effectue à l'aide d'un sondage de type CMP (common mid point) (Reynolds, 1997). Un sondage de ce type a été fait sur la halde à stériles de la mine Laronde durant la phase I des travaux. Cependant, en raison de la forte atténuation du signal, les résultats de ce sondage ne peuvent pas être traités adéquatement pour obtenir un modèle de vitesses des stériles. En présence de plusieurs niveaux réflecteurs, cette méthode permet d'obtenir un modèle de vitesses de propagation en fonction de la profondeur. Or, l'absence de réflecteurs dû à l'atténuation du signal ne permet pas ce type d'analyse. Par conséquent, une autre approche a été utilisée pour déterminer les vitesses dans les stériles, soit l'étude des hyperboles de diffraction.

Tel que mentionné dans la section précédente, la pente des branches des hyperboles de diffraction ($\Delta x/\Delta t$) est égale à la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. À l'aide d'un module d'analyse du logiciel REFLEXW, il est possible d'ajuster la courbure des hyperboles aux profils radar afin d'estimer la vitesse de propagation dans le milieu (tel que montré à la figure 4.31).

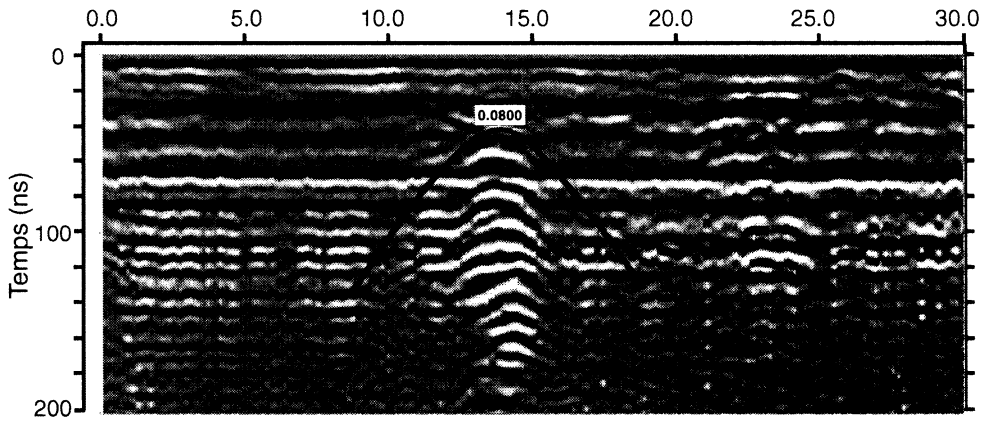


Figure 4.31 : Exemple d'analyse des vitesses par les hyperboles de diffraction, $\Delta x/\Delta t$ = 0,08 m/ns : profil X05a

Cet exercice a été effectué sur toutes les hyperboles observées sur les profils radar effectués sur la grille d'étude. La vitesse ainsi que la position (en ns) du sommet de l'hyperbole ont donc été répertoriées.

Afin de visualiser les résultats obtenus, des cartes montrant le temps au sommet de l'hyperbole et la vitesse estimée selon leur position sur la grille d'étude ont été effectuées (figure 4.32). Ces cartes doivent être étudiées simultanément, car dans le cas contraire, ces dernières perdent toute pertinence. Tous les losanges représentent des hyperboles répertoriées sur les différents levés. Tout d'abord, la partie au sud de la grille, soit au sud du profil X10, montre des vitesses faibles (< 0,09 m/ns) pour des hyperboles situées près de la surface. De plus, en raison de l'absence d'hyperboles profondes, aucune information sur la vitesse de propagation en profondeur ne peut être tirée. Dans le cas de la zone située au centre et au nord de la grille, soit au nord du profil X10, les hyperboles situées près de la surface (t < 50ns) montrent, mis à part quelques exceptions, des vitesses de propagation plus élevées (> 0,10 m/ns) qu'au

sud de la grille. De plus, les hyperboles plus profondes (t >50ns) montrent des vitesses plus faibles, soit du même ordre de grandeur que celles observées au sud de la grille (< 0,09 m/ns). Enfin, notons que les hyperboles les plus profondes (t >80ns) montrent les vitesses les plus faibles (< 0,08 m/ns). Ces résultats montrent que dans la zone au centre et au nord de la grille, la vitesse de propagation semble diminuer au fur et à mesure que la profondeur augmente. Cette diminution peut être due au changement de nature des matériaux en profondeur qui entraîne un changement dans les propriétés diélectriques des stériles.

Ces résultats montrent qu'il serait difficile de construire un modèle de la vitesse de propagation des ondes du géoradar sous la grille d'étude. Cependant, afin d'obtenir une ordre de grandeur sur la profondeur d'investigation de la méthode, on peut supposer une vitesse moyenne pouvant être extraite des hyperboles répertoriées. La moyenne des vitesses estimées par toutes les hyperboles est de 0,093 m/ns. Par conséquent, la profondeur d'investigation varie entre 3 à 6 mètres dépendant de la position sur la grille d'étude.

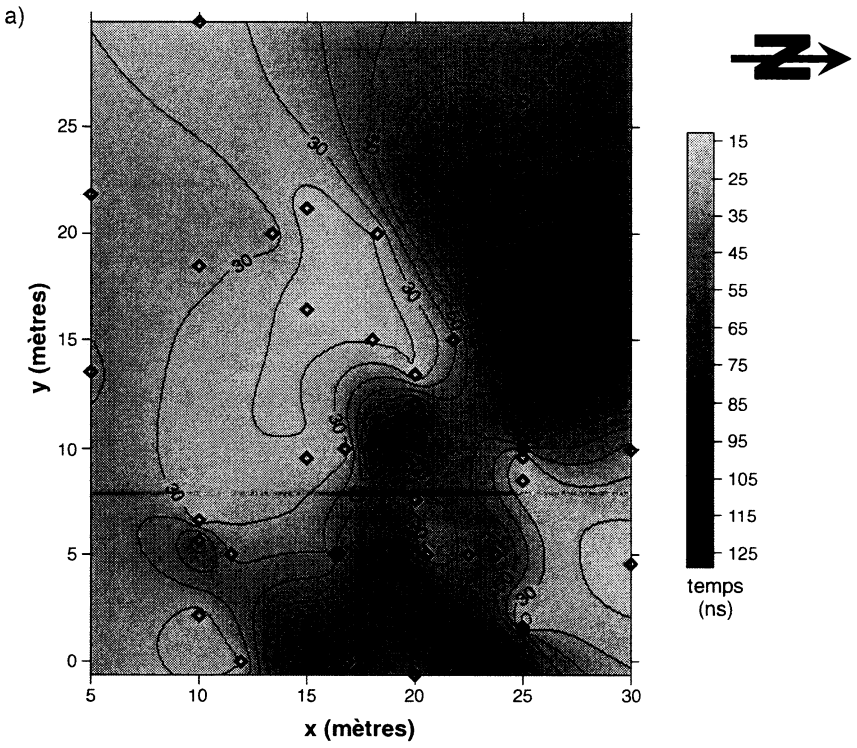


Figure 4.32 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase I : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée

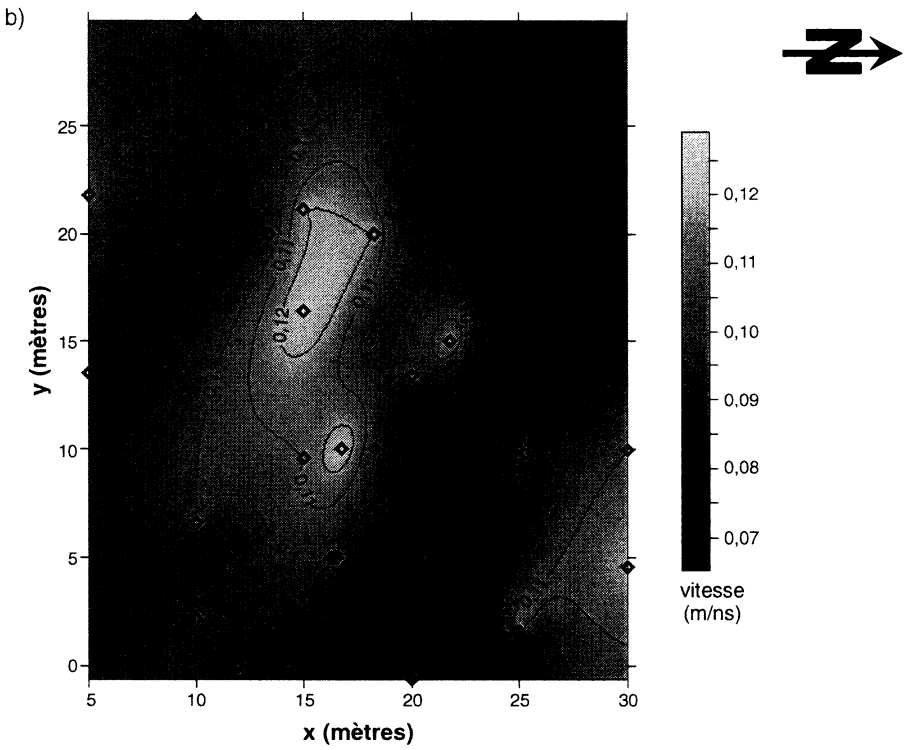


Figure 4.32 (suite) : Analyse des hyperboles de diffraction, phase I : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée

4.3.3 Résultats phase II

Les profils de géoradar obtenus lors de la seconde phase de terrain sont présentés dans cette section. La première série de figures (figures 4.33 et 4.34) présente les profils effectués avant l'essai d'infiltration. La seconde série de figures (figures 4.35 et 4.36) montre les profils obtenus après l'essai d'infiltration. Ces figures montrent les structures qui reflètent le signal du géoradar au sein de la halde. Ces dernières devraient correspondre aux mêmes structures qui ont été observées lors de la phase I (figures 4.29 et 4.30), car aucune perturbation structurale majeure n'a été effectuée sur la zone d'étude. De plus, ces figures permettent de voir le degré d'atténuation du signal durant la deuxième phase en comparaison avec les mesures de la première phase (figures 4.29 et 4.30) et entre les mesures prise avant et après l'essai d'infiltration (figures 4.35 et 4.36 par rapport aux figures 4.33 et 4.34). Des variations du niveau d'atténuation du signal indiquent une variation des propriétés diélectriques des stériles.

4.3.3.1 Observations générales

Les résultats des profils de géoradar obtenus permettent certaines constatations. Tout d'abord, la pénétration du signal est beaucoup moins importante que lors de la première phase des travaux. Dans plusieurs cas, la quasi-totalité du signal est absorbé en surface et la pénétration de ce dernier se limite à environ 40 à 50 nanosecondes, soit environ 2 mètres si on prend la vitesse moyenne obtenue avec les pentes des hyperboles de diffraction, soit 0,095 m/ns pour les mesures de la deuxième phase (comparativement à 0,093 m/ns pour la première phase). Néanmoins, dans la portion où le signal réfléchi est assez fort, les mêmes structures (réflecteurs horizontaux et hyperboles de diffraction) observées lors de la phase I peuvent être distingués. Les réflecteurs sub-horizontaux près de la surface peuvent être corrélés avec les données de la phase I de même que la zone au nord-est, où l'on observe une forte concentration de corps diffractants.

De fortes réverbérations à des temps supérieurs à 100 ns sont présentes dans la majorité des profils effectués durant cette campagne de terrain. Il est difficile d'attribuer une cause à ces artéfacts puisque ces derniers n'étaient pas présents lors de la première campagne de terrain. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène : soit un changement important dans les propriétés électriques du terrain (ce qui expliquerait aussi la forte atténuation du signal par rapport aux résultats de la phase I) ou soit que ces réverbérations sont dues à une interférence à l'intérieur du nouveau système d'acquisition. En fait, les discontinuités souvent très marquées de ces réverbérations, par exemple au profil X07,5c (figure 4.35b), impliqueraient d'importants changements très localisés dans les propriétés du terrain.

La cause exacte de ces réverbérations s'explique sans doute par une combinaison de ces deux hypothèses. Idéalement, des essais auraient dû être effectués avec les deux systèmes d'acquisition de façon simultanée afin de comparer les résultats obtenus. Cependant, des contraintes de temps et de disponibilité de l'équipement ont empêché la réalisation de ce type de test.

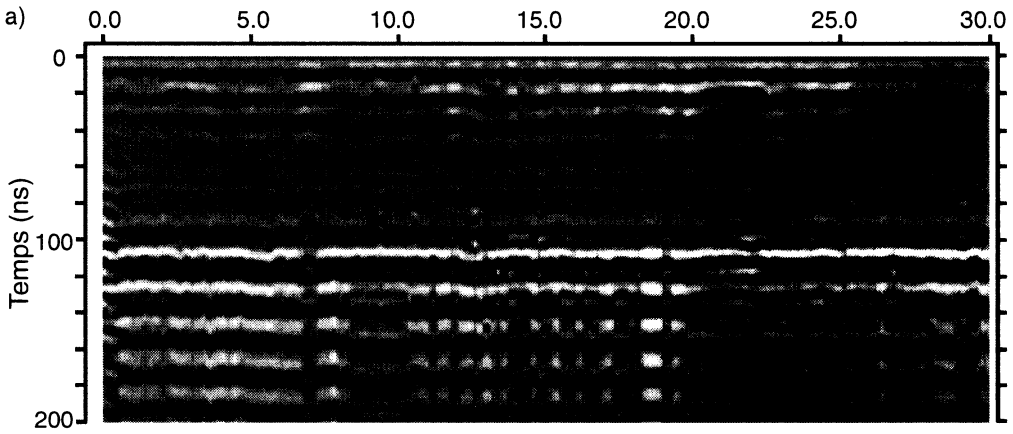


Figure 4.33 : Profils radar direction est-ouest, phase II, avant infiltration; a) X02,5b, b) X07,5b, c) X12,5b, d) X17,5b, e) X22,5b, f) X27,5b

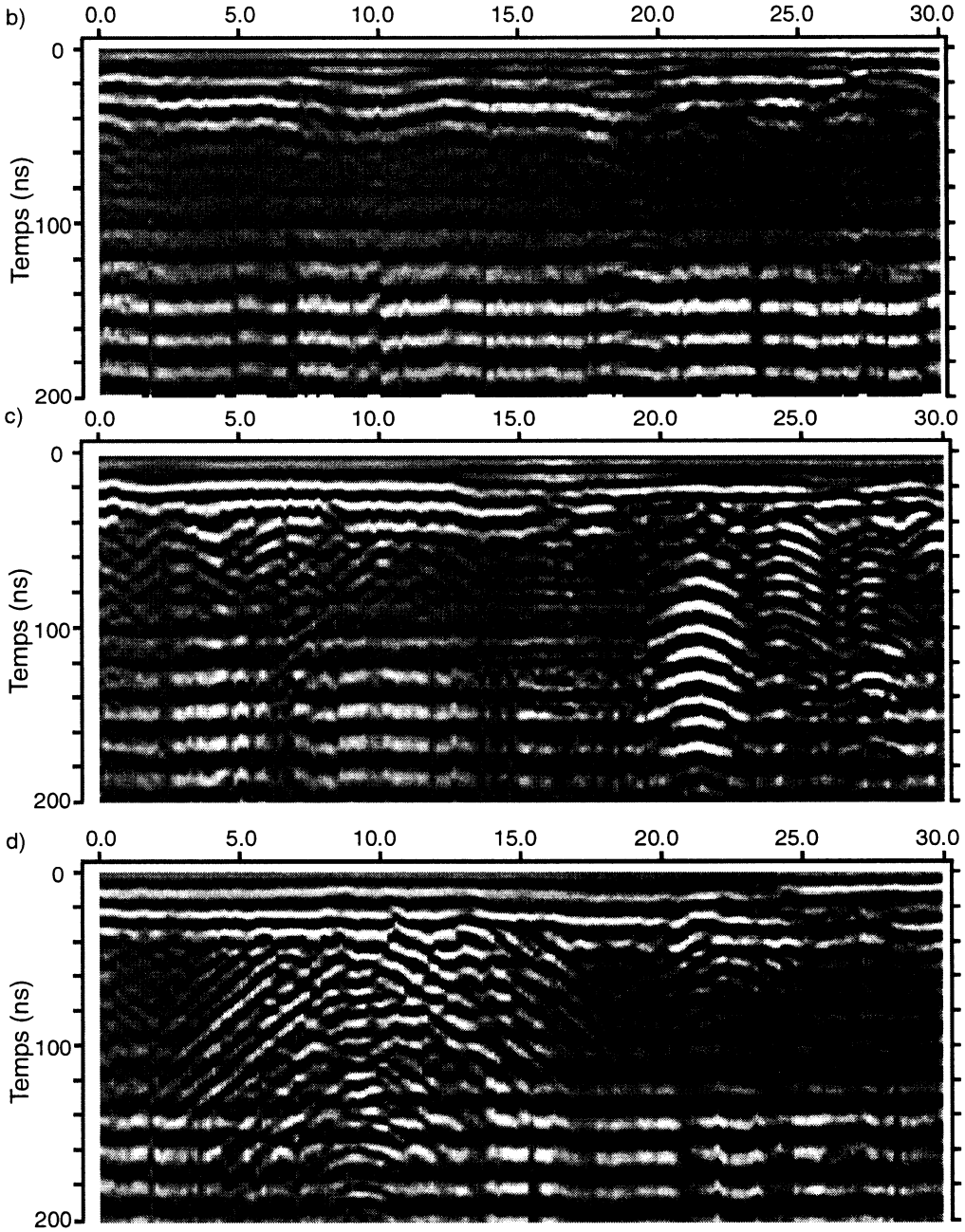


Figure 4.33 (suite): Profils radar direction est-ouest, phase II, avant infiltration; a) X02,5b, b) X07,5b, c) X12,5b, d) X17,5b, e) X22,5b, f) X27,5b

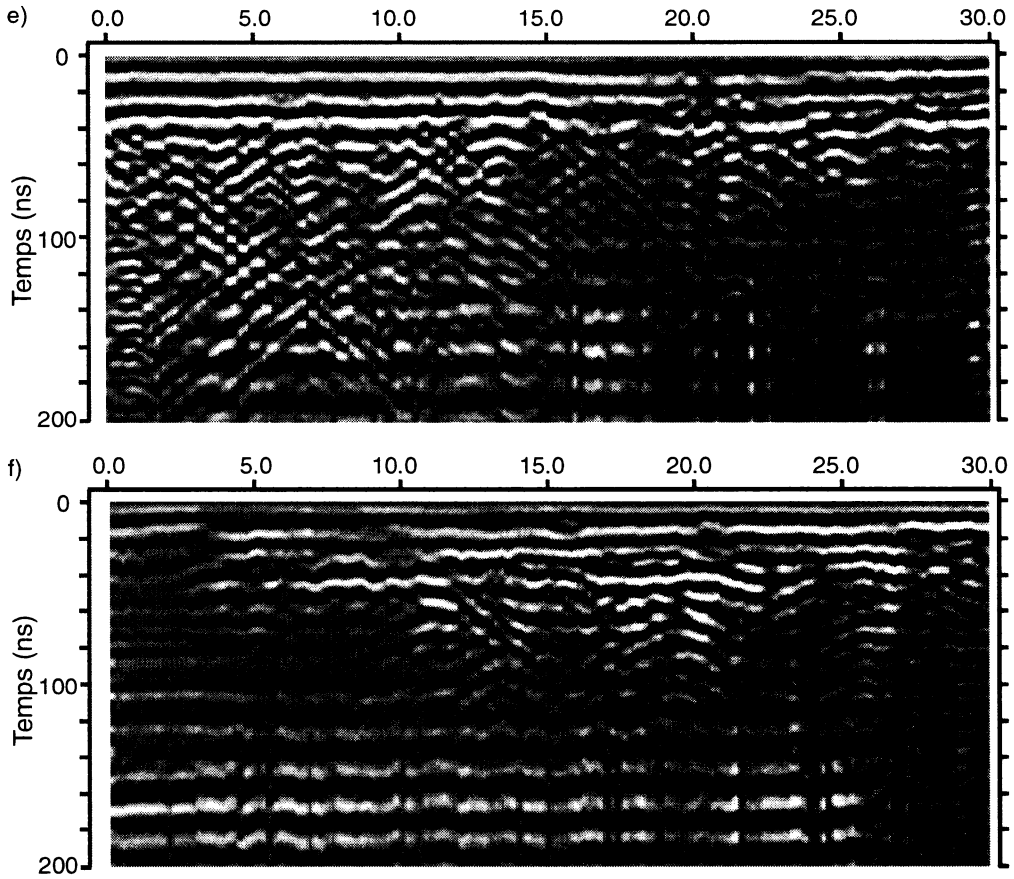


Figure 4.33 (suite): Profils radar direction est-ouest, phase II, avant infiltration; a) X02,5b, b) X07,5b, c) X12,5b, d) X17,5b, e) X22,5b, f) X27,5b

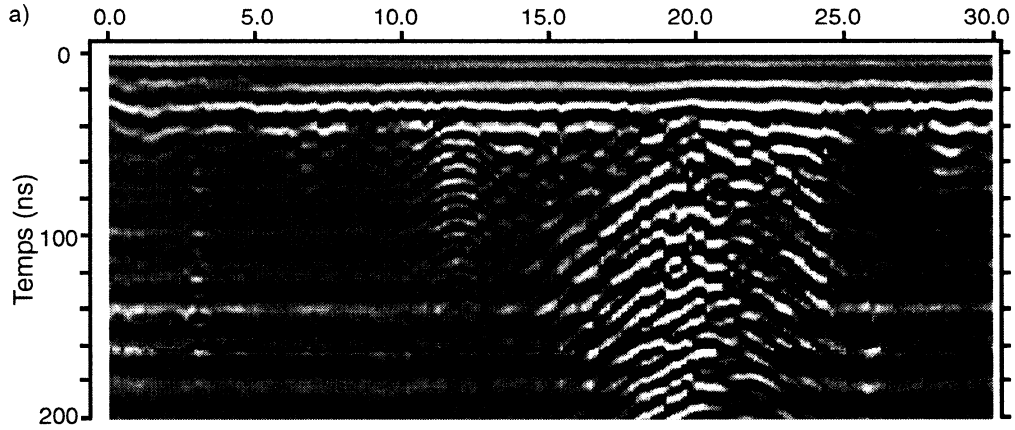


Figure 4.34 : Profils radar direction sud-nord, phase II, avant infiltration; a) Y00b, b) Y05b, c) Y10b, d) Y15b, e) Y20b, f) Y25b et g) Y30b

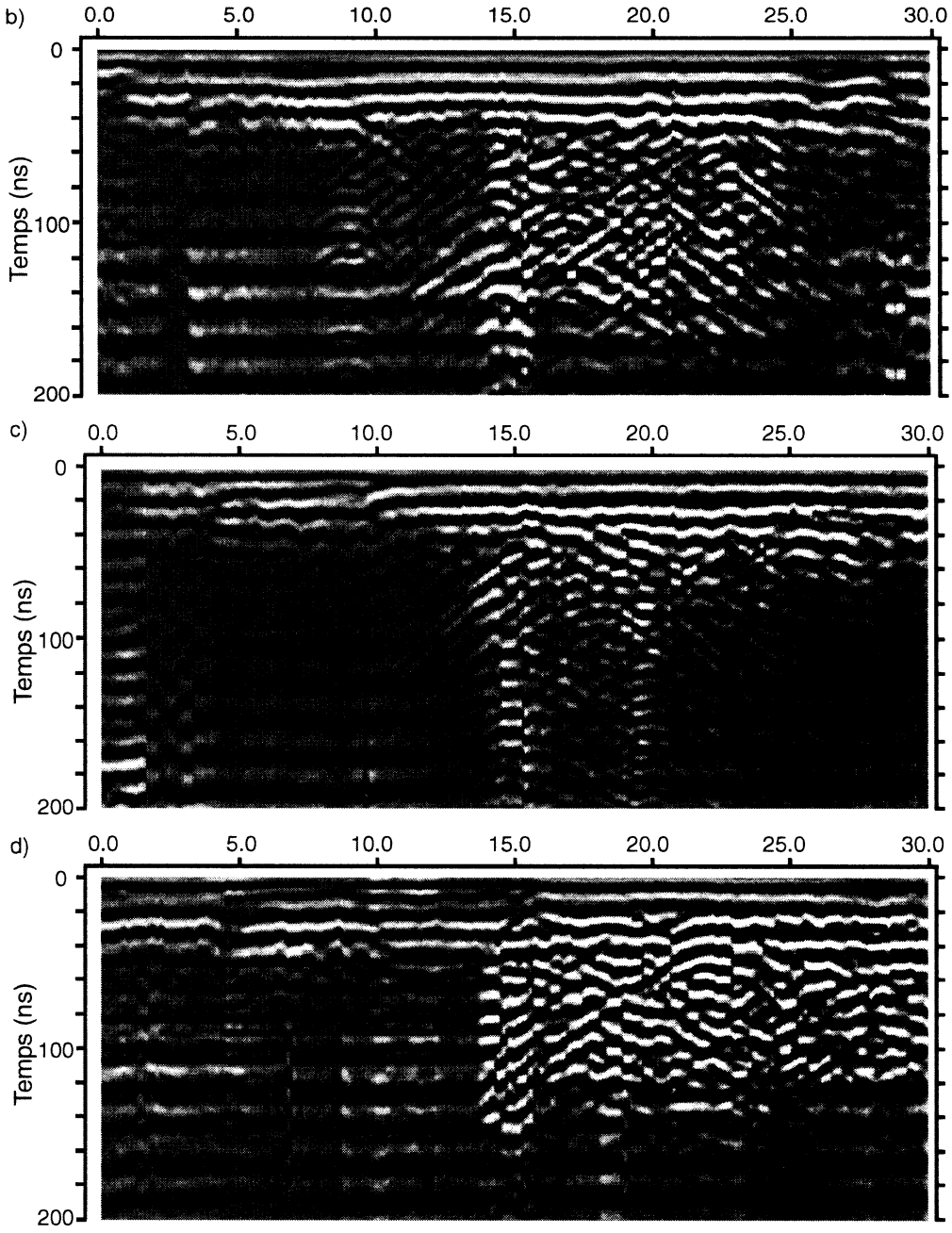


Figure 4.34 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase II, avant infiltration; a) Y00b, b) Y05b, c) Y10b, d) Y15b, e) Y20b, f) Y25b et g) Y30b

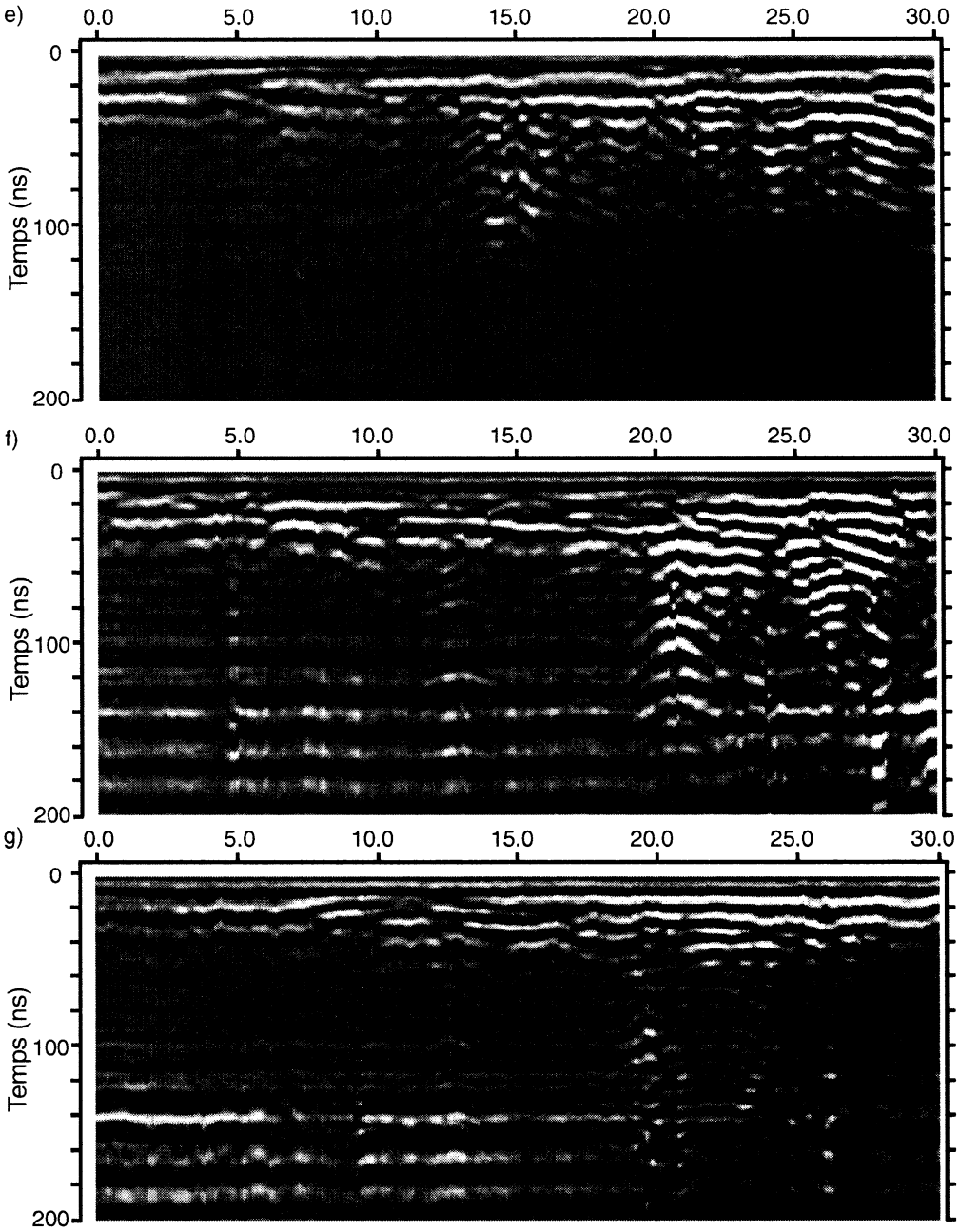


Figure 4.34 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase II, avant infiltration; a) Y00b, b) Y05b, c) Y10b, d) Y15b, e) Y20b, f) Y25b et g) Y30b

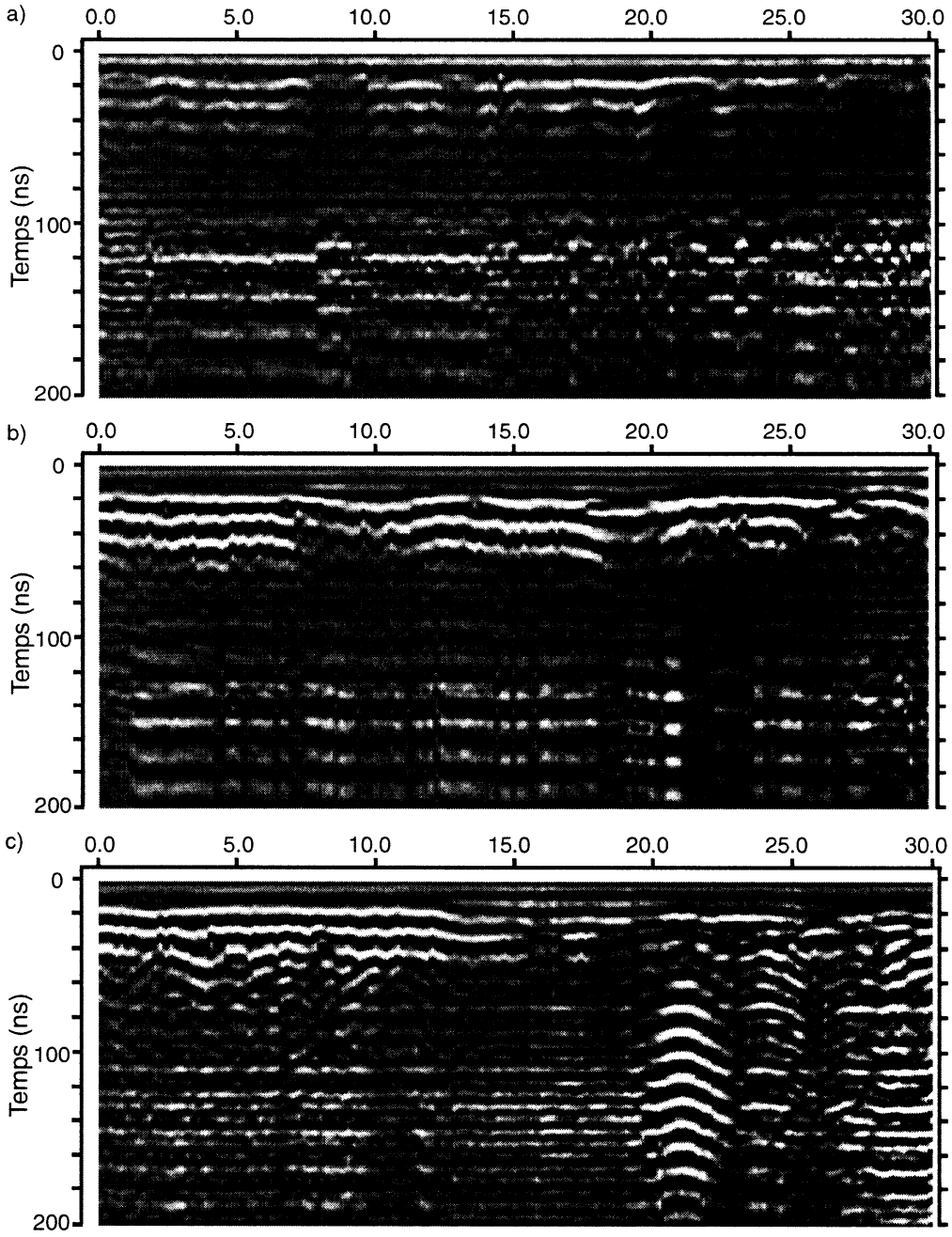


Figure 4.35 : Profils radar direction est-ouest, phase II, après infiltration; a) X02,5c, b) X07,5c, c) X12,5c, d) X17,5c, e) X22,5c, f) X27,5c

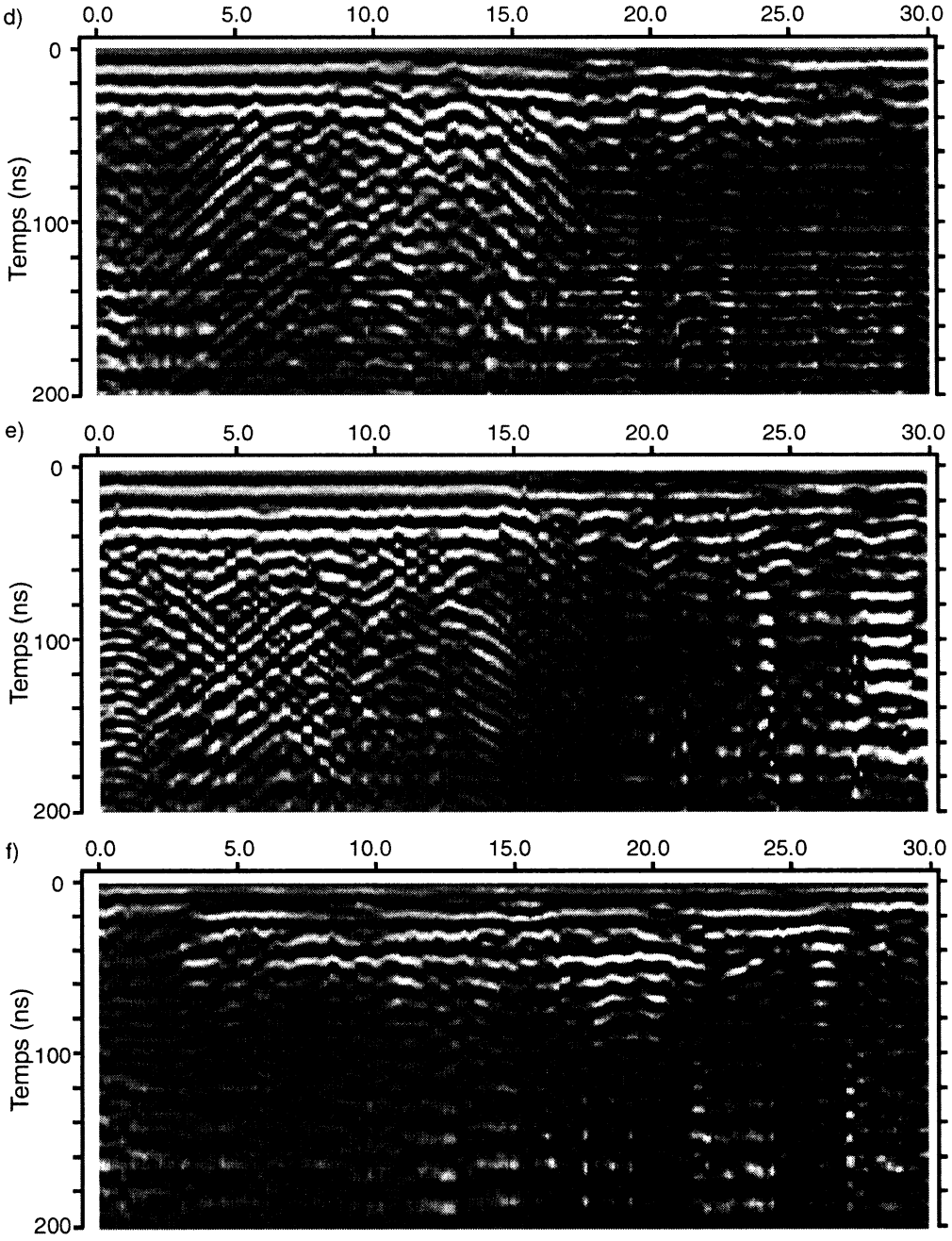


Figure 4.35 (suite): Profils radar direction est-ouest, phase II, après infiltration; a) X02,5c, b) X07,5c, c) X12,5c, d) X17,5c, e) X22,5c, f) X27,5c

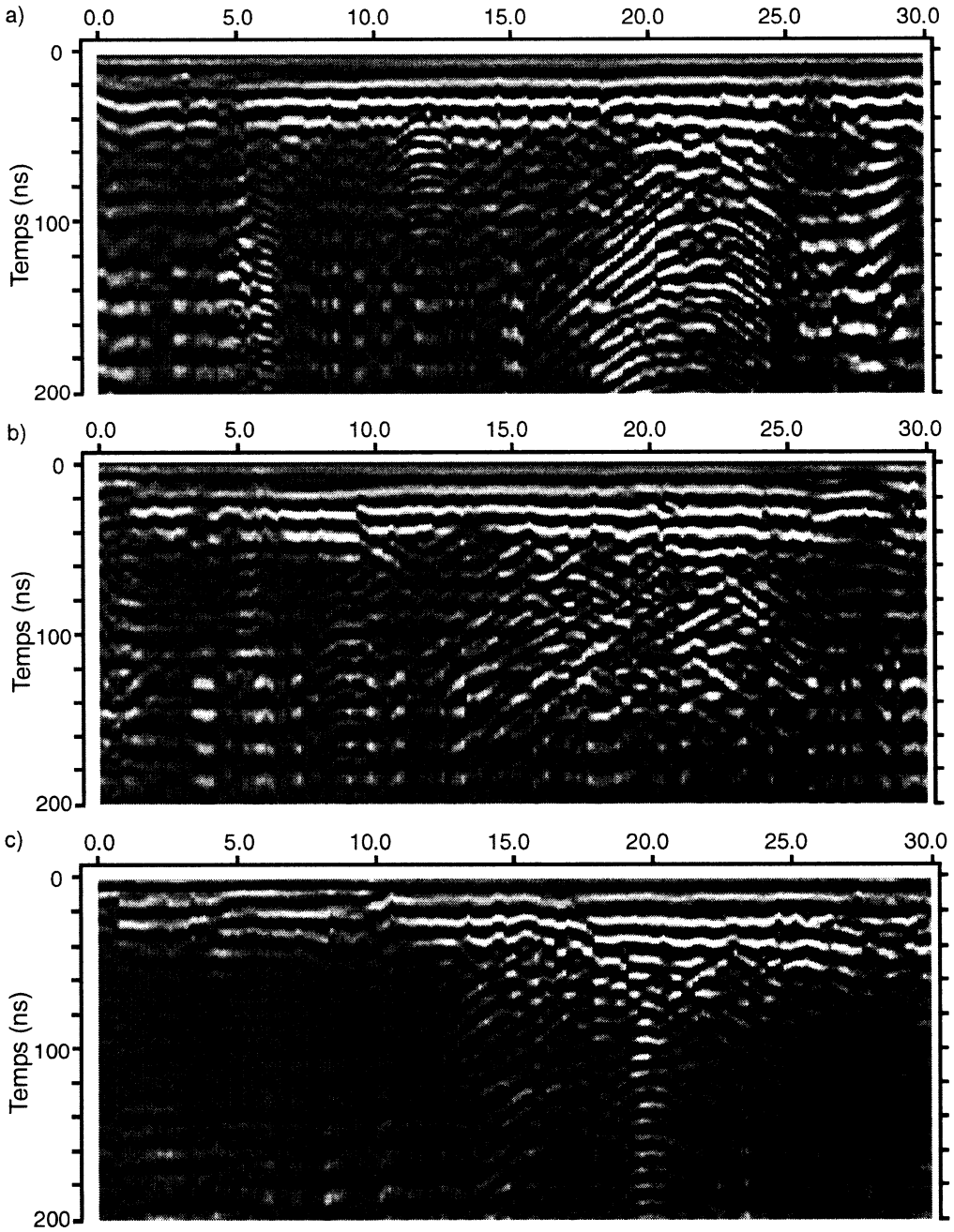


Figure 4.36 : Profils radar direction sud-nord, phase II, après infiltration; a) Y00c, b) Y05c, c) Y10c, d) Y15c, e) Y20c, f) Y25c et g) Y30c

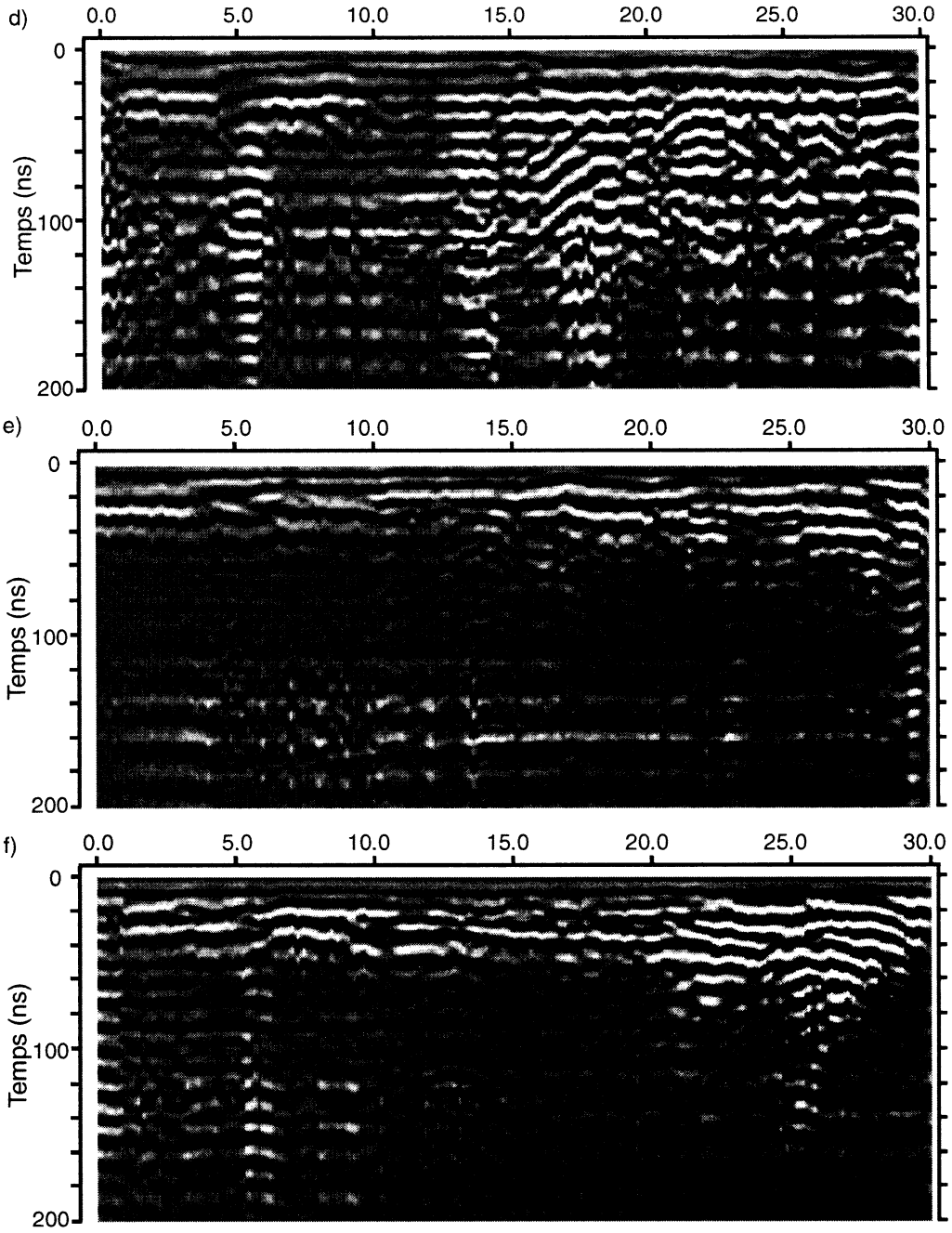


Figure 4.36 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase II, après infiltration; a) Y00c, b) Y05c, c) Y10c, d) Y15c, e) Y20c, f) Y25c et g) Y30c

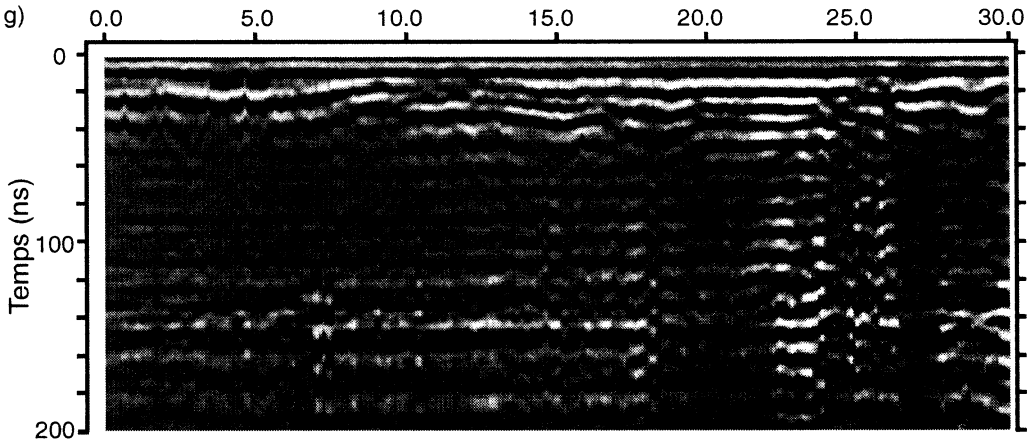


Figure 4.36 (suite): Profils radar direction sud-nord, phase II, après infiltration; a) Y00c, b) Y05c, c) Y10c, d) Y15c, e) Y20c, f) Y25c et g) Y30c

4.3.3.2 Vitesses de propagation

Les hyperboles de diffraction de la phase II des travaux ont été étudiées de la même manière que celles de la phase I, soit des cartes montrant le temps au sommet de l'hyperbole et la vitesse estimée selon leur position sur la grille d'étude. Les cartes d'analyse sont présentées aux figures 4.37 et 4.38 pour les profils avant l'essai d'infiltration et après l'essai d'infiltration respectivement.

Dans les deux cas, on constate une distribution des vitesses similaires à celle obtenue lors de la première phase des travaux, soit :

- De faibles vitesses en surface (<0,09 m/ns) pour la partie située au sud de la grille (au sud du profil X10);
- Une diminution de la vitesse de propagation avec la profondeur pour la partie au centre et au nord de la grille (au nord du profil X10).

La moyenne des vitesses des hyperboles pour la deuxième phase de terrain est légèrement plus élevée que lors de la première phase, soit de 0,095 m/ns. En utilisant cette vitesse pour estimer la profondeur d'investigation on obtient une profondeur allant d'environ 1,5 à 5 mètres. On constate une diminution marquée de la profondeur d'investigation entre la première et la seconde phase de terrain sur la halde à stériles de la mine Laronde.

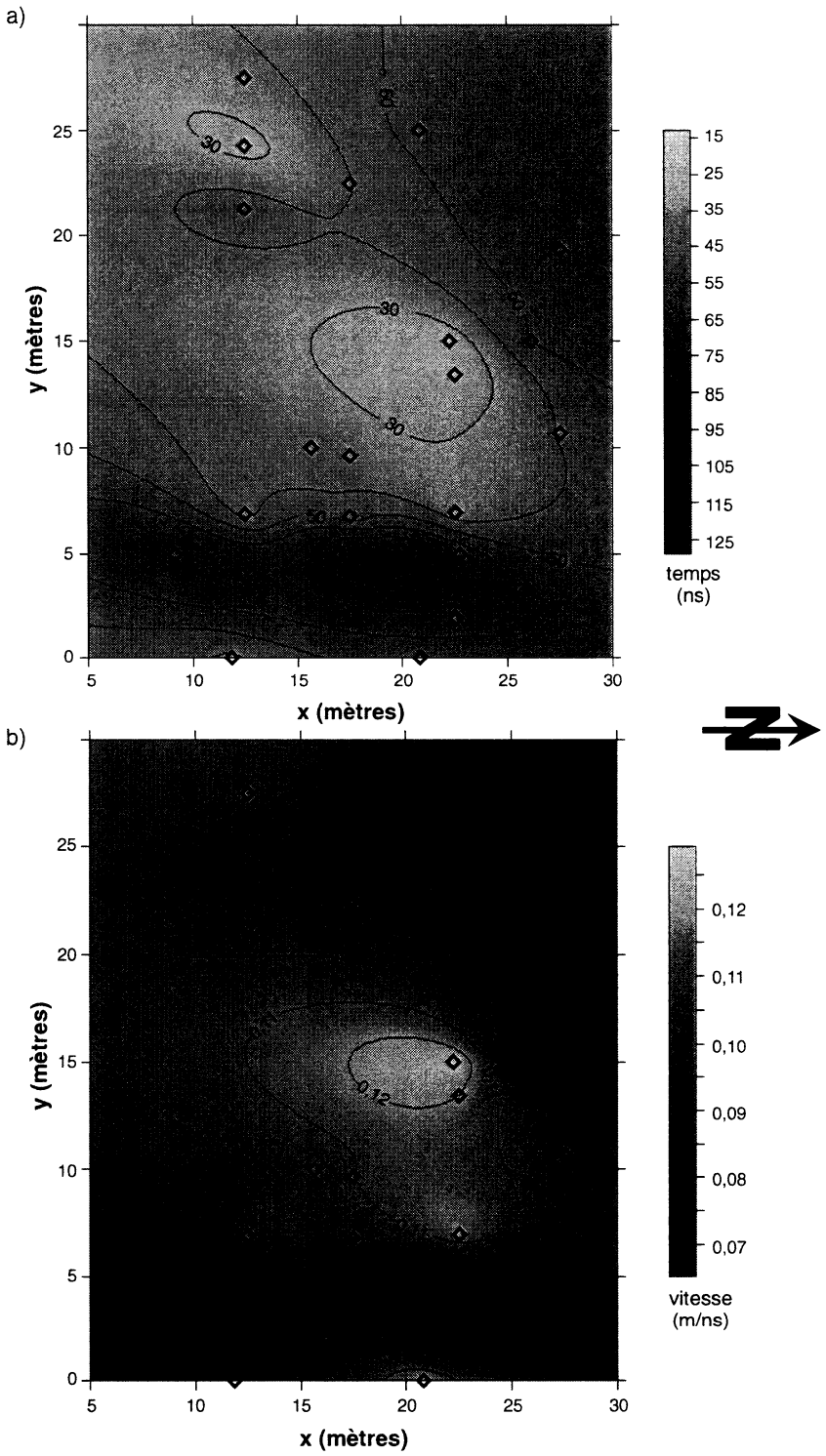


Figure 4.37 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase II, avant infiltration : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée

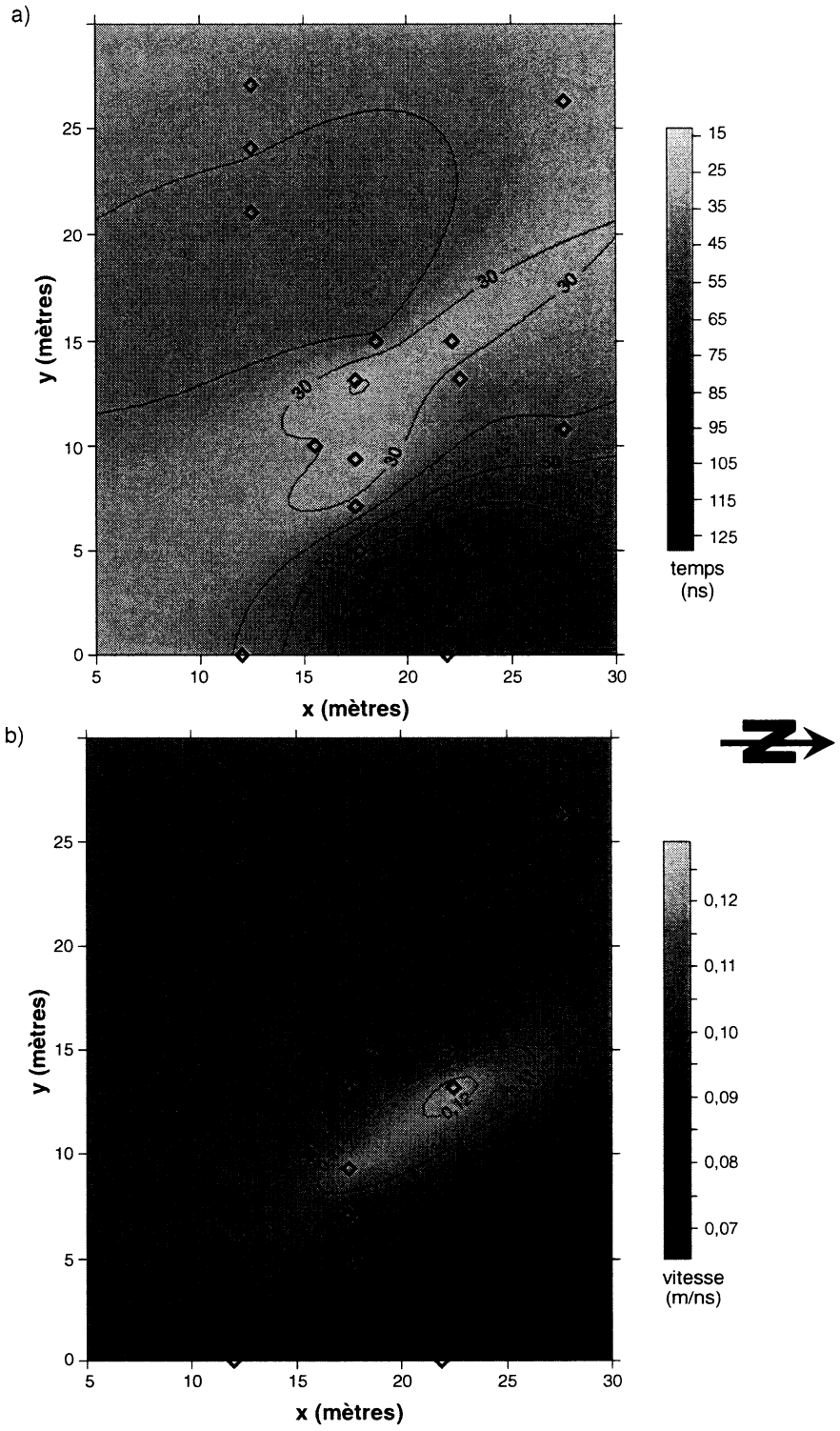


Figure 4.38 : Analyse des hyperboles de diffraction, phase II, après infiltration : a) temps au sommet de l'hyperbole, b) vitesse estimée

4.3.3.3 Effets de l'essai d'infiltration

Bien que la comparaison visuelle des profils « avant infiltration » par rapport à ceux « après infiltration » permette d'identifier de légères variations dans les résultats, on ne peut pas tirer des conclusions intéressantes en ce qui a trait à l'effet de l'infiltration d'eau sur les propriétés diélectriques des stériles, car ces variations pourraient également être dues à d'autres facteurs comme la position des antennes lors de l'acquisition du profil. De plus, la faible densité d'hyperboles de diffraction ne permet pas une analyse adéquate de la variation des vitesses de propagation dans la zone de l'essai d'infiltration. Une stratégie plus rigoureuse doit donc être envisagée afin de comparer les profils radar. Une méthode sera présentée au chapitre 5 lors de l'analyse des résultats.

Chapitre 5 - Analyse des résultats et interprétation intégrée

5.1 Généralités

Bien qu'indispensable, les résultats présentés dans le chapitre précédent ne permettent pas d'obtenir le maximum de l'information pouvant être tirée des données. Une analyse plus poussée des données est de mise notamment afin de faire le lien entre les différentes méthodes géophysiques utilisées, ainsi qu'entre les différentes phases de terrain ayant été effectuées.

Le but du présent chapitre est par conséquent de présenter une analyse en profondeur des résultats obtenus et de faire une interprétation intégrant les deux méthodes géophysiques utilisées. Les sections qui suivent présentent diverses observations provenant de l'analyse des résultats en tenant compte des connaissances relatives à la structure et à l'écoulement des fluides dans les haldes à stériles.

5.2 Liens entre la résistivité électrique et le géoradar

En comparant les résultats obtenus avec la résistivité électrique et le géoradar, il est possible d'identifier deux types de corrélations :

- La limite de la couche résistive avec les variations de la pénétration du signal radar;
- Les maximums ponctuels de résistivité avec les hyperboles de diffraction.

Dans le premier cas, on remarque que lorsque la résistivité du terrain est plus élevée, la densité d'information provenant du géoradar est aussi plus élevée. Ainsi, il y a une plus grande concentration d'hyperboles de diffraction dans les zones où la résistivité du terrain est élevée, tel que vu par exemple au profil X20 (figures 4.2e et 4.29e). En contrepartie, dans les zones où la résistivité du terrain est faible, soit la partie sud de la grille et les zones plus en profondeur, le signal radar montre une signature différente, tel que vu par exemple au profil X00 (figures 4.2a et 4.29a). Dans ce cas, l'amplitude des réflecteurs est plus faible et l'atténuation du signal est beaucoup plus importante.

La zone à faible résistivité en profondeur semble correspondre à l'horizon oxydé observé en tranchée. Or, puisque le sol est plus conducteur en profondeur, il est normal que l'atténuation du signal radar soit plus importante. Dans le cas des zones à faible résistivité plus près de la surface au sud de la grille, il se peut qu'il y ait présence d'une extension vers la surface de cet horizon oxydé. Cependant, l'absence d'une tranchée au sud de la grille empêche la confirmation de cette hypothèse.

Une autre façon d'expliquer les zones à faible résistivité au sud de la grille pourrait être qu'il y a une plus grande proportion de particules fines dans les stériles. Dans ce cas, il pourrait y avoir une accumulation d'eau dans les matériaux qui engendrerait une résistivité plus faible comparée à la zone au nord où le sol contiendrait moins de particules fines. Sur le terrain, les matériaux de surface étaient plus compactés dans la partie sud de la grille que dans la zone au nord où le sol était plus lâche et où l'on observait une plus grande quantité de blocs. Les résultats du géoradar soutiennent cette hypothèse. En effet, une teneur en eau plus élevée dans les matériaux engendre une augmentation de la conductivité du sol et par conséquent, une augmentation de l'atténuation du signal radar.

Pour ce qui est des hyperboles de diffraction, la position d'un certain nombre d'entre elles sur les profils radar correspond à la position de « noyaux » résistifs sur les profils d'inversion de résistivité. Ces diffractions pourraient être causées par la présence d'objets ponctuels résistifs dans les stériles. L'hypothèse d'objets métalliques enfouis causant ces diffractions doit être rejetée puisque ces derniers sont conducteurs et non résistifs. Par conséquent, ces diffractions laissent croire à la présence de blocs de roche dans les stériles. La résistivité de ces derniers par rapport aux matériaux fins pourrait être plus élevée puisque les blocs ont tendance à être moins altérés que la fraction fine. Un certain nombre d'hyperboles ne peuvent pas être corrélées sur les profils de résistivité. Dans ce cas, il s'agirait d'artéfacts ponctuels n'ayant pas de contraste de résistivité avec les matériaux encaissants.

Le profil X15a est un bon exemple pour illustrer les observations présentées dans cette section. Tel que présenté à la figure 5.1, on peut faire une corrélation entre un

changement net dans l'amplitude ainsi que l'atténuation du signal radar et les zones où la résistivité est plus faible aux endroits délimités par les lignes pointillées sur la figure. De plus, la position des hyperboles de diffraction présentes sur le profil radar correspond bien avec des pics de résistivité électrique. Donc ces maxima de résistivité et ces hyperboles seraient causés par les mêmes objets.

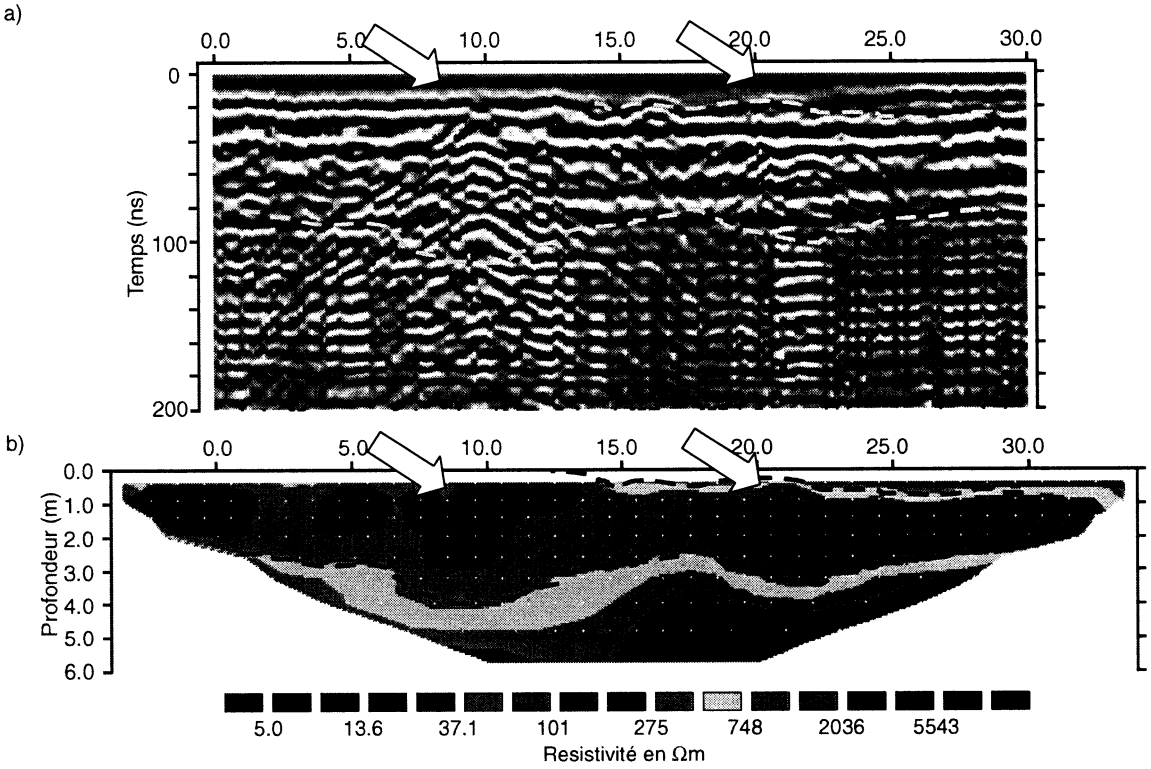


Figure 5.1 : Corrélation entre le géoradar et la résistivité, profil X15a; a) géoradar et b) résistivité

5.3 Effets du climat

Les propriétés géophysiques des matériaux meubles sont influencées par les variations climatiques survenant au cours d'une année. Une période de grande infiltration entraînera une plus forte teneur en eau dans le sol et par conséquent, la conductivité de celui-ci augmenterait.

Puisque les phases I et II des travaux ont été effectuées à des périodes différentes de l'année, au début de l'été et au début de l'automne respectivement, des changements

dans les résultats lors de la répétition des mesures étaient attendus. En dressant des profils des rapports des résistivités obtenus à l'aide de l'inversion de type « time-lapse », il est possible de quantifier la variation de la résistivité des stériles entre les deux phases des travaux. La figure 5.2 présente les rapports de résistivité entre le mois de juillet et le mois d'octobre. Un rapport de résistivité de 50% indique que la résistivité du sol était deux fois plus faible à cet endroit au mois d'octobre par rapport au mois de juillet. De même, lorsque ce rapport est égal à 100%, alors la résistivité du sol est demeurée la même entre les deux campagnes de terrain.

De façon générale, on observe une diminution de la résistivité du sol entre le mois de juillet et le mois d'octobre. Ce résultat n'est pas surprenant, car la campagne de juillet s'est déroulée suivant une période où les précipitations étaient faibles. Dans le cas de la campagne d'octobre, des précipitations ont eu lieu durant la semaine précédant les travaux, de même que durant ces derniers.

Une étude plus détaillée permet de déterminer le comportement des différentes zones de la halde suivant ces changements. La partie située au sud de la grille montre une chute considérable de la résistivité dans une tranche située entre 1 et 6 mètres de profondeur. En contrepartie, les matériaux prés de la surface montrent une augmentation de la résistivité par rapport à ce qui a été mesuré lors de la phase I. Au fur et a mesure que l'on se déplace vers le nord de la grille, on observe plusieurs phénomènes :

- la résistivité des matériaux en surface est plus faible en octobre qu'en juillet, avec un minimum sur les profils X05 et X10 aux chaînages supérieurs à y =15m (voir figures 5.2b et c);
- la résistivité des matériaux a augmenté à certains endroits entre les mois de juillet et octobre, notamment sur les profils X05, X10 et X15 (voir figures 5.2b, c et d) où apparaît un « noyau » plus résistif aux chaînages supérieurs à y = 20 m à partir d'une profondeur d'environ 2 mètres;
- il y a une forte chute de résistivité au profil X30. Cependant, l'analyse des erreurs à la section 4.2.4 montrait de fortes erreurs dans les données du

profil X30b. Ceci laisse croire que cette chute de résistivité est due à des mauvaises données plutôt qu'à une variation des propriétés physiques des stériles à cet endroit.

Il est intéressant de noter que les variations de la résistivité du terrain observées ne correspondent pas nécessairement aux principaux horizons du modèle de résistivité de la halde. Ceci laisse croire que les zones d'emmagasinement de l'eau au sein des stériles ne seraient pas uniquement liées à la nature de ces derniers. Il pourrait donc y avoir accumulation d'eau dans une partie de la couche résistive supérieure sans qu'il y ait accumulation ailleurs sur la même couche (tel que l'on peut voir sur la figure 5.2d).

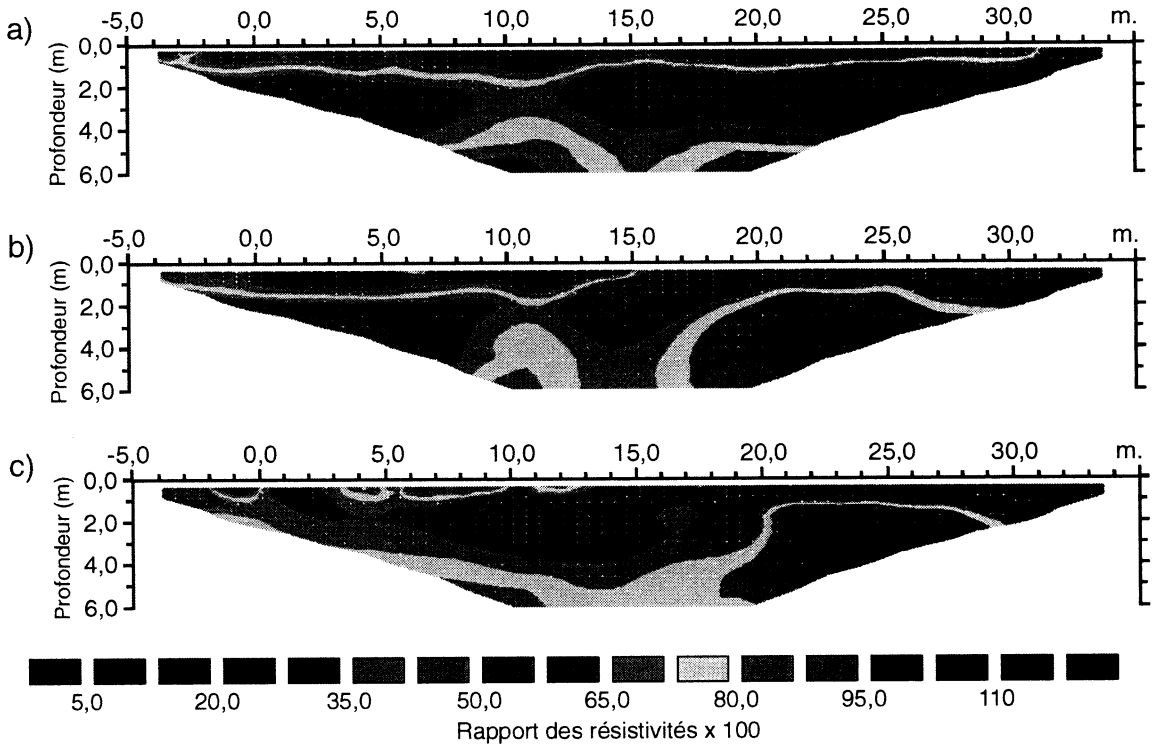


Figure 5.2 : Profils montrant les rapports des résistivités entre les phases I et II en fonction de la profondeur; a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30

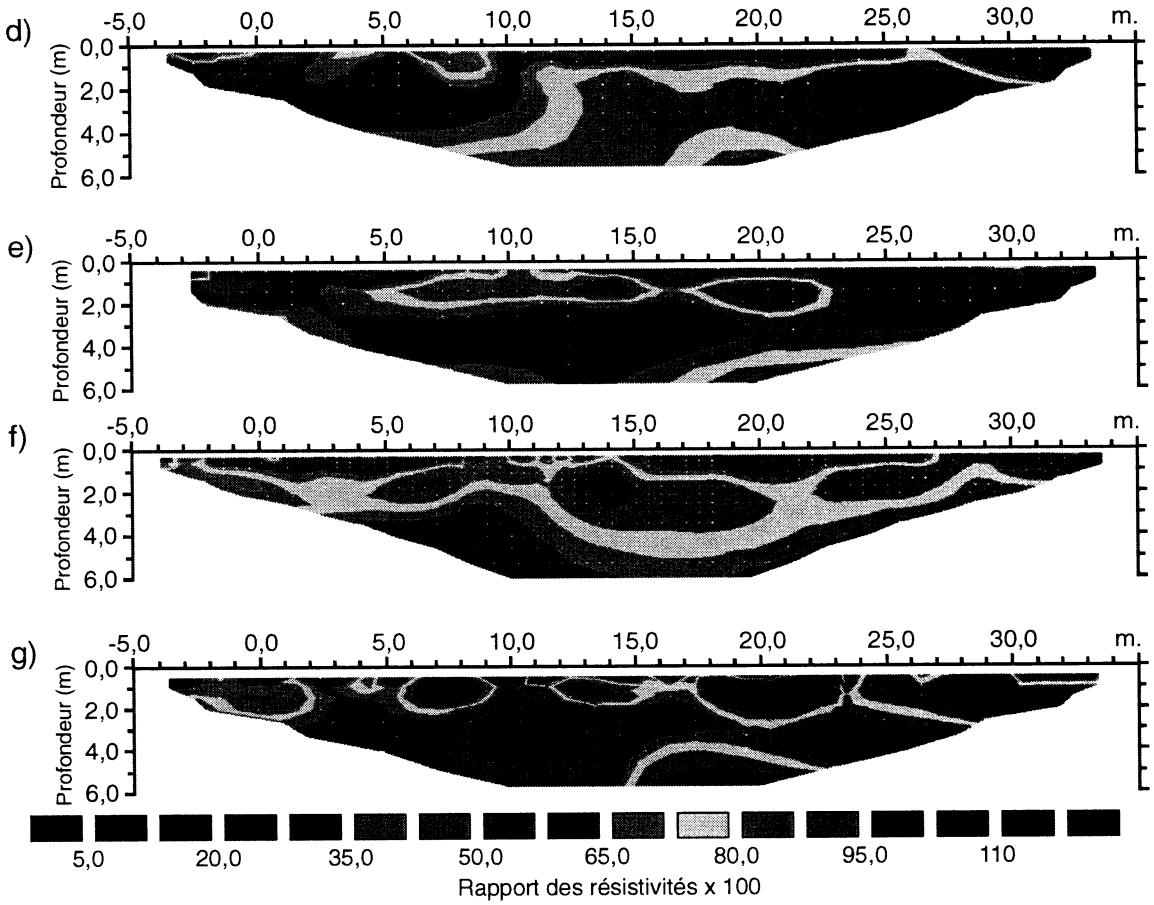


Figure 5.2 (suite) : Profils montrant les rapports des résistivités entre les phases I et II en fonction de la profondeur; a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30

Tel que mentionné à la section 4.3.3, une diminution de la qualité du signal radar peut être observée entre les résultats de la phase II et ceux obtenus à la phase I. En effet, la pénétration et l'intensité du signal radar sont plus faibles lors de la campagne d'octobre, tel que montré à la figure 5.3 où l'on présente les résultats du profil Y10 mesurés lors de la première phase des travaux et lors de la deuxième phase avant l'infiltration de l'eau.

Cette variation dans la propagation des ondes indique une variation dans les propriétés diélectriques des stériles. Tout comme pour la résistivité, une augmentation de la teneur en eau dans le sol implique une augmentation de la conductivité du sol.

Dans le cas du géoradar, une conductivité plus forte augmente l'atténuation du signal radar. Par conséquent, la pénétration du signal dans la halde est moindre et certaines des structures observées lors de la première phase ne sont pas visibles dans les profils obtenus à la deuxième phase des travaux.

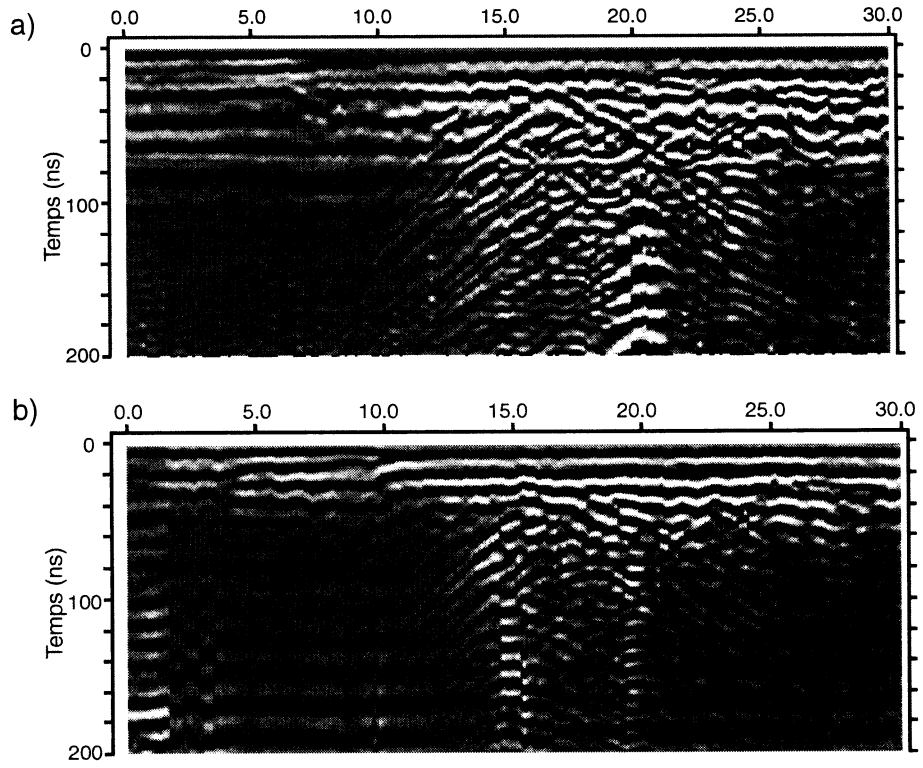


Figure 5.3 : Profil y=10; comparaison des résultats entre a) phase I et b) phase II avant infiltration

5.4 Effets de l'essai d'infiltration

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, l'étude de l'influence de l'essai d'infiltration sur les données géophysiques brutes est une tâche plutôt difficile. Un avantage de l'inversion des résistivités apparentes par la méthode « time-lapse » est qu'il est possible de comparer les modèles de résistivité obtenus pour chaque série de données dans le temps à l'aide du logiciel RES2DINV, comme cela a été fait pour étudier les variations saisonnières à la section précédente. Les profils montrant le rapport entre les résistivités avant et après infiltration sont présentés à la figure 5.4. On

voit bien l'influence de l'essai d'infiltration sur la résistivité du sol, qui est marquée par des rapports de résistivité faibles (jusqu'à près de 5% pour le profil X20, figure 5.4e).

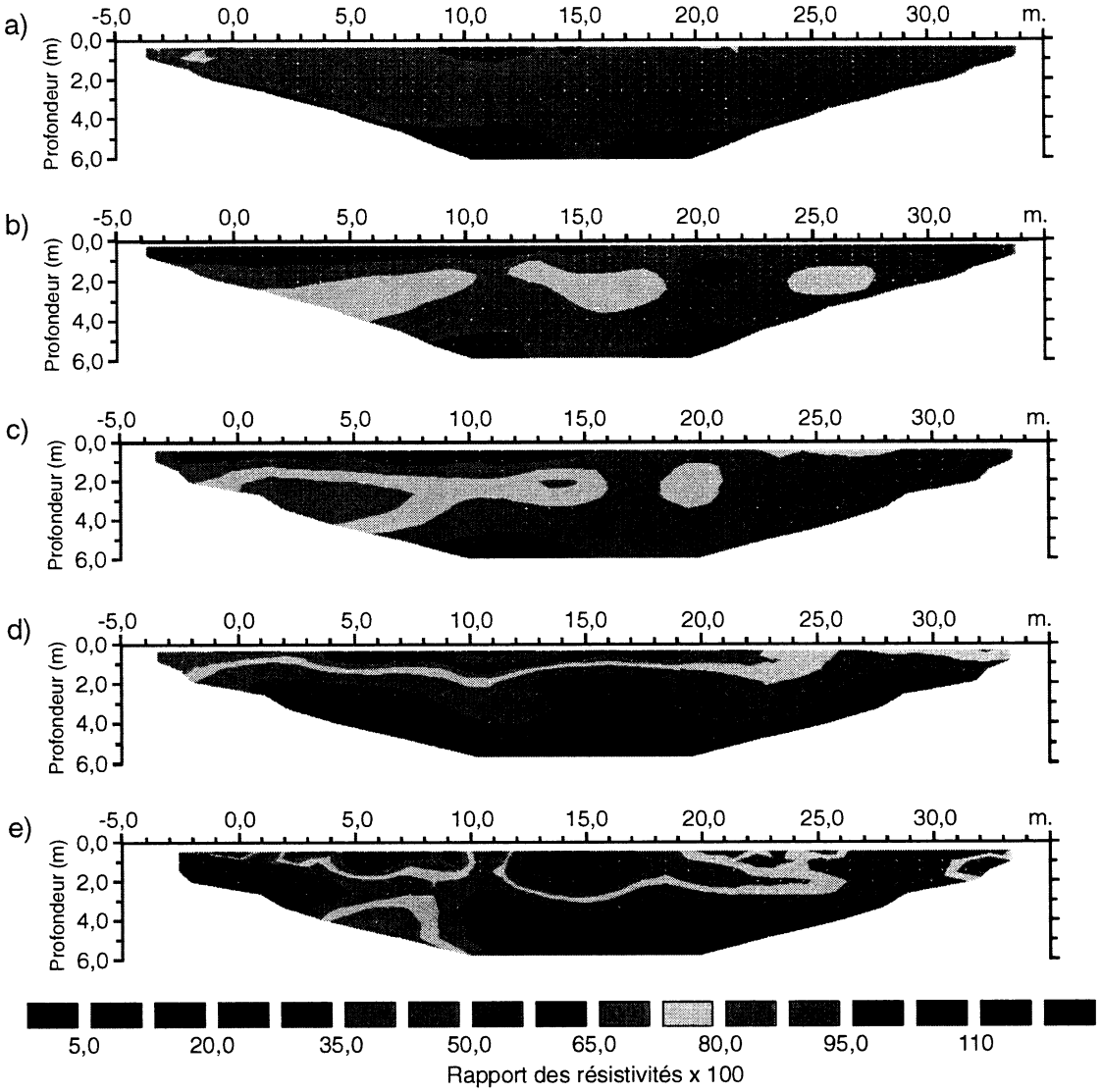


Figure 5.4 : Profils montrant les rapports des résistivités entre la phase II avant infiltration et après infiltration en fonction de la profondeur; a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30

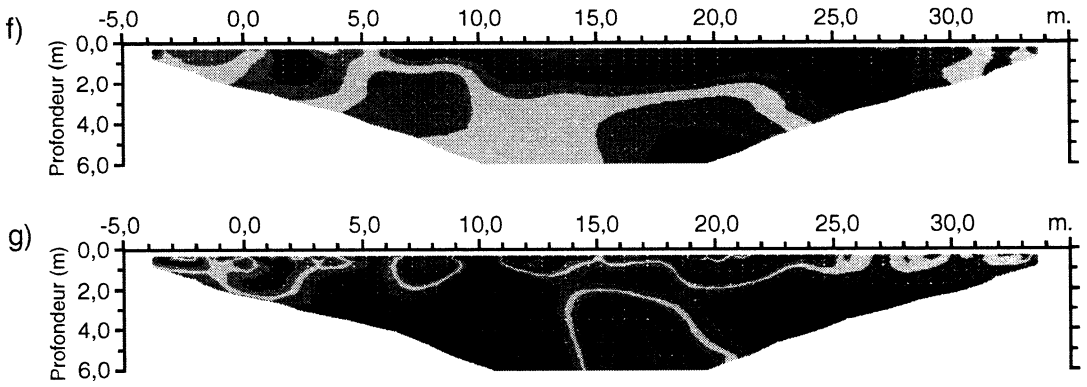


Figure 5.4 (suite) : Profils montrant les rapports des résistivités entre la phase II avant infiltration et après infiltration en fonction de la profondeur; a) X00, b) X05, c) X10, d) X15, e) X20, f) X25 et g) X30

Afin de mieux visualiser l'influence de l'essai d'infiltration en fonction de la profondeur, des sections horizontales ont aussi été produites pour des différentes profondeurs et sont présentées à la figure 5.5. Deux courbes de niveau sont montrées dans ces sections, soit les rapports de résistivité de 50% et de 65%. Le profil X30 n'a pas été tenu en compte pour tracer ces courbes en raison de la fiabilité douteuse du profil X30b, tel qu'expliqué dans une section précédente.

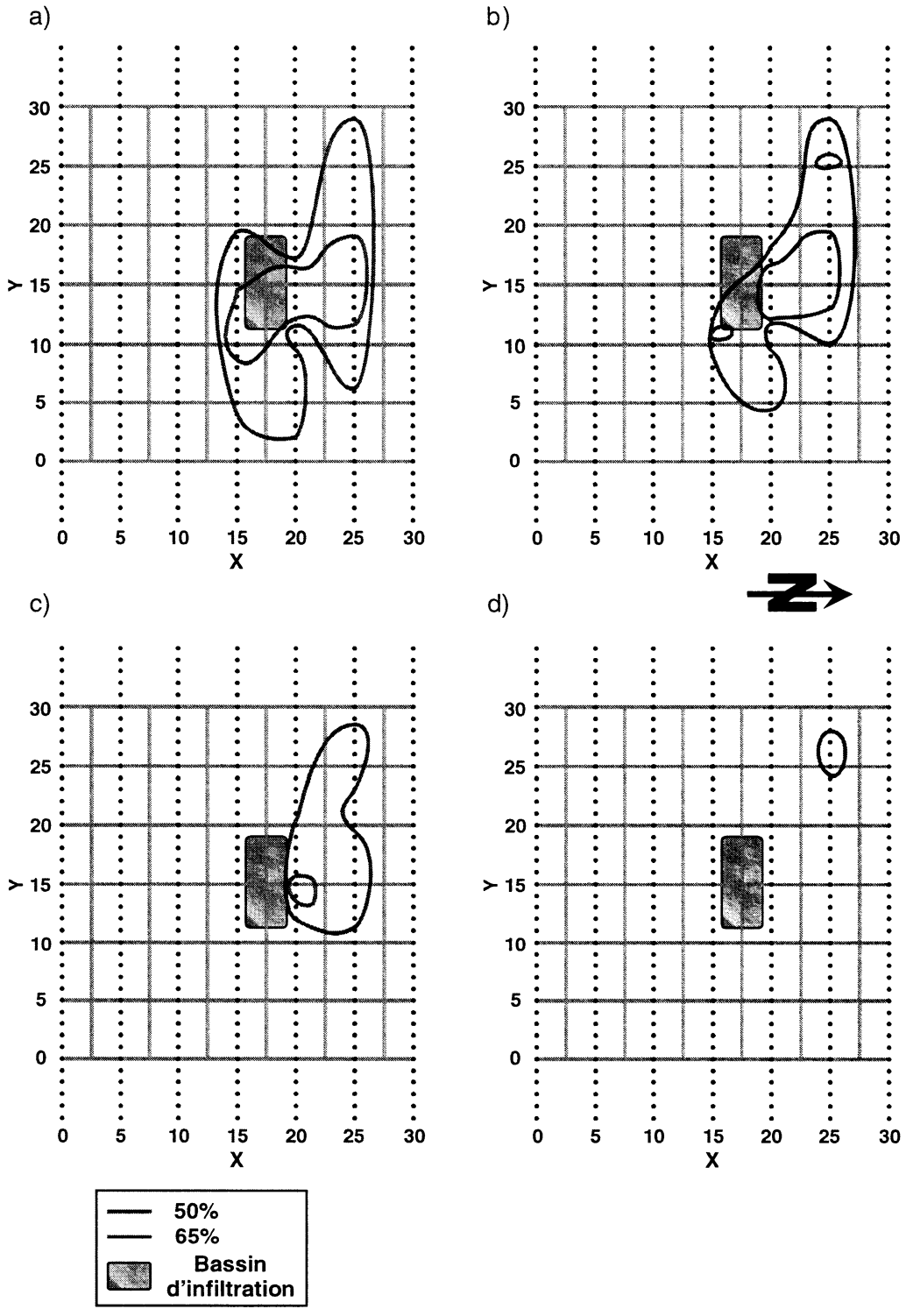


Figure 5.5 : Isocontours des rapport des résistivités en fonction de la profondeur; a) en surface, b) 1m, c) 2m et d) 3m

Puisque la formule d'Archie (équation 2.10) exprime la résistivité en fonction du degré de saturation, il est possible d'obtenir un indice sur la variation de la saturation en substituant les résistivités dans la formule d'Archie de la manière suivante :

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{a\phi^{-m}S_1^{-n}\rho_w}{a\phi^{-m}S_2^{-n}\rho_w} = \frac{S_1^{-n}}{S_2^{-n}} \tag{5.1}$$

Ceci suppose que les paramètres *a, p, m, n* et ρ_w sont constants entre avant et après l'infiltration de l'eau. En réalité l'écoulement de l'eau risque de faire varier ces paramètres. Cependant, puisque $n \approx 2$ (eq. 2.10), cette simplification permet d'obtenir :

$$S_2 = \frac{S_1}{\sqrt{\rho_2 / \rho_1}} \tag{5.1b}$$

Donc selon l'équation 5.1b, les courbes de rapport de résistivité présentées à la figure 5.5 correspondraient à un degré de saturation après infiltration de 1,24 fois plus grand qu'avant l'infiltration pour la courbe de 65% (soit ρ_2/ρ_1 = 0,65) et 1.41 fois plus grand pour la courbe de 50% (soit ρ_2/ρ_1 = 0,5).

Contrairement aux résultats de la modélisation numérique présentés à la section 4.2.3, les effets de l'essai d'infiltration dans la halde à stériles ne sont pas symétriques par rapport au bassin d'infiltration. Au contraire, en supposant que les endroits affectés par des chutes de résistivité correspondent aux endroits où il y à présence d'eau, on constate que l'infiltration de l'eau affecte de façon considérable les zones situées au nord et à l'est du bassin d'infiltration. La zone à l'est est affectée surtout près de la surface, soit dans le premier mètre. L'effet de l'infiltration d'eau se fait sentir beaucoup plus dans la zone au nord où l'on observe des chutes de résistivité considérables jusqu'à une profondeur de trois mètres. Les chutes de résistivité les plus importantes

(courbe de 50%) sont concentrées dans une zone limitée à environ 5 mètres du bassin et jusqu'à une profondeur de deux mètres.

Ces résultats indiquent la possibilité d'écoulements préférentiels dans les stériles avec deux directions d'écoulement dont la principale serait vers le nord/nord-ouest. Du point de vue structural, l'écoulement se limite aux stériles montrant une forte résistivité dans la zone centrale et au nord de la grille d'étude. De plus, si on compare les zones où l'on observe des chutes de résistivité aux profils de géoradar, on constate que la zone d'influence de l'infiltration (courbe 65%) correspond aux zones où l'on observe la majorité des structures sur les profils radar, tel que montré à la figure 5.6. En contrepartie, les zones où le signal radar est fortement atténué ne sont pas affectées par des baisses de résistivité.

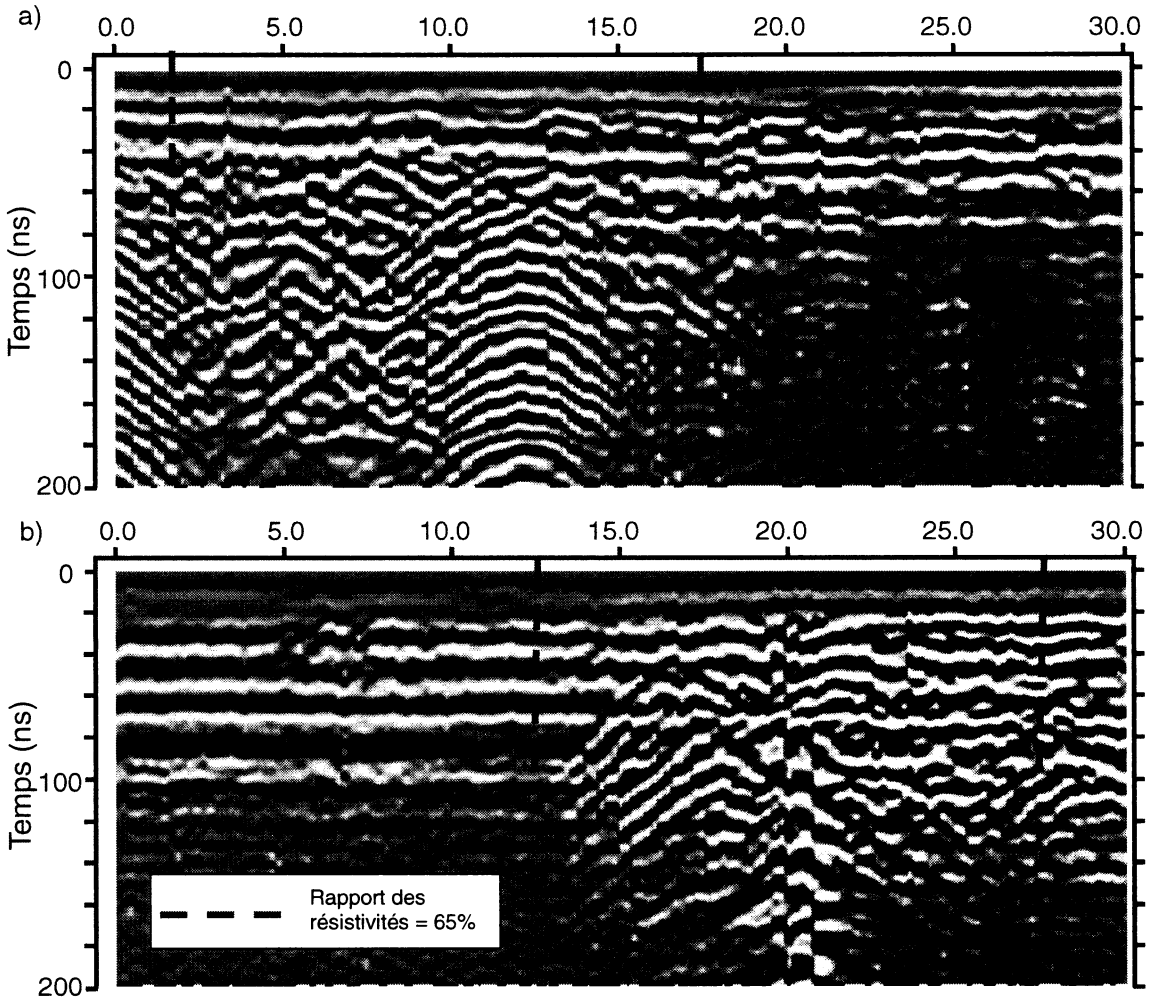


Figure 5.6 : Corrélation entre les profils radar et la zone d'influence correspondant à un rapport des résistivités de 65%; a) profil X20a et b) profil Y15a

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, il ne semble pas y avoir un effet marquant de l'infiltration de l'eau sur les mesures effectuées avec le géoradar après l'infiltration par rapport à avant l'infiltration. Afin de mieux évaluer cet effet, une série de traces situées dans la zone où il y a des baisses de résistivité (extraites aléatoirement des profils radar) ont été étudiées en comparant les variations dues à l'essai d'infiltration de manière qualitative. Les traces ont été classées selon trois niveaux soit celles montrant peu ou pas de variations dans les temps d'arrivée des différents

réflecteurs (figure 5.7a), celles montrant une variation moyenne dans les temps d'arrivée des différents réflecteurs (figure 5.7b) et celles montrant une forte variation dans les temps d'arrivée des différents réflecteurs (figure 5.7c). Les résultats de cette analyse sont résumés au tableau 5.1 qui présente le pourcentage des traces ayant été classées selon le degré d'influence de l'essai d'infiltration, tel que défini ci-haut.

Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse de l'effet de l'infiltration sur les traces du géoradar; pourcentage des traces ayant été classées selon le degré d'influence de l'essai d'infiltration

		%
Influence	Forte	25
	Moyenne	42
	Faible	33

Il n'est pas possible à cette étape de trouver une relation claire entre l'essai d'infiltration et les variations dans la propagation du signal radar, mis on constate qu'il y a bel et bien une influence de l'infiltration sur le signal radar. En effet, plus de 65% des traces étudiées ont été moyennement à fortement affectées par l'infiltration de l'eau (tableau 5.1). Cependant, aucune corrélation spatiale n'a pu être établie entre les traces et leur position sur la grille d'étude. La grande hétérogénéité du site pourrait expliquer ce comportement imprévisible du signal radar. Une étude plus approfondie par méthodes géostatistiques pourrait éclaircir cette ambiguïté.

a)

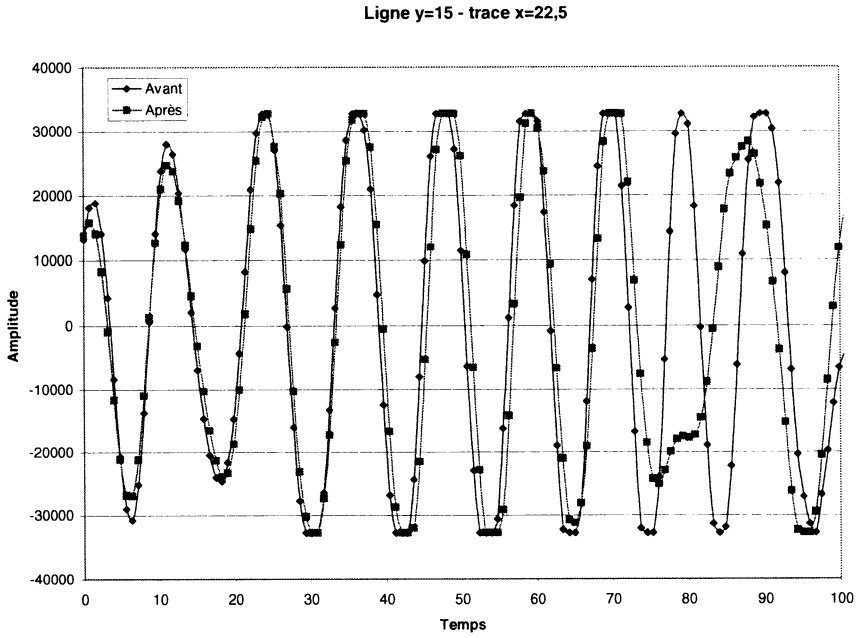
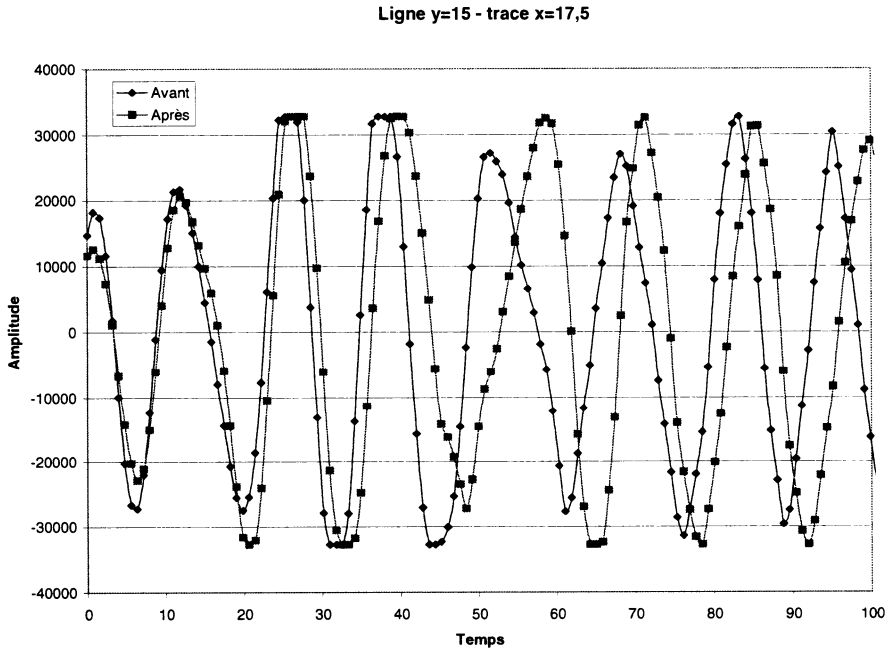


Figure 5.7 : Exemple de traces ayant été utilisés afin de comparer l'influence de l'essai d'infiltration sur les résultats du géoradar; a) peu de variations, b) variation moyenne et c) fortes variations

b)



c)

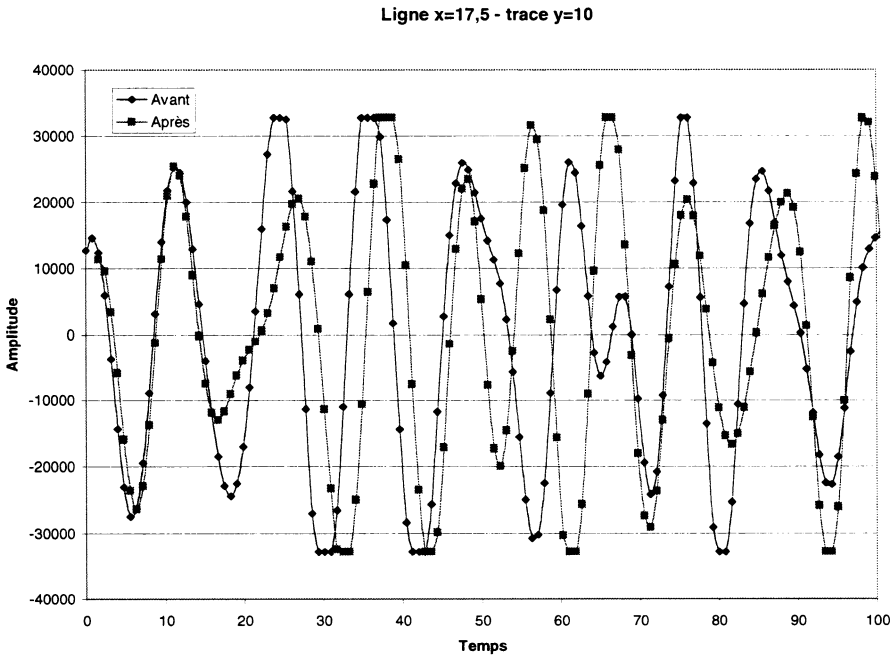


Figure 5.7 (suite) : Exemple de traces ayant été utilisés afin de comparer l'influence de l'essai d'infiltration sur les résultats du géoradar; a) peu de variations, b) variation moyenne et c) fortes variations

5.5 Comparaison avec une étude parallèle

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été suivis d'une autre campagne de géophysique sur la halde à stériles de la mine Laronde en 2003 (Poisson, 2004). Diverses méthodes ont été appliquées afin d'approfondir la caractérisation de la halde. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- Les méthodes électromagnétiques fréquentielles et temporelles (TDEM), la résistivité électrique et le géoradar à grand angle ont permis de confirmer le modèle de la structure de la halde présenté par la présente étude;
- La méthode TDEM a permis d'identifier une couche résistive en profondeur qui n'a pas été décelée lors de la présente étude en raison de la profondeur

d'investigation limitée de la résistivité électrique (en raison de la configuration d'électrodes utilisée) et du géoradar;

- Le géoradar et la résistivité électrique ont permis une caractérisation des pentes de la halde à stériles. La ségrégation des particules (grossières au pied de la halde et fines au haut des pentes) fait en sorte que l'on retrouve de fortes résistivités au pied de la halde tandis que la résistivité est plus faible au haut des pentes. Le géoradar a permis d'identifier des stratifications le long des pentes;
- Les méthodes électromagnétiques fréquentielles et le géoradar en profil n'ont pas été en mesure de déceler les écoulements préférentiels au sein de la halde;
- Le monitoring de l'essai d'infiltration par géoradar à grand angle a été en mesure de déceler un écoulement préférentiel vers l'est du bassin d'infiltration, ceci n'a pas été possible par profilage géoradar lors des travaux effectués en 2002 pour la présente étude;
- Le monitoring de l'essai d'infiltration par résistivité électrique en mode dipôle-dipôle équatorial a montré une baisse de résistivité importante au nord-est du bassin d'infiltration.

Les diverses méthodes utilisées lors des campagnes de terrain de 2002 et de 2003 ont donné des résultats concordants en ce qui a trait à la structure de la halde à stériles dans la zone d'étude. Ceci est également le cas en ce qui a trait aux zones affectées par les essais d'infiltration lors des diverses campagnes de terrain. Cependant, les résultats du monitoring de l'essai d'infiltration de 2003 diffèrent selon certains aspects de ceux de la présente étude. L'écoulement vers l'est observé en 2003 par la méthode géoradar à grand angle a été décelée par la résistivité électrique en 2002. La méthode électrique montrait cependant des chutes de résistivité limités au premier mètre à partir de la surface. Il se pourrait que le front de mouillage ait atteint des profondeurs plus élevées à l'est du bassin lors des essais de 2003.

La méthode géoradar à grand angle n'a pas décelé d'écoulement vers le nord lors des levés de 2003. Pourtant, de fortes baisses de résistivité observées en 2002 montrent

clairement une influence de l'essai d'infiltration au nord du bassin (figure 5.5). Poisson (2004) explique que le monitoring par géoradar à grand angle dans la direction nord-sud n'était pas optimal, car le signal était trop faible en raison de la longueur du bassin. Ceci pourrait expliquer pourquoi l'écoulement vers le nord n'a pu être décelé par cette méthode.

Le monitoring par résistivité électrique de 2003 montre des chutes de résistivité au nord-est du bassin qui n'ont pas été observées en 2002. Il se pourrait que lors des essais d'infiltration de 2003, l'eau ait emprunté des cheminements préférentiels différents que lors des essais de 2002. Cependant, les résultats de 2003 ne sont basés que sur deux mesures. Des travaux supplémentaires seraient nécessaires afin de confirmer l'hypothèse des cheminements préférentiels différents.

Les différents résultats obtenus lors des campagnes de 2002 et 2003 montrent l'importance de l'utilisation de diverses méthodes géophysiques de manière complémentaire. Chaque méthode comporte des avantages et limitations qui lui sont propres et il est donc primordial de tenir compte des informations fournies par chacune d'elles. Il serait donc utile de poursuivre les travaux sur le site afin de répondre aux quelques questions qui ont été soulevées ici.

Chapitre 6 - Conclusion et recommandations

Une étude de caractérisation par méthodes géophysiques a été effectuée sur une halde à stériles située sur le complexe de la mine Laronde, lors de deux phases de travaux à l'été et à l'automne de l'année 2002. L'utilisation de deux méthodes géophysiques, soit la résistivité électrique et le géoradar, a permis de dresser un modèle de la structure interne de la halde à stériles sous une parcelle expérimentale de 30 mètres par 30 mètres.

La structure interne de la halde à stériles montre la présence de deux principaux matériaux. Le premier est caractérisé par de faibles résistivités et une forte absorption du signal émis par le géoradar. Le second est caractérisé par de fortes résistivités, par une plus grande pénétration du signal radar et par la présence de nombreux objets ponctuels, probablement des blocs de roche, causant des diffractions importantes du signal géoradar et des maxima ponctuels de résistivité. Une tranchée d'exploration excavée près de la zone d'étude confirme la présence de deux matériaux distincts. Le premier, présent à une profondeur de l'ordre de 2 mètres, présente un aspect fortement oxydé. Le second, plus grossier, est situé près de la surface et il montre peu de traces évidentes d'oxydation.

D'après les résultats obtenus avec les mesures de résistivité électrique, le sol oxydé correspondrait à une zone à faible résistivité qui se trouve principalement à des profondeurs d'environ 2 à 3 mètres, de même que sur la totalité de la zone située dans la partie sud de la grille d'étude. Le matériau non oxydé correspondrait à la zone à forte résistivité que l'on retrouve sous la forme d'un « noyau » situé dans la partie centrale et au nord de zone d'étude. Ce noyau est localisé dans les 2 à 3 premiers mètres à partir de la surface. Les résultats du géoradar montrent une stratification horizontale dans les stériles, avec une réflexion importante du signal à l'interface entre les deux matériaux. Les stratifications horizontales sont également présentes dans la zone au sud de la halde où l'on retrouve une distribution plus homogène de la résistivité du sol. Une investigation plus approfondie serait nécessaire dans cette zone pour préciser la nature de cette stratification, qui pourrait être due à la présence d'un

troisième type de matériau n'étant pas présent dans la tranchée. Une tranchée exploratoire au sud de la halde pourrait être considérée. Elle permettrait de vérifier la composition des stériles à cet endroit et de les comparer aux échantillons recueillis au nord de la zone d'étude. De plus, en effectuant une tranchée au sud de la zone d'étude, il serait possible d'observer la stratification près de la pente sud de la halde.

L'exécution de deux campagnes de terrain a permis d'étudier les variations saisonnières des propriétés géophysiques des stériles. Cette étude montre qu'il y a d'importantes variations dans la résistivité du matériau, ainsi que de la propagation du signal radar lorsque les mêmes levés sont effectués à des périodes de l'année différentes. Dans ce cas, la résistivité des stériles a principalement diminué entre la première et la seconde phase de terrain. Pour leur part, les sections géoradar sont caractérisées par une diminution de la pénétration du signal. Ces variations sont probablement dues à une variation dans les propriétés du matériau, tel une augmentation de la teneur en eau.

Il serait possible de faire un suivi dans le temps des conditions de saturation des stériles. En corrélant les données géophysiques avec des mesures de la teneur en eau et de la résistivité de l'eau, on pourrait obtenir une estimation de la distribution du degré de saturation. Ceci permettrait d'identifier des zones d'accumulation d'eau et des zones où l'évaporation est plus importante, qui pourraient être plus propices à la génération de DMA. De plus, un suivi par méthodes géophysiques permettrait de déterminer les conditions climatiques qui conduisent à un maximum de pénétration du signal radar, et par conséquent de l'information sur la structure des stériles.

Les mesures de résistivité effectuées en parallèle à un essai d'infiltration ont permis d'identifier des zones propices à des écoulements préférentiels dans la halde. La direction principale de l'écoulement est orientée vers le nord/nord-ouest et un écoulement moins important a été observé vers l'est. Ces zones sont marquées par des chutes significatives de la résistivité du sol. Le monitoring de l'essai d'infiltration par la méthode géoradar s'est avéré beaucoup moins efficace. Bien que des variations aient été observées dans le signal radar entre les mesures effectuées avant et après

l'essai d'infiltration, il a été impossible de délimiter une zone d'influence de l'essai d'infiltration sur les profils radar. Cependant, en corrélant les zones d'influence observées à l'aide de la résistivité électrique et les profils radar, il est possible de conclure que les zones touchées par l'essai d'infiltration correspondent aux zones de fortes résistivités, également caractérisées par une forte concentration d'hyperboles de diffraction dans les profils radar, situées dans la partie centrale et au nord de la grille d'étude. Les travaux menées en 2003 (Poisson, 2004) confirment, de manière générale, les observations présentées ci-haut. Néanmoins, certaines contradictions demeurent, notamment en ce qui a trait aux directions des écoulements préférentiels dans les stériles. Des études supplémentaires sont recommandées afin de clarifier la situation.

Bien que l'essai d'infiltration ait permis de montrer le comportement de l'écoulement dans la zone centrale de la parcelle d'étude, ces résultats ne permettent pas de prédire les effets d'un tel essai dans la partie plus au sud de la halde où l'on observe de faibles résistivités et une plus grande atténuation du signal radar. Par conséquent, il est recommandé de mener un essai similaire dans cette zone. De plus, pour augmenter l'efficacité de ce type d'essai, il serait nécessaire d'utiliser un système d'acquisition multicanaux pour la prise de mesures de résistivité. Ceci permettrait de réduire le temps d'acquisition des profils et ainsi obtenir des profils plus représentatifs du moment où l'essai a eu lieu. L'exécution d'un essai d'infiltration au moment où la pénétration du signal radar est optimale pourrait permettre d'obtenir des résultats plus concluants que ceux obtenus dans cette étude.

D'autres techniques géophysiques pourraient aussi être considérées pour faire le suivi d'essais d'infiltration. Les méthodes en forage telles que la tomographie électrique et la tomographie radar sont une voie à explorer. La tomographie électrique permettrait d'obtenir des informations supplémentaires sur la distribution de la résistivité électrique dans les stériles de même que sur la porosité, la saturation et la conductivité hydraulique des stériles. La tomographie radar pourrait s'avérer plus efficace pour étudier les effets des essais d'infiltration sur la propagation du signal du géoradar. L'exécution de forages permettrait également de calibrer les résultats du géoradar

avec les lithologies afin de pouvoir identifier clairement la profondeur des réflecteurs qui ont été observés sur les résultats de la présente étude. Le même exercice pourrait être effectué avec les mesures de résistivité en fonction de la stratigraphie observée dans les forages. Il y a cependant plusieurs points à considérer lors de l'exécution de forages. Forer dans des stériles pose un défi, car ce sont des matériaux présentant des caractéristiques particulières. Le choix d'une méthode de forage appropriée est essentiel. De plus, puisque les forages serviraient à faire des mesures géophysiques, il est primordial qu'il n'y ait pas d'affaissement des matériaux des parois, d'où la nécessité d'un tubage. Ce dernier devrait être en PVC, car un tubage métallique éliminerait la possibilité de mesures par géoradar.

Il serait aussi possible d'obtenir de l'information sur la présence de sulfures disséminés dans la roche stériles en effectuant des levés de polarisation provoquée. Cette information permettrait d'identifier des zones ayant un plus grand potentiel de génération de DMA si ces dernières sont exposées à l'air et à l'eau.

Des mesures de résistivité avec d'autres configurations d'électrodes ou avec un plus grand écartement entre les électrodes permettrait d'obtenir une plus grande pénétration dans la halde et ainsi mieux définir l'extension de la zone à faible résistivité en profondeur. Cette information pourrait également être obtenue à l'aide de levés électromagnétiques dans le domaine du temps (TDEM), méthode qui a été appliquée avec succès par Poisson (2004), mais de manière ponctuelle.

Bien qu'elle n'ait pas été traitée dans la présente étude, la caractérisation des matériaux dans les pentes des haldes à stériles demeure un point critique dans la compréhension des processus de formation du DMA dans les haldes. Poisson (2004) montre que les méthodes géophysiques ont permis une caractérisation d'une pente de la halde de la mine Laronde. Par conséquent, il est recommandé de poursuivre des travaux afin de mieux connaître la nature des matériaux sur les parois des empilements. Cependant, la pente de repos élevée et la faible cohésion des matériaux sur les pentes posent un problème d'application des méthodes géophysiques classiques, qui sont adaptées pour des terrains moins accidentés. Par conséquent,

des mesures particulières doivent être considérées pour effectuer ce type de levés de façon sécuritaire.

Il est souhaitable d'envisager de nouveaux essais d'infiltration sur la halde à stériles de la mine Laronde, dans une zone près des parois, afin d'étudier l'écoulement de l'eau près des pentes. Ces essais pourraient par la suite être modélisés dans le cadre d'une modélisation qui tiendrait en compte les propriétés géophysiques, mais aussi les propriétés hydriques des stériles. De cette façon, il serait possible de mieux expliquer l'interaction entre la présence de l'eau dans les stériles, les types de matériaux présents et les variations dans les propriétés géophysiques de ces derniers.

RÉFÉRENCES

ABEM INSTRUMENT AB, 2004, Terrameter SAS 4000 et Lund Imaging System : Fiches techniques [En ligne], http://www.abem.se (page consultée le 22 mai 2004).

ARCHIE, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics. *Trans A.I.M.E*, 146: pp. 389-409.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. ET BERNIER, L, 2002a, Environnement et gestion des rejets miniers, Presses internationales Polytechnique. CD-ROM.

AUBERTIN, M., FALA, O., BUSSIÈRE, B., MARTIN, V., CAMPOS, D., GAMACHE-ROCHETTE, A., CHOUTEAU, M., CHAPUIS, R., 2002b, Analyse des écoulements de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles. *Défis et perspectives: symposium 2002 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, 3-5 novembre 2002. Développement économique Canada/Ministère des ressources naturelles du Québec/CIM. Comptes rendus sur CD-ROM.

BERGSTRÖM, J., 1996, Development of a geophysical method for investigating and monitoring the integrity of sealing layers on mining waste deposits, Lulea University of Technology, 68 pages.

BERNIER, L., 2003, Notes de cours GNM1008 – Minéralogie environnementale et la formation de DMA, École Polytechnique de Montréal, 107p.

BUETTNER, M., DAILY, W., RAMIREZ, A. ET BUSSOD, G., 1999, Electrical resistance tomography of unsaturated flow and transport in Yucca Mountain, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Oakland, CA, pp.341-347.

CAMPBELL, D.L. ET FITTERMAN, D.V. (USGS), 2000, Geoelectrical methods for investigating mine dumps, *ICARD2000 - Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage*, pp. 1513-1523.

CAMPBELL, D.L. ET HORTON, R.J. (USGS), 2001, Spectral induced polarization studies of mine waste piles in Colorado and New Mexico, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Denver, CO, 13 pages.

CAMPBELL, D.L., FITTERMAN, D.V., HEIN, A.S. ET JONES, D.P. (USGS), 1998, Spectral induced polarization studies of mine dumps near Silverton, Colorado, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Chicago, IL, pp.761-769.

CAMPBELL, D.L., HORTON, R.J., BISDORF, R.J., FEY, D.L., POWERS, M.H. ET FITTERMAN, D.V. (USGS), 1999, Some geophysical methods for tailings/mine waste work, *Tailings and Mine Waste '99*, pp. 35-43.

CAMPOS, D., CHOUTEAU, M., AUBERTIN, M. ET BUSSIÈRE, B., 2003, Using geophysical methods to image the internal structure of mine waste rock piles, *Proceedings 9th meeting of environmental and engineering geophysics*, Prague 2003, pp. O-008.

CARLSON, N.R. ET ZONGE, K.L., 1997, Case histories of electrical and electromagnetic geophyisics for environmental applications at active mines, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Reno, NV, pp.73-79.

CHOUTEAU, M., 2001, Géophysique appliquée II - GLQ 3202, Méthodes électriques - Notes de cours, École Polytechnique de Montréal [en ligne], http://www.cours.polymtl.ca/glq3202/Electrique/Electrique.html (page consultée le 15 mai 2004).

CUSTIS, K, 1994a, Application of geophysics to acid mine drainage investigations; Volume 1, California State Department of Conservation, 144p.

CUSTIS, K, 1994b, Application of geophysics to acid mine drainage investigations; Volume 2, California State Department of Conservation, 100p.

DUBÉ, B. ET MOORHEAD J. 2002. Synthèse du camp minier de Doyon-Bousquet-LaRonde : problématique et objectifs. Séminaire d'information sur la recherche géologique 2002 – Conférences [en ligne], http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/seminaire/programmation/session4-13h30.asp (page consultée le 1 avril 2003).

FALA, O, 2002, Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques, Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, 296p.

GAMACHE-ROCHETTE, A., 2004, Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles. Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, 140p.

GEOTOMO SOFTWARE, 2002a, RES2DINV Ver.3.4, 2D resistivity and IP inversion software, Malaisie (www.geoelectrical.com).

GEOTOMO SOFTWARE, 2002b, RES3DINV Ver.2.1, 3D resistivity and IP inversion software, Malaisie (www.geoelectrical.com).

GEOTOMO SOFTWARE, 2001, RES3DMOD Ver.2.0, 3D resistivity and IP forward modelling software, Malaisie (www.geoelectrical.com).

GLOAGUEN, E., 2000, Détermination des paramètres physiques d'un aquifère à nappe libre par des méthodes géophysiques de surface; Application sur le site test de Lachenaie, Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, 114p.

HERASYMUIK, G.M., 1996, Hydrogeology of a sulfide waste rock dump. Mémoire de maîtrise en génie civil, University of Saskatchewan, Canada.

KELLER, G.V. ET FRISCHKNECHT, F.C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting* , Pergamon Press, New York , New York, 527p.

LAFRANCE, B., MOORHEAD, J., PILOTE, P., DUBÉ, B., MERCIER-LANGEVIN, P., HANNINGTON, M. D., GALLEY, A. G., DAVIS, D. W. ET MUELLER, W. U. 2002. Synthèse métallogénique du camp minier Doyon-Bousquet-LaRonde - Levé géologique de la portion est de la formation de Bousquet. Séminaire d'information sur la recherche géologique 2002 – Conférences [en ligne], http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/seminaire/programmation/photo13.asp (page consultée le 1 avril 2003).

LANE, J.W., Joesten, P.K., Haeni, F.P., Vendl, M. et Yeskis, D., 1998, Use of borehole-radar methods to monitor the movement of a saline tracer in carbonate rock at Belvedere, Illinois. *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Chicago, IL, pp. 323-332.

LEFEBVRE, R., 1994, Caractérisation et modélisation numérique du drainage minier acide dans les haldes à stériles. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.

LOCKE, M. H. 2002. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys [en ligne]. http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip (page consultée le 1 mai 2003).

MARTIN, V., 2003, Étude des méthodes d'entreposage des roches stériles pour prévenir la génération d'eaux de drainage minier acides. Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

McNEILL, J.D., 1980, Electrical conductivity of soils and rocks, Technical note TN-5: Geonics Limited, Ontario, Canada, 22p.

MINES AGNICO-EAGLE LTÉE. Document interne 1.

MINES AGNICO-EAGLE LTÉE. Document interne 2.

MORIN, K.A., GERENCHER, E., JONES, C.E. ET KONASEWICH, D.E., 1991, Critical literature review of acid drainage from waste rock, *MEND report 1.11.1,* Ottawa Ont.

MOYLE, P.B, FAY, J.M. ET FRIEDEL, M.J., 1994, Integrated geophysical characterization of mine-waste sites in the Cœur d'Alene mining district, Idaho, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Boston, MA, pp.857-868.

PAINTER, M.A., LAVERTY, B., STOERTZ, M.W. ET GREEN, D.H., 2000, Resistivity imaging of a partially reclaimed coal tailings pile, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Washington D.C., pp. 679-687.

PATERSON, N., ROBERTSON, D., HEARST, R., STANTON-GRAY, R., MILLER E. et SILVERTHORN, S., 1994, Application of remote sensing and geophysics to the detection and monitoring of Acid Mine Drainage, *Projet MEND #4.6.3*, CANMET Library, 562 Booth St. Ottawa Ont.

POISSON, J., 2004, Caractérisation géophysique d'une halde a stériles (halde n° 1, mine Laronde, Québec). Rapport de stage, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

REYNOLDS, J. M. 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons Ltd. 796p.

SANDMEIER SOFTWARE, 2003, ReflexW Ver. 3.0, Processing and interpretation of reflection and transmission data software, Karlsruhe, Allemagne (http://www.sandmeier-geo.de).

SCHIMA, S., LABRECQUE, D.J. ET MILETTO, M., 1993, Tracking fluid flow in the unsaturated zone using cross-borehole resistivity and IP, Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP - San Diego, CA, pp.527-543.

SMITH, B.D., CAMPBELL, D.L. ET WRIGHT, W.G., 2001, Using resistivity to map acidic waters at the may day mine dump, Silverton, Colorado, *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Denver, CO, 12 pages.

WRIGHT, D.L. et LANE, J.W., 1998, Mapping hydraulically permeable fractures using directional borehole radar and hole-to-hole tomography with a saline tracer. E*nvironmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Chicago, IL, pp. 379-388.

WRIGHT, D.L., Grover, T.P., Ellefsen, K.J., Lane, J.W. et Kase, P.G., 1996, Radar tomography at Mirror Lake, New Hampshire: 3D visualization and a brine tracer experiment. *Environmental and Engineering Geophysical Society annual meeting: Proceedings SAGEEP* - Keystone, CO, pp. 565-575.

ANNEXES


ANNEXES
Données brutes et résultats détaillés
© Daniel Campos, 2004.

Un cédérom accompagne ce mémoire de maîtrise

Toute personne intéressée à se le procurer doit contacter :

École Polytechnique de Montréal

Service de fourniture de documents

B.P. 6079, Succursale Centre-Ville

Montréal, Québec H3C 3A7

Canada

Tél. : (514) 340-4846
Télécopieur : (514) 340-4026