

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE DE LA STRUCTURE INTERNE D'UNE
HALDE À STÉRILES

OLIVIER ANTERRIEU
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)
DÉCEMBRE 2006

© Olivier Anterrieu, 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-25526-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-25526-1

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 protègent 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.

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

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

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 intitulé :

CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE DE LA STRUCTURE INTERNE D'UNE
HALDE À STÉRILES

Présenté par : ANTERRIEU Olivier

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph.D., président

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

M. AUBERTIN Michel, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GIROUX Bernard, Ph.D., membre

DÉDICACE

Que des paysages ruiniiformes, naissent les plus belles contrées
Et que des tableaux les plus mornes, jaillissent des terres constellées.

À mon grand frère

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent dans un premier temps à mon directeur de recherche, Michel Chouteau, pour avoir cru en moi depuis le début de notre collaboration voilà bientôt trois ans. Je le remercie de m'avoir fait confiance dans les différents travaux qu'il m'a confiés. Je le remercie également pour ses conseils avisés, ses idées prolifiques, son écoute, son attention, sa bonne humeur communicative et sa présence tant au niveau professionnel que relationnel. Je le remercie aussi de m'avoir emmené dans ses valises lors du SAGEEP 2006 à Seattle.

Je voudrais au même titre remercier mon co-directeur, Michel Aubertin, sans qui l'environnement minier et la géophysique ne coexisteraient probablement pas à l'École Polytechnique. Je le remercie pour son ouverture au domaine nébuleux car trop souvent méconnu que représente la géophysique. Je le remercie pour son dynamisme, son investissement, ses conseils et son appui inébranlable. Je le remercie pour la force tranquille qu'il véhicule.

Je voudrais remercier Bruno Bussière et Bernard Giroux pour avoir accepté de faire partie de mon jury, pour les corrections et les suggestions qu'ils m'ont apportées.

Je souhaite aussi remercier les partenaires industriels de la chaire industrielle CRSNG Polytechnique UQAT en environnement et gestion des rejets miniers pour leur soutien financier, sans lequel ce projet de maîtrise n'aurait pas vu le jour.

Je voudrais par la suite remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce projet. Je pense notamment au personnel de la mine Laronde, au soutien technique indispensable apporté sur le terrain en Abitibi, aux membres de l'École polytechnique, de l'UQAT et de l'URSTM.

Je remercie aussi tous les étudiants, ex-étudiants et membres, permanents ou de passage, du laboratoire de Géophysique appliquée et de la chaire en environnement et gestion des rejets miniers. Des mentions spéciales à Bernard Giroux, Erwan Gloaguen, Sébastien Vallières, Edward Cifuentes, Omar Fala et Camille Dubreuil-Boisclair.

Enfin, un immense merci à ma sœur Marie et à mes parents, pour leur amour, leur confiance, leur soutien de tous les instants malgré le décalage horaire, pour avoir partagé avec moi, les joies, les doutes et les traversées du désert qui ont jalonné ce temps de maîtrise.

RÉSUMÉ

Les haldes à stériles sont des amoncellements de roches concassées sans valeur économique, entreposées en tas lors de l'activité d'une mine. En fonction de la composition minéralogique des stériles, du mode de construction de la halde et des conditions climatiques régionales, des réactions chimiques peuvent se produire. L'interaction entre des minéraux sulfureux (principalement la pyrite, FeS_2) en présence d'eau et d'oxygène peut entraîner la formation de drainage minier acide (DMA). Les exfiltrations de DMA ont des conséquences dommageables sur l'environnement.

Cette étude vise à proposer une méthode afin de déterminer les principales caractéristiques de la structure interne d'une halde à stériles par différentes techniques d'imagerie géophysique de surface et en forage, couplées avec des données hydrogéologiques, géotechniques et géochimiques. Différentes études géophysiques et hydrogéologiques ont été menées sur la halde à la mine Laronde (Agnico-Eagle Ltd) située en Abitibi, afin de déterminer les caractéristiques contrôlant la distribution et le transport des fluides à l'intérieur de la halde. Pour ce faire, les méthodes électriques électromagnétiques et le radar géologique ont été utilisés sur trois principales zones d'investigation.

La première zone correspond au sommet du banc supérieur de la halde et a permis de mettre en évidence plusieurs anomalies de conductivité électrique avec un fort contraste de résistivité entre la portion ouest et la portion est de la halde. Différents échantillons de stériles ont été prélevés dans trois tranchées sur le sommet de la halde afin de déterminer les principales caractéristiques hydrogéochimiques à l'origine des anomalies de résistivité électrique mises en évidence. Ces analyses ont permis de déterminer un lien étroit entre la conductivité électrique, la teneur en eau, la granulométrie et la minéralogie.

La seconde zone d'investigation correspond aux pentes de la halde. Les méthodes électriques et électromagnétiques ont montré des anomalies interprétées comme une forte ségrégation granulométrique et des stratifications obliques associées au mode de

construction de la halde. Un test d'infiltration a aussi été réalisé afin d'étudier l'influence des pentes sur l'infiltration d'eau.

La troisième zone d'investigation correspond à la portion ouest du banc supérieur de la halde où des mesures de radar en forage ont été réalisées. Ces mesures ont permis de mettre en évidence des stratifications sub-horizontales dans le cœur de la halde et des stratifications obliques aux abords des pentes. Des analyses sur les carottes de forage ont aussi été réalisées afin d'étudier la corrélation entre la réponse géophysique et les caractéristiques hydrogéochimiques des stériles.

En couplant les différents résultats issus des trois zones d'investigation, un modèle préliminaire de la structure interne de la halde a pu être proposé. Ce modèle structural tient compte des propriétés géophysiques et hydrogéochimiques des stériles. Par ailleurs, les différents résultats ont permis de montrer les principaux avantages et inconvénients des méthodes de caractérisation utilisées en milieu hétérogène non saturé et de proposer un guide de caractérisation systématique pour l'étude d'autres haldes.

ABSTRACT

Waste rock piles are built during mining operations and are made of materials with no economic value. Depending on the composition of the waste rock, on the construction mode, and on the local climatic conditions, some geochemical reactions can be produced within the pile.

When sulfides minerals (mostly pyrites, FeS_2) react with oxygen and water, they can produce acid mine drainage (AMD) which may induce damages to the environment.

Starting in the summer of 2002, geophysical and hydrogeological studies have been conducted on an AMD generating pile at the Laronde mine (Agnico-Eagle Ltd, QC). The aim was to determine the characteristics that control water distribution and water flow in the waste rocks. The present study investigates the internal structure of this pile using different geophysical sub-surface and borehole imaging methods and results obtained from hydrogeological, geotechnical and geochemical tests. Electrical tomography, electromagnetic and radar methods have been used on the three main investigation areas of the pile.

The first investigation area is located on the top of the pile. Several features have been identified, including a strong lateral resistivity variation between the western and eastern parts of the pile. Waste rock sampling was also made in three trenches dug on the top of the pile, to evaluate the link between hydrogeochemical properties of the waste rock and their electrical signature. This analysis has shown a strong link between electrical conductivity and water content and also with other factors such as grain size distribution, oxidation state and pyrite content.

The second investigation area is located on a slope of the pile. Electrical and electromagnetic techniques were used to image the grain size segregation and some dipping stratifications. These can be related to the construction mode of the pile. An infiltration test was also conducted on the slope to study water distribution.

The third area was investigated with boreholes radar measurements, in the western part of the pile. These measurements indicate an apparent stratification in the middle of the

pile, with dipping stratifications near the outer edge. Geochemical analyses on diamond drilling samples have also been conducted to evaluate a possible correlation between the geophysical response and hydrogeochemical characteristics of the waste rocks.

Using the different results, an internal structure model of the pile has been proposed. This model is based on the geophysical and hydrogeochemical data obtained. The different results have also been used to discuss the advantages and limitations of the geophysical methods applied to characterize heterogeneous media in the vadose zone. A systematic characterization guide for studying other waste rock pile is finally proposed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxii
LISTE DES ANNEXES.....	xxv
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Le drainage minier acide (DMA).....	1
1.2.1 Formation.....	1
1.2.2 Méthodes de prédiction du DMA	4
1.3 Les haldes à stériles	6
1.3.1 Généralités	6
1.3.2 Modes d'empilement des stériles.....	7
1.4 Problématique	8

1.5 Contenu du mémoire.....	9
CHAPITRE 2. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE	11
2.1 Méthode électrique.....	11
2.1.1 Rappel des notions fondamentales.....	11
2.1.1.1 Loi d'Ohm.....	11
2.1.1.2 Résistivité.....	12
2.1.1.3 Résistivité apparente	14
2.1.1.4 Équipotentiels et lignes de courant.	15
2.1.1.5 Loi d'Archie.....	16
2.1.2 Principe de l'imagerie électrique	17
2.1.2.1 Configurations d'électrodes	17
2.1.2.2 Construction d'une pseudo-section.....	19
2.1.3 Traitements généraux.....	22
2.1.3.1 Inversion des données avec le logiciel RES2DINV	22
2.1.3.2 Modélisation avec le logiciel RES2DMOD.....	24
2.2 Méthodes électromagnétiques.....	25
2.2.1 Le radar géologique	25
2.2.1.1 Notions et principes de fonctionnement	25
2.2.1.2 Acquisition des mesures de surface	29
2.2.1.3 Traitement des mesures de surface	32
2.2.1.4 Acquisition des mesures en forage	34
2.2.1.5 Traitement des données en forage.....	38
2.2.2 Systèmes dipolaires fréquentiels.....	40
2.2.2.1 Principe de fonctionnement	40
2.2.2.2 Modes d'acquisition.....	42
2.2.2.3 Traitement des données.....	43
2.3 Performances théoriques des différentes méthodes utilisées	43

CHAPITRE 3. PRÉSENTATION DU SITE ET ÉTUDES ANTÉRIEURES.....	45
3.1 Mise en contexte	45
3.2 Etudes antérieures et axes d'études associés	47
3.2.1 Généralités	47
3.2.2 Principaux résultats des études antérieures.....	50
3.2.2.1 Propriétés hydrogéologiques des stériles (tirés de Gamache-Rochette, 2004)	50
3.2.2.2 Mesures géophysiques (tiré de Campos, 2004 et Poisson, 2004).	55
3.2.3 Axes d'étude	60
CHAPITRE 4. MESURES GÉOPHYSIQUE DE TERRAIN	62
4.1 Introduction.....	62
4.2 Dispositifs d'acquisition utilisés.....	62
4.2.1 Méthode électrique.....	62
4.2.2 Méthodes électromagnétiques.....	64
4.2.2.1 Radar géologique	64
4.2.2.2 Systèmes dipolaires fréquentiels.....	65
4.3 Implantation des profils géophysiques et paramètres d'acquisition associés	66
CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	74
5.1 Surface du banc supérieur de la halde.....	74
5.1.1 Description des résultats géophysiques pour le banc supérieur.....	74
5.1.2 Résultats complémentaires et analyses croisées	80
5.1.2.1 Inspection visuelle dans des tranchées.....	80
5.1.2.2 Analyses d'échantillons prélevés dans les tranchées	83
5.1.2.3 Informations structurales	92

5.1.2.4 Synthèse des résultats pour le banc supérieur.....	96
5.1.3 Description des résultats géophysiques pour le banc inférieur.....	98
5.1.4 Résultats complémentaires et analyses croisées	99
5.2 Pente.....	102
5.2.1 Mesures géophysiques avant infiltration d'eau.....	102
5.2.2 Essai d'infiltration.....	105
5.2.3 Synthèse des résultats pour les pentes	108
5.3 Levés en forages	110
5.3.1 Description des résultats géophysiques	110
5.3.1.1 Système dipolaire fréquentiel	110
5.3.1.2 Radar.....	112
5.3.2 Résultats complémentaires.....	114
5.3.2.1 Obstruction des trous de forages.....	114
5.3.2.2 Analyses géochimiques.....	115
CHAPITRE 6. ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	118
6.1 Analyse et modèle structural proposé.....	118
6.2 Discussion.....	121
6.2.1 À propos des méthodes géophysiques	121
6.2.2 Quelques lignes directrices pour la caractérisation des haldes à stériles	123
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	127
BIBLIOGRAPHIE.....	129
ANNEXES.....	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Principaux avantages et limitations des méthodes utilisées (adapté de Reynolds (1997) et du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)	44
Tableau 3.1 : Potentiel de neutralisation net (PNN) pour la fraction fine (<5 mm) et grossière (5-20 mm) des cinq échantillons étudiés. Les échantillons oxydés (O3 et T2) sont présentés en orange. (Tiré de Poisson (2004), adapté de Gamache-Rochette (2004)).....	52
Tableau 3.2 : Conductivité hydraulique saturée des divers échantillons déterminé par essais de perméabilité en cellule triaxiale. (Tiré de Poisson, 2004; adapté de Gamache-Rochette, 2004). Les échantillons oxydés (O3 et T2) sont présentés en orange.	53
Tableau 4.1 : Spécifications techniques du EM39 de Geonics Ltd. (Tiré du manuel d'instructions de l'appareil).....	66
Tableau 4.2 : Longueur des différents profils électriques déployés sur le sommet du banc supérieur de la halde.	68
Tableau 4.3 : Mesures réalisées à la surface du banc supérieur et paramètres d'acquisition associés.	70
Tableau 4.4 : Mesures réalisées sur le versant sud du banc supérieur de la halde et paramètres d'acquisition associés.	72
Tableau 4.5 : Mesures réalisées dans les forages et paramètres d'acquisition associés.....	73
Tableau 5.1 : Hypothèses émises à partir des mesures géophysiques en surface du banc supérieur.	79
Tableau 5.2 : Valeurs de C_u , C_c et D_{10} obtenues pour les échantillons de la tranchée Ouest et Est.....	86
Tableau 5.3 : Mesures de densité dans la tranchée Ouest et dans la tranchée Est (Données fournies par Nil Gaudet, UQAT).	88

Tableau 5.4 : Principaux minéraux acidogènes et acidivores détectés par DRX sur les échantillons de la mine Laronde (Données fournies par Villeneuve, M., URSTM).....	89
Tableau 5.5 : Résultats des essais statiques réalisés dans chaque tranchée (adapté du bilan des essais statiques fournis par Mélanie Bélanger, UQAT).....	91
Tableau 5.6 : Synthèse des principaux résultats mis en évidence dans le banc supérieur.	97
Tableau 5.7 : Principaux résultats des analyses géochimiques réalisées sur les six échantillons prélevés dans les forages (adapté des données fournies par Villeneuve, M.,URSTM).	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Conséquence du DMA sur le site Aldermac en Abitibi (QC, Canada).	3
Figure 1.2 : Le site abandonné de Manitou dévasté par le DMA (Abitibi, QC, Canada)	4
Figure 1.3 : Premier critère ABA (essai statique). (Tiré du cours GML 6112 : Environnement minier et restauration de sites).....	5
Figure 1.4 : Second critère ABA (essai statique). (Tiré du cours GML 6112 : Environnement minier et restauration de sites,).....	6
Figure 1.5 : Modèle conceptuel de construction des haldes à stériles (tiré de Aubertin et al., 2002a, 2005).....	8
Figure 2.1 : Milieu cylindrique de résistance R, traversé par un courant d'intensité I (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).....	12
Figure 2.2 : Milieu cylindrique de longueur L, de section A et de résistance R (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)	13
Figure 2.3 : Lignes de courant et équipotentiellles. Le tableau présente une estimation de la densité de courant avec la profondeur (adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).....	15
Figure 2.4 : Configurations d'électrodes couramment utilisées (tiré du cours GML 6201a, École Polytechnique de Montréal)	18
Figure 2.5 : Mode de déplacement des électrodes selon le dispositif utilisé (tiré du cours GML 6201a, École Polytechnique de Montréal).....	18
Figure 2.6 : Mesures de résistivité d'un sol par sondage (gauche) et par traînée (droite).....	19
Figure 2.7 : Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner (tiré du manuel d'utilisation de RES2DINV)	20
Figure 2.8 : Principales étapes de l'inversion avec le logiciel RES2DINV (adapté de Loke et al., 1996).....	23

Figure 2.9 : Acquisition en mode réflexion (Adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)	29
Figure 2.10 : Représentation des résultats sous forme de radargramme (Adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).....	30
Figure 2.11 : Mode d'acquisition en mode CMP	30
Figure 2.12 : Exemple de résultats en mode CMP (Adapté de Annan, 2001)	31
Figure 2.13 : Acquisition en configuration « entre trous ». Pour chaque position de Tx dans un forage, Rx est déplacé d'un pas constant le long d'un second forage (tiré de Giroux et al., 2003).....	35
Figure 2.14 : Acquisition en configuration VRP. Une antenne est située en surface, l'autre est située dans un trou. Cette configuration permet de densifier la couverture superficielle (Tiré de Giroux et al., 2003)	36
Figure 2.15 : Acquisition en configuration « simple trou ». Les deux antennes sont solidaires et sont déplacées le long d'un forage. Cette configuration permet de déterminer le champ de vitesse le long d'un forage (Tiré de Giroux et al., 2003)	37
Figure 2.16 : Pointé du temps de première arrivée et mesure de l'amplitude pic à pic d'une onde radar (Tiré de Gloaguen, 2004)	38
Figure 2.17 : Trajet d'un rai entre Tx (source) et Rx (récepteur) (Tiré de Gloaguen, 2004).....	39
Figure 2.18 : Illustration du principe de fonctionnement du système dipolaire fréquentiel (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).....	41
Figure 2.19 : Contribution des lignes de courant pour chaque mode d'acquisition (Adapté du cours GML6201a, Ecole Polytechnique de Montréal).....	42
Figure 3.1 : Localisation de la mine Laronde en Abitibi Témiscamingue (Québec)	45
Figure 3.2 : Photographie de la halde N°1 (Mine Laronde, QC, Canada)	46

Figure 3.3 : Représentation numérique de la morphologie de la halde (données fournies par Agnico-Eagle Ltd). Une ligne de niveau représente une élévation de 1 m.	47
Figure 3.4 : Localisation de l'aire géophysique sur la halde de la mine Laronde.....	48
Figure 3.5 : Schéma de la zone d'essais sur le sommet de la halde de la mine Laronde (Tiré de Gamache-Rochette, 2004).....	49
Figure 3.6 : Courbe granulométrique des échantillons O1, O2 (non oxydés) et O3 (oxydé) (Tiré de Poisson (2004), adapté de Gamache-Rochette (2004)); seule la fraction inférieure ≤ 10 cm a été analysée.	51
Figure 3.7 : Représentation du potentiel de neutralisation net (PNN) de la fraction fine (Fin) et de la fraction grossière (Gros) des cinq échantillons (adapté de Gamache-Rochette (2004)). NG=Non Générateur, I=zone d'incertitude, G= Générateur	52
Figure 3.8 : Distribution 3D de la résistivité électrique dans l'aire géophysique mettant en évidence une couche superficielle résistive (0-2 m) ainsi que des variations latérales de résistivité (tiré de Campos, 2004).	55
Figure 3.9 : Corrélation des méthodes géophysiques mettant en évidence des variations latérales dans la couche superficielle ; a) résistivité électrique ; b) radar ; c) E.M (profil X20, Tiré de Poisson, 2004).....	56
Figure 3.10 : Iso-contours des rapports des résistivités ($\rho_{\text{avant}} / \rho_{\text{après}}$) en fonction de la profondeur ; a) surface, b) 1 m, c) 2 m, d) 3 m. (Tiré de Campos, 2004)	57
Figure 3.11 : Distribution de la résistivité dans la pente du banc supérieur de la halde (configuration d'électrode en mode Wenner, cf. § 2.1.3. ; tiré de Poisson, 2004).	58
Figure 3.12 : Section radar réalisée dans la pente du banc supérieur de la halde avec une antenne de 200 MHz. Des stratifications obliques (rouge) et des réflecteurs en discordances (pointillés) sont mis en évidence (Tiré de Poisson, 2004).	59

Figure 4.1 : Dispositif électrique utilisé lors des mesures de terrain.	63
Figure 4.2 : Principales composantes du système radar utilisé - (1) Unité de contrôle RAMAC/CU II - (2) Antennes adaptées aux mesures de surface - (3) Antennes adaptées aux mesures en forage (longueur : 1.35 m, diamètre : 45 mm).	64
Figure 4.3 : Dispositif EM31 en cours d'utilisation en mode vertical sur la halde.....	65
Figure 4.4 : Localisation des mesures géophysiques de terrain sur la halde N°1 de la mine Laronde.....	67
Figure 4.5: (1) - Acquisition classique et (2) - acquisition en roll-along.	69
Figure 4.6 : Implantation des profils de mesure sur le versant sud du banc supérieur.	71
Figure 5.1 : Profils électriques longitudinaux (L1 à L4).....	75
Figure 5.2 : Profils électriques transverses (T1 à T8). La localisation des profils longitudinaux L1 à L4 est schématisée en pointillés.	76
Figure 5.3 : Corrélation entre les signatures - a) électromagnétique (EM31) et - b) électrique le long du profil L2.	77
Figure 5.4 : Distribution spatiale de la résistivité électrique obtenue avec le EM31. Chaque rond noir représente un point de mesure.....	78
Figure 5.5 : Implantation des trois tranchées réalisées le long du profil L2.	80
Figure 5.6 : Photographies de la tranchée Ouest a) et b), de la tranchée centrale c) et d) et de la tranchée Est e) et f).....	82
Figure 5.7 : Lentille de stériles ocres mis en évidence dans la tranchée Est. Les pointillés rouges indiquent l'interface entre les stériles oxydés (ocre) et les stériles non oxydés (gris). Une électrode de 60 cm a été placée dans la lentille pour donner l'échelle.	83
Figure 5.8 : Courbes granulométriques correspondantes aux stériles prélevés dans la tranchée Ouest (en bleu) et dans la tranchée Est (en rose) (Adapté des résultats fournis par Mélanie Bélanger, UQAT).....	85
Figure 5.9 : Teneur en eau massique moyenne (%) dans chaque tranchée. Les	

échantillons ont été prélevés en Septembre 2005).	87
Figure 5.10 : Pourcentages des principaux minéraux acidogènes présents dans chaque tranchée (déterminés par DRX).	90
Figure 5.11 : Pourcentages des principaux minéraux acidivores présents dans chaque tranchée (déterminés par DRX).	90
Figure 5.12 : Acquisition d'un profil électrique dans le mur Nord de la tranchée centrale. Les pointillés rouges indiquent la présence de stratifications obliques.	92
Figure 5.13 : Comparaison entre le profil de teneur en eau (a), la nature géotechnique des matériaux (b) et la réponse électrique (c) pour les strates mises en évidence dans la tranchée centrale.	93
Figure 5.14 : Mise en évidence d'un plan de fissuration (pointillés rouges) à l'extrémité Est de la tranchée central : a) Vue générale, b) Cavités le long du plan (cercles en pointillés rouges), c) Présence de cristaux dans les cavités témoignant de l'oxydation des stériles.	95
Figure 5.15 : Teneur en pyrite et en sulfate hydrosoluble pour les différents échantillons prélevés dans la tranchée centrale.....	95
Figure 5.16 : Section électrique réalisée le long du profil L2 obtenue pour un espacement inter-électrodes de 4 m (les pointillés représentent la limite approximative entre le banc supérieur et le banc inférieur).....	98
Figure 5.17 : Zone excavée dans le banc inférieur de la halde.	99
Figure 5.18 : Mise en évidence de zone humide (zoom 1) et de stratifications dans le bac inférieur de la halde (zoom 2).....	100
Figure 5.19 : Profils électrique réalisées sur le versant Sud du banc supérieur de la halde. Les profils sont espacés d'environ 2 m.	103
Figure 5.20 : Mesures géophysiques réalisées dans la pente le long du profil P3. a) Profil de résistivité obtenu avec le EM31 (mode horizontal). b) Section radar (100 MHz). c) Section électrique.	104
Figure 5.21 : Arrosage uniforme des pentes à l'aide d'un tuyau perforé.....	105

Figure 5.22 : Section électrique réalisée avant (a)) et après (b)) l'essai d'infiltration	106
Figure 5.23 : Les zones en vert correspondent à une augmentation du degré de saturation en eau (a)), de plus de 20 % (b)), de plus de 40 % (c)) et de plus de 55 % (d))	107
Figure 5.24 : Conductivités électriques krigées entre les huit forages (Tiré de Dubreuil-Boisclair, 2006). Les pointillés noirs correspondent aux limites approximatives des couches mises en évidence.....	111
Figure 5.25 : Réponse radar obtenu à partir des mesures entre forages (Adapté de Gloaguen et al., 2006). Les pointillés correspondent aux limites approximatives des couches mises en évidence.....	112
Figure 5.26 : Schématisation de l'influence de l'orientation des profils sur la réponse obtenue. Les structures inclinées dans un plan W-E apparaissent sub-horizontales dans un plan N-S.....	114
Figure 5.27 : Représentation des analyses géochimiques réalisées dans les forages a) Teneur en pyrite, b) Teneur en gypse, c) 1 ^{ier} critère ABA, d) 2 ^{ième} critère ABA.	116
Figure 6.1 : Modèle électrique de la structure interne de la halde. L'aire géophysique (cf. Figure 3.4) est représentée en jaune, et les couches résistives déterminées par les mesures en forages sont présentées en rouge.....	119
Figure 6.2 : a) Données synthétiques inversées (issues du modèle structural présenté sur la figure 6.1) et b) Données réelles inversées (profil L2, cf. Figure 5.1).....	120
Figure 6.3 : Principales étapes suggérées pour caractériser une halde à stériles.	126

LISTE DES SYMBOLES

V = Différence de potentiel aux bornes d'un dipôle quelconque (en Volt, V)

R = Résistance électrique (en Ohm, Ω)

I = Intensité du courant électrique traversant le dipôle (en Ampère, A)

ρ = Résistivité électrique ($\Omega.m$)

$\sigma = 1/\rho$ = Conductivité électrique ($S.m^{-1}$)

A = Section du matériau traversé (m^2)

L = Longueur du matériau traversé (m)

J = Densité de courant (A/m^2)

ρ_a = Résistivité apparente ($\Omega.m$)

k = Facteur géométrique (m)

V_{MN} = Différence de potentiel mesurée entre les électrodes M et N (V)

σ_a = Conductivité électrique apparente ($Ohm.m$)

f = Fréquence (Hz)

$\omega = 2\pi.f$ = Fréquence angulaire (rad/s)

e = Espacement entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (m)

$(H_s/H_p)_Q$ = Rapport du champ magnétique secondaire par le champ magnétique primaire

ρ_w = Résistivité électrique de l'eau ($\Omega.m$)

ρ_c = Résistivité électrique de la fraction argileuse ($\Omega.m$)

ϕ = Porosité (%)

S = Degré de saturation (%)

m = Facteur empirique déterminé par Archie ($1,3 \leq m \leq 2,5$)

a = Facteur empirique déterminé par Archie ($0,5 \leq a \leq 2,5$)

n = Facteur empirique déterminé par Archie (≈ 2)

θ_w = Teneur en eau volumique (%)

α = Constante d'atténuation (Np/m)

β = Constante de phase (rad/m)

μ_0 = Perméabilité magnétique du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

μ = Perméabilité magnétique (Henry/m)

ϵ_0 = Permittivité diélectrique du vide ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

ϵ_e = Permittivité diélectrique (F/m)

K = Constante diélectrique = $\epsilon_e/\epsilon_0 = \epsilon_r$ = permittivité relative (sans unité)

c = Vitesse de la lumière (0,3 m/ns)

L = Matrice contenant les segments de rais traversant chaque cellule

s = Matrice contenant les lenteurs inconnues associées à chaque cellule

t = Matrice contenant les temps d'arrivée mesurés

PA = Potentiel d'acidification (kg de $CaCO_3/t$)

PN = Potentiel de neutralisation (kg de $CaCO_3/t$)

PNN = Potentiel de neutralisation net = $PN-PA$ (kg de $CaCO_3/t$)

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Valeurs de permittivité relative (ϵ_r) et vitesses des ondes radar associées pour différents matériaux fréquemment rencontrés dans la nature (Reynolds, 1997).....	135
Annexe 2 : CD ROM joint (contient les analyses géochimiques réalisées dans les tranchées et dans les forages, les logs de conductivité EM39 en forage, les analyses mégascopiques des carottes de forage (tiré de Dubreuil-Boisclair, 2006) et une étude préliminaire visant à montrer le lien possible entre les investigations géophysiques et la modélisation hydrogéologique avec le logiciel HYDRUS2D	136

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'industrie minière est un secteur d'activité très développé au Canada. Il emploie plus de 1% de la population, génère environ 3,5% du produit intérieur brut et représente environ 15% des exportations du pays (Aubertin et al., 2002a).

Lors de l'exploitation d'une mine, de très importants volumes de rejets sont produits. Il existe principalement trois grandes catégories de rejets (Aubertin et al., 2002a). La première correspond aux eaux de mines (qui peuvent être utilisées lors des étapes de traitement du minerai) et aux eaux d'infiltration. Ces eaux sont généralement pompées, traitées et en partie réutilisées. La seconde catégorie comprend les rejets de concentrateur qui proviennent de l'étape de broyage servant à libérer les minéraux ayant une valeur commerciale. Ces rejets se présentent sous forme de pulpe et sont généralement entreposés dans des parcs à résidus ou utilisés pour le remblayage souterrain. La troisième catégorie de rejets correspond aux roches sans valeur commerciale, dites *stériles*, extraites pour accéder au gisement minier. Les stériles sont généralement entreposés sous forme d'amoncellement appelé *halde à stériles*.

La production et la gestion de ces différents types de rejets sont régies par des normes environnementales très strictes, mises en vigueur pour contrer divers problèmes environnementaux liés à l'industrie minière incluant le drainage minier acide (DMA).

1.2 Le drainage minier acide (DMA)

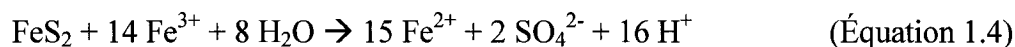
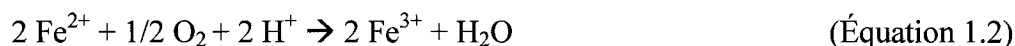
1.2.1 Formation

Le drainage minier acide résulte de l'oxydation naturelle des minéraux sulfureux contenus dans les rejets miniers au contact de l'eau et de l'air. Ces minéraux sont appelés minéraux *acidogènes* (sulfures, sulfates, hydroxydes). Le principal minéral

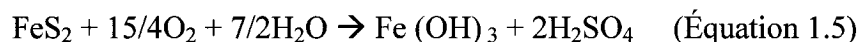
acidogène impliqué dans la formation du DMA est la pyrite (sulfure de fer, FeS_2). L'oxydation de la pyrite peut être directe et indirecte. L'oxydation directe est présentée à l'équation 1.1.



Cette réaction d'oxydation fait chuter le pH du milieu où sont déposés les rejets. Lorsque le pH est assez faible (inférieur à 3), la pyrite peut s'oxyder indirectement par le fer ferrique Fe^{3+} produit lors des réactions intermédiaires présentées aux équations 1.2, 1.3 et 1.4.



La réaction globale présentée dans l'équation 1.5 résulte de l'oxydation directe et de l'oxydation indirecte de la pyrite. Cette réaction globale engendre la production d'acide sulfurique (H_2SO_4). Elle décrit le processus de formation du DMA (Aubertin et al., 2002a).



La diminution du pH due à l'acide sulfurique entraîne aussi la solubilisation des métaux (cuivre, plomb, zinc etc.). La production de DMA peut être limitée par la quantité de minéraux sulfurés disponibles et par la présence de minéraux alcalins dans les rejets (carbonates, silicates, hydroxydes, phosphates), ayant un effet tampon sur la réaction d'oxydation. Ces minéraux sont dits *acidivores*. Au contact d'acide sulfurique, ces minéraux se dissolvent et réduisent l'acidité du lixiviat.

La production de DMA peut occasionner des conséquences dommageables sur l'environnement. Dans le pire des cas, la flore peut être dévastée, la faune aquatique détruite et les eaux de surface et souterraines polluées. La *figure 1.1* présente une photographie qui illustre les conséquences du DMA au site abandonné Aldermac, en Abitibi (QC, Canada).



Figure 1.1 : Conséquence du DMA sur le site Aldermac en Abitibi (QC, Canada).

La *figure 1.2* présente un autre exemple de site contaminé au DMA. Le site Manitou est également abandonné et à ce jour, aucune mesure n'a été appliquée pour procéder à sa restauration.



Figure 1.2 : Le site abandonné de Manitou dévasté par le DMA (Abitibi, QC, Canada)

Il existe une grande différence de coût pour restaurer un site minier selon qu'il génère du DMA ou non. Si le site est non générateur de DMA (ou alcalin), les coûts de restauration s'échelonnent typiquement entre 2 et 20 k\$/ha. Si le site est générateur de DMA, les coûts varient plutôt entre 100 et 250 k\$/ha. À l'échelle du Canada, les coûts associés à la restauration des sites miniers générateurs de DMA sont estimés à plus de 3 milliards de dollars dont 200 millions de dollars pour la province du Québec (Aubertin et al., 2002a).

Il est donc nécessaire de tenter de prédire si un site est générateur de DMA. Il existe pour cela plusieurs méthodes de prédiction du potentiel de génération d'acide. Certaines sont définies dans ce qui suit.

1.2.2 Méthodes de prédiction du DMA

Il existe différents tests de prédiction du potentiel de génération d'acide pour un échantillon de rejets. Parmi ces tests, les essais statiques permettent de renseigner de façon rapide, sommaire et relativement peu coûteuse sur le pouvoir alcalin ou acidifiant d'un échantillon. Pour chaque échantillon, le potentiel d'acidification (PA) et le

potentiel de neutralisation (PN) peuvent être déterminés. Le PA s'exprime en kg de CaCO_3/t et est fonction de la teneur en soufre sulfure de l'échantillon (% massique). Le PN s'exprime en kg de $\text{Ca CO}_3/\text{t}$. Les valeurs du PA et du PN d'un échantillon peuvent être déterminées en laboratoire. À partir des valeurs obtenues, des abaques permettent d'estimer le potentiel de génération d'acide selon deux critères, appelés les critères ABA (titration Acide Base). Le premier critère ABA (*Figure 1.3*) considère qu'un échantillon est potentiellement générateur d'acide quand le Potentiel de Neutralisation Net ($\text{PNN}=\text{PN}-\text{PA}$) est inférieure à $-20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$. Quand le PNN est supérieur à $20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$, l'échantillon est considéré non générateur. Si le PNN d'un échantillon est située entre ces deux valeurs, il n'est pas possible de statuer sur le pouvoir générateur de l'échantillon (zone d'incertitude).

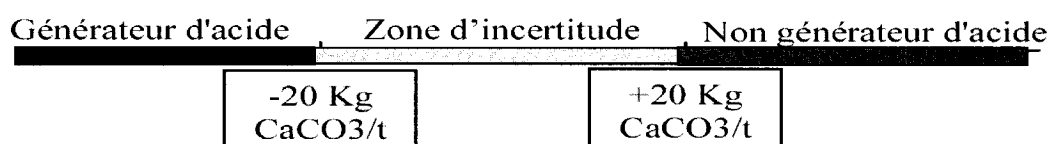


Figure 1.3 : Premier critère ABA (essai statique). (Tiré du cours GML 6112 : Environnement minier et restauration de sites)

Le second critère ABA (*Figure 1.4*) considère qu'un échantillon est potentiellement générateur d'acide quand le ratio PN/PA est inférieur à 1. Quand ce ratio est supérieur à 3, l'échantillon est considéré non générateur. Entre ces deux valeurs subsiste une zone d'incertitude empêchant de statuer sur le pouvoir générateur de l'échantillon.

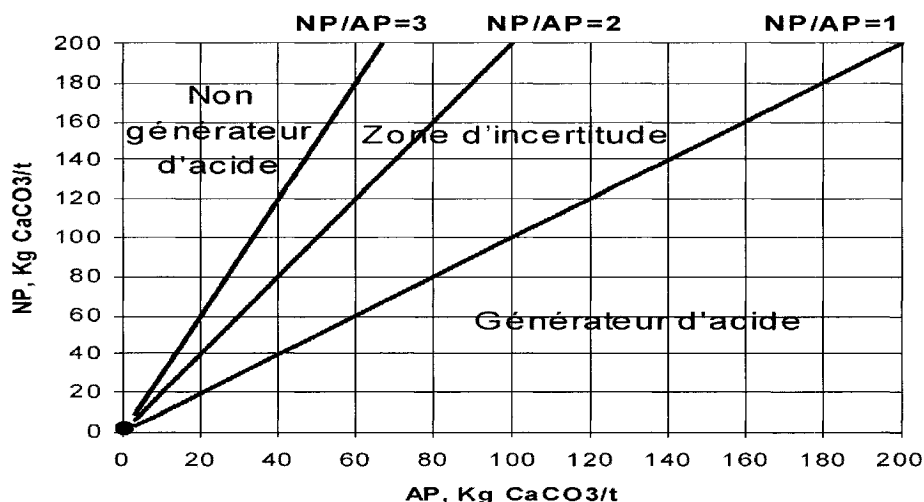


Figure 1.4 : Second critère ABA (essai statique). (Tiré du cours GML 6112 : Environnement minier et restauration de sites,)

Les autres méthodes de prédiction sont principalement basées sur des essais cinétiques qui incluent l'effet du temps et sur des modélisations numériques. Une revue des essais de prédiction du potentiel de génération d'acide est présentée dans Aubertin et al. (2002a) et dans les mémoires de Plante (2005) et de Villeneuve (2004).

1.3 Les haldes à stériles

1.3.1 Généralités

Le présent mémoire porte sur la caractérisation d'une halde à stériles miniers. Il est donc nécessaire de s'attarder sur quelques notions importantes relatives aux haldes.

Les haldes à stériles sont des amoncellements de roches concassées pouvant couvrir des superficies de plusieurs km^2 à la base et atteindre plusieurs centaines de mètres de haut comme c'est le cas de la halde de la mine Goldstrike (Nevada, USA) (Martin, 2003).

Des études ont montré que la granulométrie des stériles constituant les haldes est généralement très étalée allant de particules silteuses à des blocs métriques (Barbour et al., 2001; Nichol, 2002). A cette hétérogénéité granulométrique s'ajoute le mode

d'empilement des stériles qui induit des degrés de compactions et de ségrégation granulométrique différentiels au sein des haldes (Fala, 2002).

1.3.2 Modes d'empilement des stériles

Il existe principalement quatre types d'empilement des stériles (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a; Fala, 2002) :

Les modes de construction par déversement à la benne (*end-dumping*) et par épandage au butoir (*push-dumping*) consistent à déverser les stériles dans les pentes depuis la crête de la halde. Ces modes de construction produisent une ségrégation granulométrique importante et des compactions différentielles produisant des stratifications obliques. Les stériles les plus fins s'accumulent aux abords de la crête. Ils deviennent de plus en plus grossiers vers le bas des pentes. A long terme, des déversements successifs selon ces deux modes provoquent aussi une extension latérale de la halde et forment des stratifications obliques.

Les modes de construction par déversement à la benne avec régalage (*free-dumping*) et à la benne traînante (*drag-line*) consistent à déposer les stériles en tas sur la surface de la halde et à aplanir ces tas à l'aide de la machinerie lourde. Ces modes de construction produisent une faible ségrégation granulométrique mais la compaction des stériles est plus accentuée (surtout pour le *free-dumping*). A long terme, l'effet de subsidence et l'effet de la machinerie peuvent créer des stratifications sub-horizontales de matériaux fins, plus denses et plus compactés.

Ces différents modes d'empilement permettent de proposer un modèle conceptuel de construction des haldes (*Figure 1.5*) (Aubertin et al., 2002b). La structure interne des haldes peut théoriquement présenter une alternance sub-horizontale de matériaux fins et plus grossiers au cœur de la halde et des stratifications obliques et une ségrégation granulométrique dans les pentes.

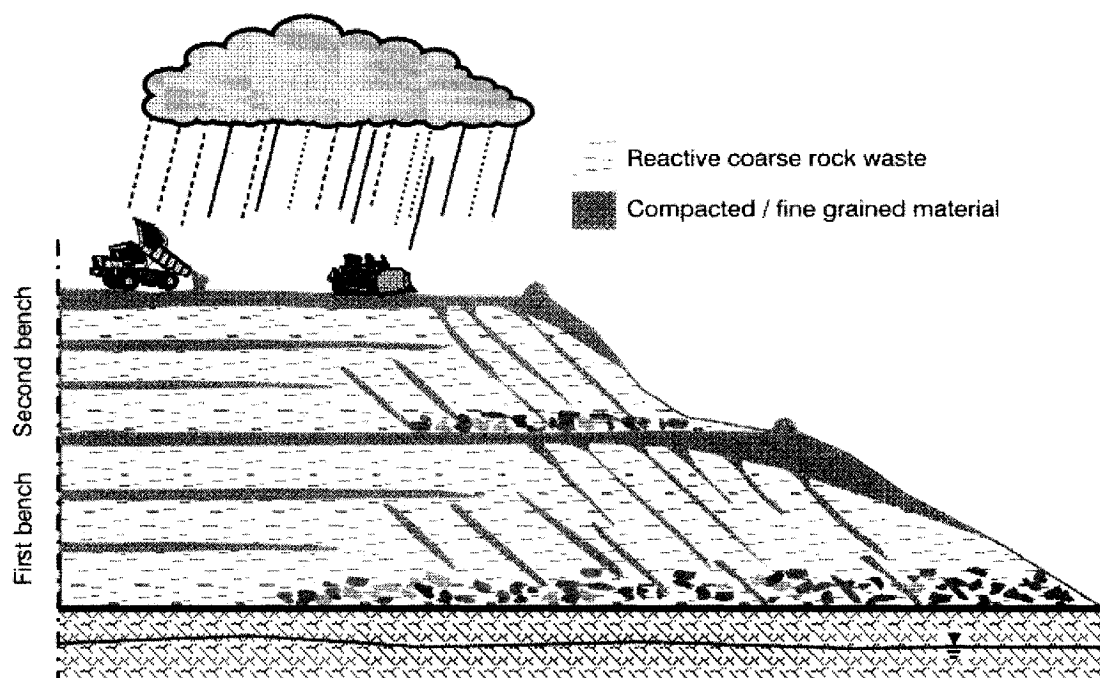


Figure 1.5: Modèle conceptuel de construction des haldes à stériles (tiré de Aubertin et al., 2002a, 2005)

Le mode de construction des haldes provoque des variations de granulométrie, de compaction et de densité qui influence donc les propriétés mécaniques et hydriques des stériles. Afin de bien caractériser les phénomènes à l'origine du DMA dans une halde, il est nécessaire d'étudier conjointement la nature physico-chimique des stériles et sa structure interne car elle conditionne le transport des fluides (eau, air).

1.4 Problématique

Caractériser les écoulements liés à la structure interne des haldes est un point déterminant qui pourrait aider à concevoir des haldes avec une structure interne prédéfinie limitant les infiltrations et conséquemment la production de DMA et les coûts de restauration associés.

Le couplage des différents phénomènes à l'origine de la production du DMA dans les haldes représente un problème complexe. D'une part, les propriétés hydriques et

physico-chimiques des stériles sont influencées par la structure interne des haldes. D'autre part, les haldes sont des milieux très hétérogènes généralement situés en zone vadose, ce qui complexifie l'étude des écoulements (milieu non saturé, régime transitoire). Finalement, peu d'études regroupant ses différents paramètres sont répertoriées dans la littérature. Il semble donc nécessaire d'utiliser plusieurs outils de caractérisation complémentaires pouvant renseigner sur les propriétés physico-chimiques, hydrogéologiques et structurales des haldes.

Certaines facettes du problème ont déjà été abordées ailleurs, notamment dans des études hydrogéologiques portant sur la caractérisation des propriétés hydriques in situ et en laboratoire des stériles miniers (Gamache-Rochette, 2004, Martin, 2003) et sur la modélisation des écoulements en milieu non saturé (Fala, 2002).

Les méthodes de caractérisation géophysique de sub-surface présentent aussi un attrait important car elles permettent de cartographier la distribution spatiale et temporelle de certaines propriétés physiques intrinsèques aux matériaux constituant un milieu. Quelques études s'apparentant à la problématique traitée ici peuvent être recensées, notamment l'utilisation des méthodes électromagnétiques (radar et EM) et électrique pour déterminer des frontières hydrogéologiques et cartographier l'évolution de la teneur en eau en zone vadose (Daniels et al., 2005). L'imagerie électrique a aussi été utilisée pour imager des panaches de lixiviats acides (Smith et al, 2001, Campbell et Fitterman, 2000; Campbell et al, 1999). Deux applications directes des techniques géophysiques au cas d'une halde à stériles peuvent être citées (Campos, 2004 ; Poisson 2004).

1.5 Contenu du mémoire

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans la continuité des travaux de géophysique (Campos, 2004 ; Poisson, 2004) et de caractérisation hydrogéologique (Gamache-Rochette, 2004) menées dans le cadre des travaux de la chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestion des rejets minier.

Cette étude vise à caractériser la structure interne d'une halde à stériles par l'utilisation de techniques géophysique de surface et en forage couplées avec des informations hydrogéologiques, géochimiques et géotechniques. Les techniques géophysiques utilisées sont la méthode électrique, les méthodes électromagnétiques et le radar. L'objectif principal du projet est de coupler les différentes informations obtenues afin de proposer un modèle cohérent de la structure interne des haldes.

Suite à cette partie d'introduction, le mémoire s'articulera de la façon suivante. Le chapitre 2 présentera la théorie relative aux différentes techniques géophysiques utilisées. Le chapitre 3 présentera le site d'étude et les travaux antérieurs réalisés sur ce site. Le chapitre 4 présentera ensuite la localisation, le déploiement stratégique et les paramètres d'acquisition utilisés lors des mesures géophysiques de terrain. Pour chaque zone d'investigation, les résultats des mesures réalisées seront ensuite présentés, analysés et corrélés avec des informations hydrogéologiques, géotechniques et géochimiques (chapitre 5). L'interprétation générale des résultats permettra ensuite de proposer un modèle structural de la halde et de discuter de la qualité des méthodes géophysiques (chapitre 6). Finalement, une conclusion et des recommandations seront présentées.

CHAPITRE 2. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE

Dans ce chapitre, la théorie relative aux différentes techniques géophysiques utilisées dans cette étude est présentée. Ces techniques sont la méthode électrique, la méthode radar et le système électromagnétique (EM) dipolaire fréquentiel.

2.1 Méthode électrique

La méthode électrique consiste à injecter un courant électrique et à mesurer la différence de potentiel électrique générée par le passage du courant dans les formations investiguées. Cette différence de potentiel est fonction de la résistivité des structures sondées et varie également en fonction du dispositif de mesure. Des contrastes de résistivité électrique peuvent ainsi être déterminés, donnant notamment de l'information sur la teneur en eau, la nature et la géométrie des formations traversées. Avant de se pencher sur le fonctionnement de l'auscultation par la méthode électrique, il est utile de rappeler quelques notions fondamentales.

2.1.1 Rappel des notions fondamentales

2.1.1.1 Loi d'Ohm

D'après les travaux du physicien allemand Georg Ohm, la différence de potentiel aux bornes d'un dipôle passif est proportionnelle à l'intensité du courant électrique qui le traverse. Le facteur reliant la différence de potentiel à l'intensité est appelé la résistance. C'est la loi d'Ohm, qui s'exprime sous la forme :

$$V = R.I \quad (\text{Équation 2.1})$$

Avec : V = différence de potentiel aux bornes d'un dipôle quelconque (en Volt, V)

R = Résistance électrique (en Ohm, Ω)

I = Intensité du courant électrique traversant le dipôle (en Ampère, A)

La *figure 2.1* schématise le concept de la loi d'Ohm dans le cas où le dipôle traversé par le courant d'intensité I est un cylindre de résistance R .

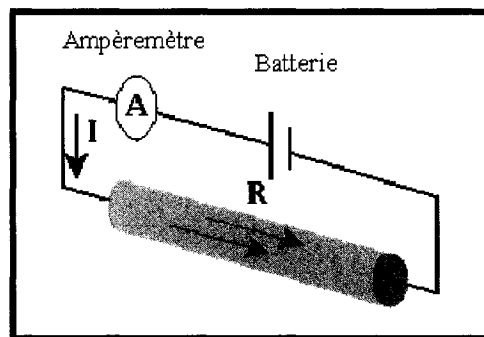


Figure 2.1 : Milieu cylindrique de résistance R , traversé par un courant d'intensité I (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

La résistance d'un milieu est fortement dépendante de sa géométrie. Notons cependant que la résistance n'apporte pas directement d'information sur la nature et les dimensions du matériau traversé. Il est donc nécessaire d'introduire la notion de résistivité.

2.1.1.2 Résistivité

La résistivité (noté ρ , exprimée en $\Omega.m$) d'un matériau représente sa capacité à limiter le passage d'un courant électrique. Cette faculté est étroitement liée aux caractéristiques intrinsèques de ce matériau. Dans le cas d'un sol, la granulométrie et la

porosité, la teneur en eau, la teneur en argile et la minéralogie des matériaux investigués sont les principaux paramètres qui influent sur la résistivité.

La résistance R définie ci-dessus est proportionnelle à la résistivité et dépend de la géométrie de la structure traversée.

Si l'on considère le cas simple de la *figure 2.1*, pour un cylindre de longueur L et de section A (*Figure 2.2*), la résistance électrique s'exprime comme :

$$\rho = (R.A)/L \quad (\text{Équation 2.2})$$

Avec : ρ = Résistivité électrique ($\Omega.m$)

A = Section du matériau traversé (m^2)

L = Longueur du matériau traversé (m)

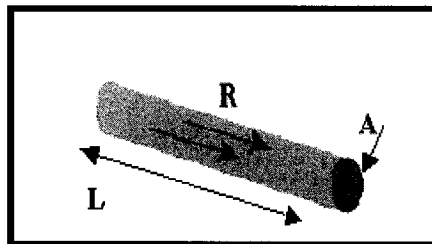


Figure 2.2 : Milieu cylindrique de longueur L , de section A et de résistance R (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

Remarque : La loi d'Ohm est une formulation simplifiée de l'expression de la densité de courant $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$ où J représente la densité de courant par unité de surface, σ représente la conductivité électrique (en Siemens/m) est l'inverse de la résistivité) et E , le champ électrique (V/m).

2.1.1.3 Résistivité apparente

Un sol naturel étant un milieu hétérogène et anisotrope, il est indispensable d'introduire la notion de résistivité apparente. La résistivité apparente correspond à la contribution de tous les matériaux traversés par le courant d'injection pour un dispositif d'électrodes donné. Elle représente la résistivité d'un bloc homogène qui génèrerait une réponse égale à celle mesurée. Elle constitue un excellent moyen de normalisation des mesures en fonction de la géométrie du système de mesure. C'est cette résistivité apparente qui est mesurée sur le terrain. Elle se note ρ_a . Dans le cas d'un dispositif de mesure quadripôle avec deux électrodes d'injection de courant (A et B) et deux électrodes réceptrices (M et N), ρ_a est fonction de la différence de potentiel mesurée entre les deux électrodes de mesure M et N, et d'un facteur géométrique, noté k, qui dépend de la position relative des quatre électrodes A, B, M et N. Dans le cas où les électrodes sont placées à la surface du sol, ce facteur géométrique est défini comme suit (Reynolds, 1997) :

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (\text{Équation 2.3})$$

Ainsi, la résistivité apparente est définie telle que :

$$\rho_a = k \cdot (V_{MN} / I) \quad (\text{Équation 2.4})$$

Avec: ρ_a = résistivité apparente ($\Omega \cdot m$)

k = facteur géométrique (m)

V_{MN} = différence de potentiel mesurée entre les électrodes M et N (V)

Remarque : Les minéraux constitutifs des roches étant généralement isolants, le courant électrique circule donc préférentiellement dans les eaux interstitielles contenues dans les pores ou les fissures.

2.1.1.4 Équipotentielles et lignes de courant.

La *figure 2.3* présente les géométries des lignes de courant et des équipotentiels générées entre deux pôles A et B de signes opposés dans le cas d'un demi espace infini, parfaitement homogène et isotrope. Elle donne aussi une estimation de la densité de courant avec la profondeur.

Le courant électrique s'écoule le long des lignes de courant, orthogonalement aux lignes équipotentiels. La densité de courant (quantité de charges électriques par unité de temps traversant une unité de surface) est d'autant plus forte que l'on se rapproche de la surface. En d'autres termes, plus les lignes équipotentiels sont rapprochées, plus le gradient électrique est fort. Dans le cas illustré, le courant se concentre surtout proche de la surface.

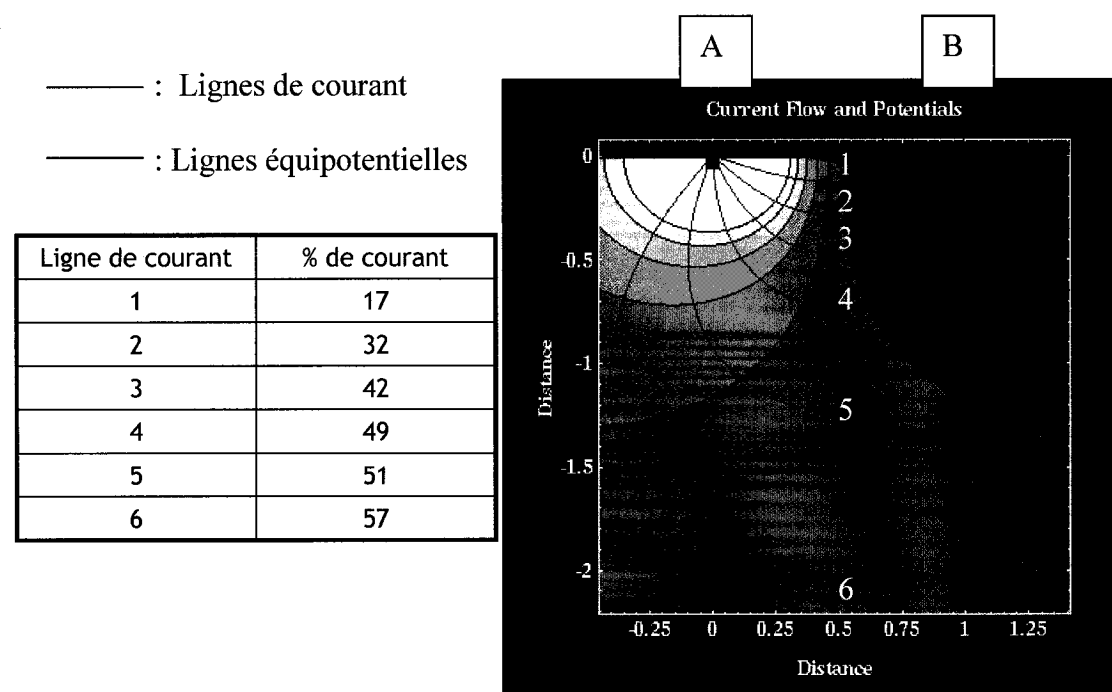


Figure 2.3 : Lignes de courant et équipotentiels. Le tableau présente une estimation de la densité de courant avec la profondeur (adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

2.1.1.5 Loi d'Archie

Il existe différentes passerelles entre les propriétés électriques d'un matériau et ses propriétés hydrogéologiques (Lesmes et al., 2005). Un paramètre important dans la génération du DMA est la présence d'eau dans les milieux. Partant du postulat que la résistivité électrique des fluides interstitiels prédomine sur la résistivité de l'encaissant, Archie (1942) a développé une loi empirique où la résistivité électrique de la formation investiguée est fonction de sa porosité, de la fraction de pores saturés en eau et de la résistivité de l'eau. La loi d'Archie peut s'exprimer sous la forme suivante (Reynolds, 1997) :

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w + \rho_c \quad (\text{Équation 2.5})$$

Avec :

ρ = résistivité électrique du sous-sol ($\Omega \cdot m$)

ρ_w = résistivité électrique de l'eau ($\Omega \cdot m$)

ρ_c = résistivité électrique de la fraction argileuse ($\Omega \cdot m$)

ϕ = porosité (%)

S = degré de saturation (%)

m = facteur empirique déterminé par Archie ($1.3 \leq m \leq 2.5$)

a = facteur empirique déterminé par Archie ($0.5 \leq a \leq 2.5$)

n = facteur empirique déterminé par Archie (≈ 2)

Le degré de saturation peut s'exprimer comme le rapport entre la teneur en eau volumique θ_w et la porosité ϕ (exprimées en %):

$$S = \theta_w / \phi \quad (\text{Équation 2.6})$$

Remarque : Si un milieu est totalement saturé, la porosité est égale à la teneur en eau volumique.

En combinant l'équation 2.5 et l'équation 2.6, il est donc possible de relier la résistivité électrique à la teneur en eau d'un milieu. La relation est décrite par l'équation suivante:

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{(-m+n)} \cdot \theta_w^{-n} + \rho_c \quad (\text{Équation 2.7})$$

2.1.2 Principe de l'imagerie électrique

2.1.2.1 Configurations d'électrodes

Le but de l'imagerie électrique est de fournir des renseignements sur la distribution spatiale des résistivités dans un sol. Pour ce faire, des dispositifs composés de quatre électrodes A, B, M et N plantées dans le sol le long d'un même profil sont fréquemment utilisés. Les dispositifs n'ont pas tous la même sensibilité. Certaines configurations conviennent mieux à la détection latérale (structures verticales comme des dykes), d'autres conviennent mieux à la détection verticale (structures horizontales comme des couches). De plus, la profondeur d'investigation, correspondant à la profondeur maximale de détection atteinte par la méthode électrique est fortement dépendante de l'espacement inter-électrodes. Plus cet espacement est important, plus la profondeur d'investigation est grande. La profondeur d'investigation est aussi liée à de nombreuses caractéristiques intrinsèques au milieu investigué comme ses contrastes de résistivité et sa géométrie.

Suivant le problème auquel l'utilisateur est confronté et/ou la connaissance a priori de la structure du milieu investigué, des dispositions et des combinaisons d'électrodes différentes peuvent être choisies. La *figure 2.4* présente les configurations d'électrodes les plus couramment utilisées, la profondeur d'investigation et le spectre d'application préférentiel en fonction du dispositif choisi. Le paramètre L correspond à l'espacement maximal inter-électrodes.

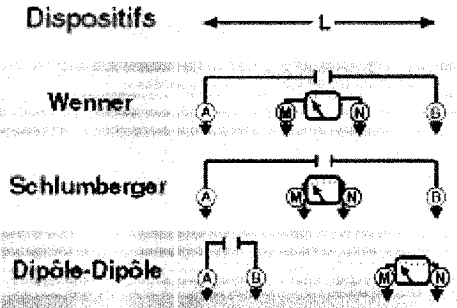
Dispositifs		Prof. d'investigation Roy (1971) Barker (1989)		le mieux adapté pour....
	Wenner	0.11L	0.17L	Structures horizontales
	Schlumberger	0.125L	0.19L	Structures horizontales et verticales
	Dipôle-Dipôle	0.195L	0.25L	Structures verticales

Figure 2.4 : Configurations d'électrodes couramment utilisées (tiré du cours GML 6201a, École Polytechnique de Montréal)

Sur la figure 2.5, sont présentés les modes de déplacement des électrodes pour les dispositifs Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle.

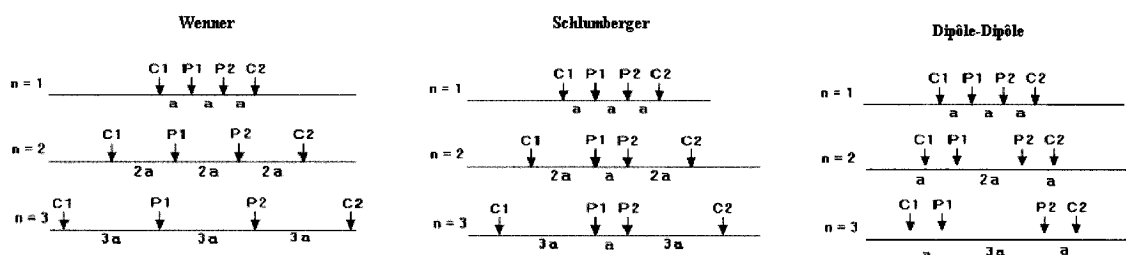


Figure 2.5 : Mode de déplacement des électrodes selon le dispositif utilisé (tiré du cours GML 6201a, École Polytechnique de Montréal)

A l'aide de ces différents dispositifs, il est possible d'effectuer des mesures de deux manières : Le sondage électrique (Figure 2.6, gauche) permet d'effectuer des mesures à l'aplomb d'un point situé en surface, en augmentant la distance des électrodes symétriquement par rapport au centre du dispositif. Cette manière d'acquérir des mesures permet de connaître les variations verticales de la résistivité. Ensuite, à l'aide de programmes d'inversion (ou d'abaques), il est possible d'évaluer les épaisseurs et les résistivités des matériaux en présence dans les zones investiguées. Lors d'un sondage électrique, les tranches de terrain sont considérées homogènes et sans aucune

variation latérale. La réalité est souvent toute autre. Les variations latérales du sous-sol sont détectées grâce aux traînées (*Figure 2.6*, droite). C'est un dispositif qui garde fixe la longueur entre les électrodes d'injection du courant et de mesure du potentiel. Le résultat est une coupe du sous-sol à une certaine profondeur, permettant de visualiser les variations latérales de la résistivité apparente.

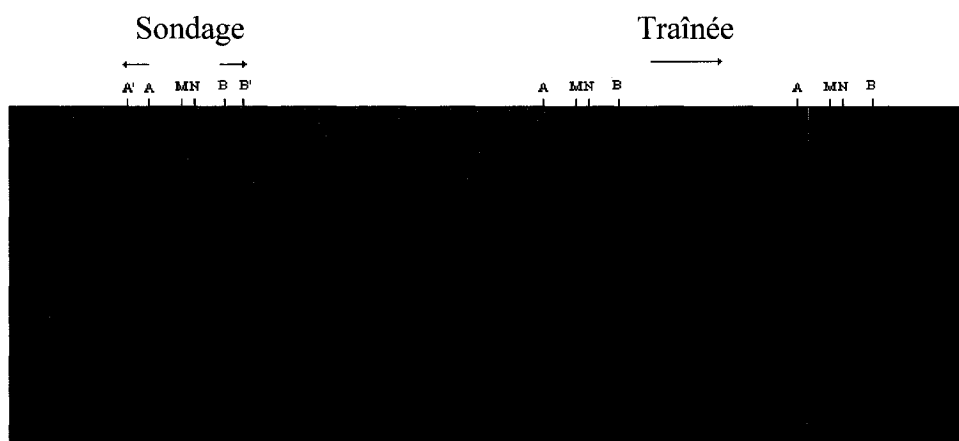


Figure 2.6 : Mesures de résistivité d'un sol par sondage (gauche) et par traînée (droite)

La méthode de l'imagerie électrique est en fait une combinaison de sondages et de traînées, mise au point pour obtenir une coupe des résistivités du sous-sol, qui tienne compte des variations verticales et horizontales dues à la géologie.

2.1.2.2 Construction d'une pseudo-section

Au niveau du dipôle AB, dit « dipôle émetteur », un courant électrique continu est injecté dans le milieu à investiguer. Au niveau du dipôle MN dit « dipôle récepteur », la différence de potentiel électrique générée par le passage du courant dans la formation investiguée est mesurée grâce à un dispositif d'acquisition (résistivimètre, ordinateur

portable). Comme la différence de potentiel est directement liée à la résistivité apparente, la valeur ainsi mesurée constitue un premier point de mesure.

Afin d'étudier la distribution spatiale des valeurs de résistivité apparente dans un plan vertical, il est nécessaire de réitérer le processus de mesure en translatant le dispositif le long du profil et en modifiant l'écartement inter-électrodes. L'échantillonnage est ainsi réalisé le long d'un profil à la verticale des électrodes. Chaque point de mesure de résistivité apparente est reporté sur une pseudo-section qui a comme abscisse le milieu du dispositif utilisé et comme ordonnée une pseudo-profondeur proportionnelle à l'écartement des électrodes. Les mesures sont réalisées automatiquement par le système d'acquisition. La *figure 2.7* présente la séquence des mesures effectuées pour construire une pseudo-section électrique avec un dispositif de type Wenner.

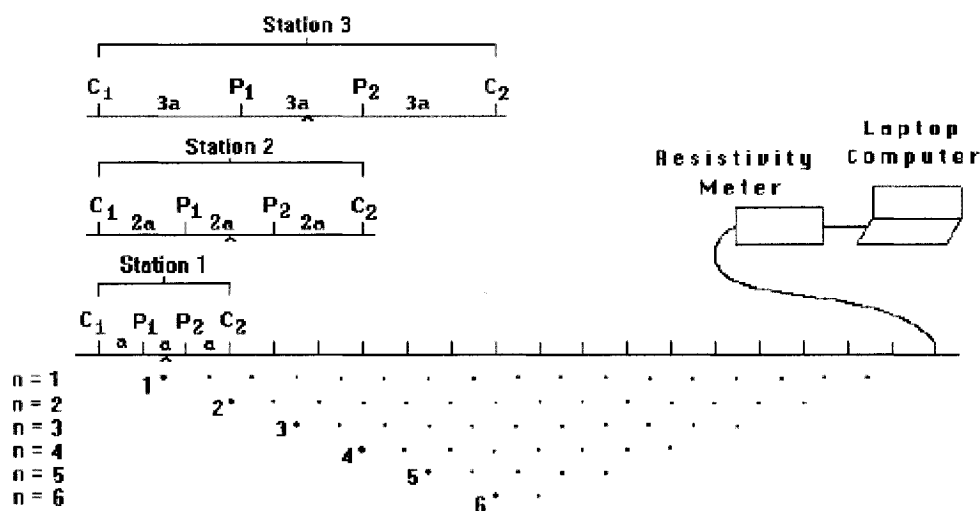


Figure 2.7 : Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner (tiré du manuel d'utilisation de RES2DINV)

En pratique, une série d'électrodes est plantée dans le sol. L'espacement 'a' entre deux électrodes consécutives est déterminé en fonction de la taille du profil à réaliser. Les électrodes sont reliées au dispositif de mesure par l'intermédiaire d'un câble avec multiples "prises", aussi appelé *flûte*. Le nombre de niveau de mesures sera égal au facteur multiplicatif 'n' utilisé pour faire varier l'espacement entre les électrodes.

2.1.2.3 Approximation 2D, fiabilité et résolution des mesures

Plusieurs problèmes peuvent venir biaiser la qualité des mesures de résistivité. Le premier, d'ordre purement technique, intervient quand le contact entre le milieu investigué et l'électrode n'est pas satisfaisant (électrode débranchée de la flûte, terrain rocaillieux, absence de mort terrain générant une résistance de contact trop élevée...). Dans ce cas, le courant électrique ne pourra pas/ou peu se propager dans le sol. Pour palier à ce problème, les dispositifs d'acquisition actuels « interrogent » les électrodes une à une avant de procéder aux mesures afin de détecter un mauvais branchement. Par ailleurs, ils indiquent l'intensité du courant injecté dans la formation, ce qui permet, le cas échéant, de modifier le contact entre l'électrode et le sol (en rajoutant par exemple dans le trou, un mélange favorisant la conduction du courant, matériau argileux + sel + eau).

Les valeurs de résistivité apparente mesurées par le dispositif d'acquisition intègrent l'effet des structures à l'aplomb du profil mais prennent également en compte l'effet de structures latérales qui ne recoupent pas nécessairement la section. Cet effet se ressent surtout quand le profil est proche de structures très conductrices ou très résistives. Une approximation, néanmoins réaliste, est donc réalisée en créant des pseudo-sections en deux dimensions dans un espace en trois dimensions. Par ailleurs, la fiabilité des mesures décroît avec la profondeur car la densité de courant traversant les formations diminue (cf. *Figure 2.3*). D'autre part, la résolution des mesures est d'autant plus faible que l'espacement inter-électrodes est grand, car le dispositif d'acquisition devra intégrer les valeurs de résistivité sur un plus grand volume.

2.1.3 Traitements généraux

2.1.3.1 Inversion des données avec le logiciel RES2DINV

La représentation des résultats sous forme de pseudo-section électrique est pratique. Cependant, elle ne correspond pas à la réalité du terrain car elle prend en compte des résistivités apparentes et des pseudo-profondeurs. Afin d'obtenir une image des résistivités vraies d'un sous-sol en fonction de la distance et de la profondeur, il est nécessaire de procéder à l'inversion des mesures de résistivité apparente. Dans cette étude, le logiciel d'inversion choisi est RES2DINV (Loke et Barker, 1996). Ce logiciel est couramment utilisé pour les applications électriques liées à l'environnement.

Le programme RES2DINV lit des fichiers ASCII. Ces fichiers renseignent notamment sur la valeur de résistivité apparente en chaque point de mesure, mais également sur le mode d'acquisition, l'espacement inter-électrodes, et la distance inter-dipôles. RES2DINV impose à l'utilisateur que l'espacement inter-dipôles soit un multiple du pas d'échantillonnage. Le programme génère dans un premier temps, un modèle homogène de résistivité du sous-sol composé de couches d'épaisseurs croissantes avec la profondeur. L'épaisseur de la première couche est déterminée en fonction du dispositif utilisé et de l'espacement inter-électrodes, celle des autres couches augmente de 10%, ou 25% avec la profondeur selon le choix de l'utilisateur. Chaque couche est elle-même composée d'un certain nombre de blocs rectangulaires.

En fonction du dispositif d'acquisition utilisé lors des mesures, le programme calcule la réponse en résistivité apparente (ρ_{aC}) aux emplacements des mesures. Les résistivités apparentes calculées sont comparées avec les données de résistivité apparente mesurées sur le terrain (ρ_{aM}). Le logiciel RES2DINV tente alors de réduire l'écart entre des valeurs calculées et les valeurs mesurées. L'optimisation se fait grâce à un algorithme itératif qui minimise une fonction coût par moindres carrés à chaque itération. Les calculs de modélisation directe se font par différences finies ou éléments finis suivant le choix de l'utilisateur. La résistivité de chaque bloc du modèle est ainsi mise à jour

après chaque itération. Afin d'avoir une idée de la stabilité du modèle, le programme détermine l'erreur RMS (Root Mean Square). Au cours du processus itératif, la RMS évolue. Quand elle ne change plus de manière significative ($[\rho_{aC} - \rho_{aM}]^2$ est petit), le modèle est optimisé par rapport aux mesures.

RES2DINV présente à la fois, la pseudo section des résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section des données calculées à partir du modèle des résistivités vraies obtenu. La *figure 2.8* synthétise les principales étapes de l'inversion avec le logiciel RES2DINV.

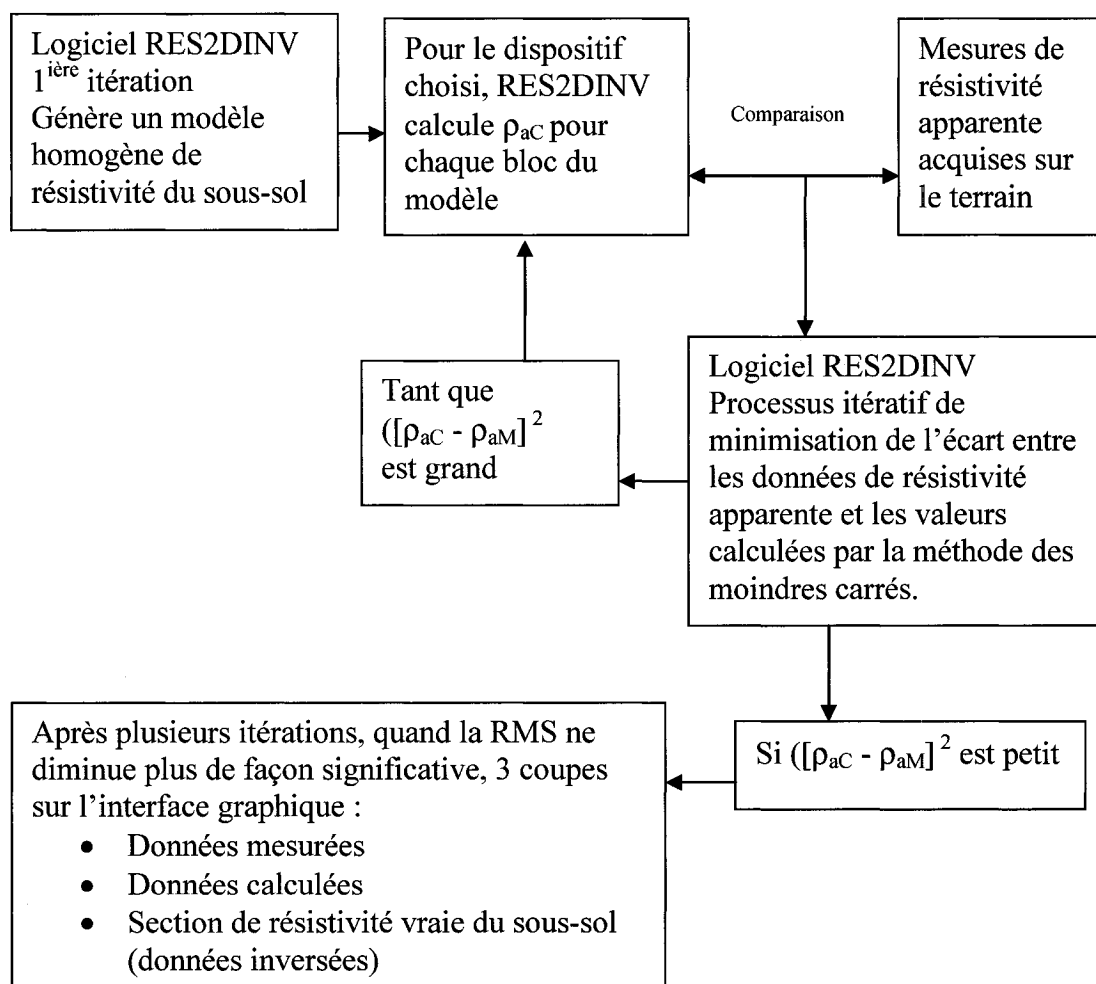


Figure 2.8 : Principales étapes de l'inversion avec le logiciel RES2DINV (adapté de Loke et al., 1996).

2.1.3.2 Modélisation avec le logiciel RES2DMOD

Le logiciel RES2DMOD développé par Loke (2002), permet de créer des modèles numériques de résistivité correspondant à des structures géologiques bidimensionnelles quelconques. L'utilisateur affecte des valeurs de résistivités à une grille d'un modèle et choisit le maillage horizontal et vertical. Il indique par ailleurs le type de dispositif qu'il souhaite utiliser pour « l'acquisition des données ». À partir de ces paramètres, le programme génère les réponses de résistivité apparente présentées sous forme d'une pseudo-section. A l'aide du logiciel RES2DINV, ces données synthétiques peuvent ensuite être inversées pour déterminer le modèle de résistivité vraie du milieu modélisé. L'intérêt d'un tel logiciel est double.

Il permet d'une part de comparer les pseudo-sections issues des données acquises sur le terrain avec les modèles inversés, afin de mieux caractériser la signature électrique des structures contenues dans le milieu.

Il permet d'autre part de s'informer sur la sensibilité de la réponse d'un dispositif d'acquisition donnée par rapport à des structures de résistivités et de géométries variables. Ceci permet de déterminer le dispositif le mieux adapté pour une étude et d'optimiser les paramètres d'acquisitions (notamment, l'espacement inter-électrodes), avant de réaliser des mesures de terrain.

2.2 Méthodes électromagnétiques

Les méthodes électromagnétiques (EM) sont basées sur l'étude de la propagation/diffusion d'ondes électromagnétiques dans le sol générées par une source naturelle ou contrôlée. Dans cette étude, les techniques électromagnétiques utilisées sont le radar géologique (mode propagatif) et les systèmes dipolaires fréquentiels (mode diffusif). Ces deux méthodes utilisent des sources contrôlées.

2.2.1 Le radar géologique

2.2.1.1 Notions et principes de fonctionnement

Le radar géologique, connu sous son appellation anglaise Ground Penetrating Radar (GPR), est basé sur l'étude de la propagation d'ondes électromagnétiques hautes fréquences ($f = 10 \text{ MHz}$ à 2 GHz) dans le sous-sol. Une antenne émettrice (Tx) envoie à cadence élevée, des impulsions électromagnétiques de courte durée ($< 1 \text{ ns}$ à $> 10 \text{ ns}$) dans le milieu à investiguer. Les impulsions sont générées par le passage d'un courant électrique aux bornes du dipôle de Tx. Une antenne réceptrice (Rx) mesure de façon synchrone, le temps de propagation et l'amplitude de l'onde EM qui s'est réfléchi ou transmise dans le milieu. Les dispositifs radar actuels permettent de réaliser des mesures depuis des surfaces libres ou en forage. Dans cette étude, les deux techniques ont été utilisées. Bien que le mode d'acquisition et les traitements soient différents suivant la technique choisie, les systèmes radar de surface et en forage présentent les mêmes composantes, à savoir (Gloaguen, 2004):

- Une antenne émettrice (Tx) dont le système électronique permet de générer une impulsion électromagnétique.
- Une antenne réceptrice (Rx) dont le système électronique permet de pré-amplifier et de transférer le signal numérisé vers une unité de contrôle.

- Une unité de contrôle permettant la synchronisation des deux antennes.
- Des fibres optiques permettant l'acheminement rapide des signaux et des communications entre les antennes et une unité de commande.
- Une unité de commande et de stockage des données, solidaire ou indépendante du reste du système.

L'étude de la géométrie des échos, de la vitesse de propagation des ondes, de l'amplitude et de la polarité des signaux réfléchis constitue la base de l'interprétation des mesures. En considérant le cas simple d'une onde EM se propageant dans un milieu non dispersif à une seule dimension, l'équation de propagation est de la forme (Gloaguen, 2004) :

$$A_r = (A_0/r).e^{-(\alpha+i\beta)r} e^{-i\omega t} \quad (\text{Équation 2.8})$$

Avec: A_r = Amplitude de l'onde EM à une distance r de la source Tx (mV)

A_0 = Amplitude du pulse EM générée par la source Tx

α = Constante d'atténuation

r = Distance entre Tx et Rx (m)

β = Constante de phase

$\omega = 2\pi.f$ = fréquence angulaire (rad/s) où f est la fréquence d'émission (Hz)

t = temps de propagation de l'onde EM (s)

La constante d'atténuation α (en Np/m) et la constante de phase β (en rad/m) peuvent être définies de la façon suivante (Reynolds, J.M., 1997):

$$\alpha = \omega \{(\mu\epsilon/2) [(1 + \sigma^2/(\omega^2\epsilon^2))^{1/2} - 1]\}^{1/2} \quad (\text{Équation 2.9})$$

$$\beta = \omega \{(\mu\epsilon/2) [(1 + \sigma^2/(\omega^2\epsilon^2))^{1/2} + 1]\}^{1/2} \quad (\text{Équation 2.10})$$

Avec : μ = perméabilité magnétique (Henry/m)

ϵ_e = permittivité diélectrique (F/m)

σ = conductivité électrique (Siemens.m⁻¹)

Les équations 2.8, 2.9 et 2.10 montrent que l'amplitude et la vitesse de propagation des ondes EM sont fortement conditionnées par la fréquence d'émission, la conductivité électrique et la permittivité diélectrique des milieux traversés. Si le milieu est un bon diélectrique, $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ (Balanis, 1989), la relation suivante lie la constante d'atténuation à la conductivité électrique du milieu :

$$\alpha = 1.69\sigma/K^{1/2} \quad (\text{Équation 2.11})$$

Avec : K = constante diélectrique = ϵ_e/ϵ_0 = permittivité du matériau/permittivité du

vide = ϵ_r = permittivité relative

Plus le terrain sera conducteur, plus l'onde EM s'y propageant va être atténuée. Les processus dissipatifs de relaxation diélectrique et magnétique entraînent une perte d'énergie par transformation en chaleur. Plus la fréquence d'émission sera importante, plus l'onde sera atténuée et la profondeur d'investigation sera plus faible. Par contre, l'utilisation de fréquences élevées permettra d'avoir une meilleure résolution (Balanis, 1989).

Par ailleurs, connaissant la distance r entre Tx et Rx et le temps de propagation de l'onde EM mesuré au niveau de Rx, la vitesse de l'onde EM dans le milieu peut être déduite. Cette vitesse, dite vitesse de phase, s'exprime sous la forme :

$$V = \omega/\beta \quad (\text{Équation 2.12})$$

Dans le cas d'un bon milieu diélectrique, $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$ (Balanis, 1989), l'approximation suivante est valide :

$$V = \omega/\beta \approx 1/ (K\mu_0\epsilon_0)^{1/2} \approx c/K^{1/2} \quad (\text{Équation 2.13})$$

Avec : μ_0 = perméabilité magnétique du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

ϵ_0 = permittivité diélectrique du vide ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

c = vitesse de la lumière (0,3 m/ns)

L'équation 2.13 montre que la vitesse de phase est directement liée à la permittivité diélectrique relative ϵ_r (ou K) des matériaux traversés. En annexe 1, un tableau présente les valeurs de ϵ_r et les vitesses associées pour différents matériaux fréquemment rencontrés dans la nature (selon Reynolds (1997)). À partir des vitesses de propagation des ondes radar, il est donc possible d'estimer ϵ_r renseignant sur les propriétés diélectriques du sous-sol et sur la nature intrinsèque des matériaux constitutifs. À partir de l'équation 2.13, il est également possible de déterminer la valeur de la constante diélectrique et ainsi d'évaluer la teneur en eau volumique (θ_w) du milieu investigué, d'après la relation de Topp et al. (1980) :

$$\theta_w = -5,3 \cdot 10^{-2} + (2,92 \cdot 10^{-2} \cdot K) - (5,5 \cdot 10^{-4} \cdot K^2) + (4,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^3) \quad (\text{Équation 2.14})$$

La teneur en eau est un paramètre important qui donne des indications sur les caractéristiques hydrogéologiques du milieu qui sont directement reliées aux propriétés diélectriques (Lesmes et al., 2005; Annan, 2005).

2.2.1.2 Acquisition des mesures de surface

Il existe principalement deux modes d'acquisition des données radar pour les mesures de surface : le mode réflexion et le mode point milieu commun.

Le mode réflexion s'intéresse à l'enregistrement de l'onde directe (onde se propageant en ligne droite entre Tx et Rx), des ondes réfractées et des ondes réfléchies. En mode réflexion, les antennes Tx et Rx sont généralement séparées d'une distance fixe connue par l'utilisateur et elles sont déplacées avec un pas constant le long d'un profil (*Figure 2.9*).

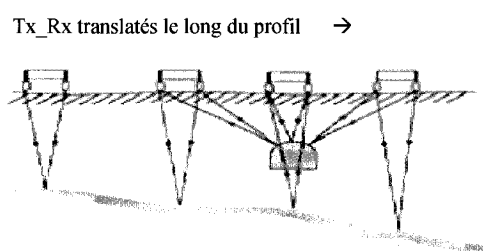


Figure 2.9 : Acquisition en mode réflexion (Adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

A chaque point d'acquisition (trace), on mesure l'amplitude, la polarité et le temps de propagation des ondes EM réfléchies et réfractées sur les interfaces et les discontinuités contenues dans le sous-sol. Le temps mesuré en réflexion est un temps double correspondant au temps de trajet aller/retour de l'onde EM dans le milieu. Pour une même position du dispositif, plusieurs brèves impulsions peuvent être générées en Tx. La sommation cohérente (stacking) du signal enregistré en Rx permet d'améliorer le rapport signal/bruit. Les profils (ou radargrammes) ainsi obtenus représentent l'amplitude des ondes réfléchies en fonction du temps de parcours de l'onde entre Tx et Rx (*Figure 2.10*). L'axe des abscisses correspond à la longueur du radargramme (positionnement maximum du récepteur), et l'axe des ordonnées au temps de parcours. L'interprétation des radargrammes permet de déterminer les variations de propriétés

électriques correspondant à des variations lithologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques.

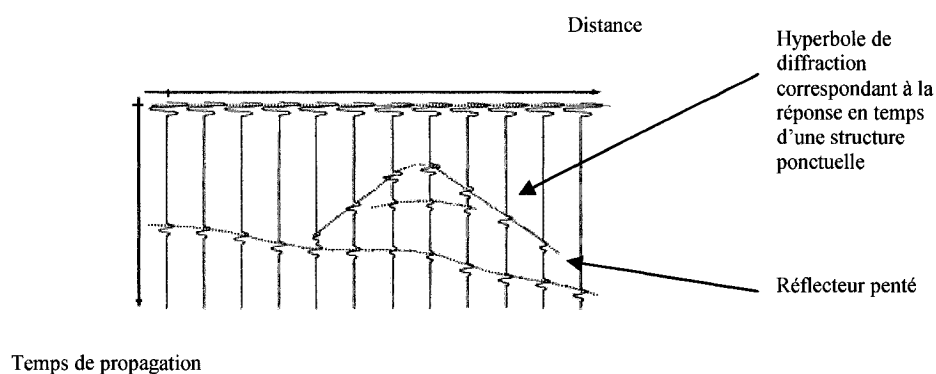


Figure 2.10 : Représentation des résultats sous forme de radargramme (Adapté du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

Avec l'approche du point milieu commun, ou Common Middle Point (CMP), les antennes Tx et Rx sont déplacées symétriquement et à pas constant par rapport au milieu du dispositif. La figure 2.11 illustre l'acquisition en point milieu commun.

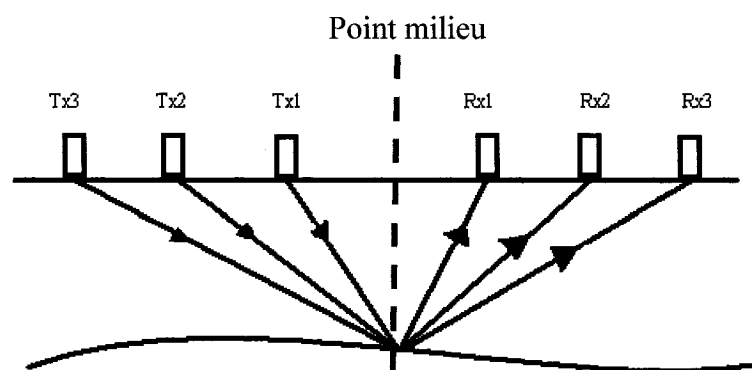


Figure 2.11 : Mode d'acquisition en mode CMP

Pour un même point milieu, plusieurs temps de propagation sont mesurés. Ils correspondent à plusieurs déports Tx-Rx. Quand les mesures sont acquises pour un point milieu, le dispositif est déplacé et la manipulation est réitérée. Les courbes obtenues présentent le temps de trajet des ondes en fonction du déport de mesure (*Figure 2.12*).

Ce type d'acquisition permet de mieux déterminer les signaux contenus dans les radargrammes de réflexion et de faire une analyse de vitesse du milieu investigué à partir de l'étude de la courbure des hyperboles obtenues pour le point milieu.

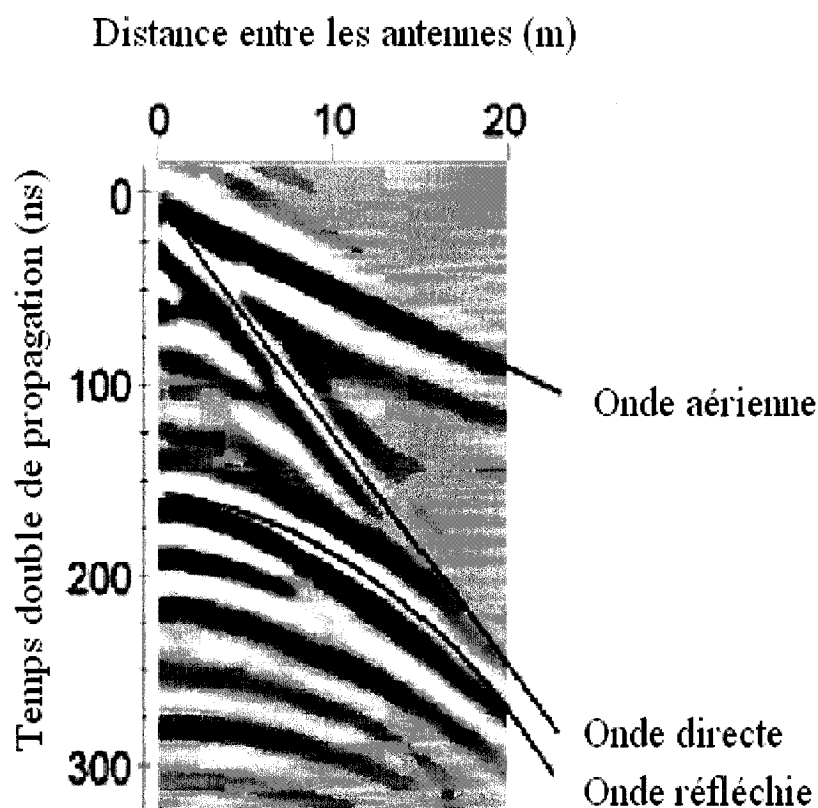


Figure 2.12 : Exemple de résultats en mode CMP (Adapté de Annan, 2001)

2.2.1.3 Traitement des mesures de surface

Les données acquises par le radar géologique doivent être traitées pour pouvoir être interprétées. Les principaux traitements réalisés dans ce projet se font avec le logiciel Reflex W (Sandmeier K.J, 2002). Ceci inclus :

Traitements préliminaires :

Ils consistent à réorienter les profils en Ouest-Est et à les mettre à la même échelle de couleur pour qu'ils puissent être comparés. Les traces sont tronquées à partir du moment où le bruit de fond devient prépondérant.

Filtre de Dewow :

En appliquant un filtre de Dewow, le signal très basse fréquence est supprimé.

Correction statique :

Toutes les amplitudes des premières arrivées (aériennes ou directes) d'un radargramme doivent être alignées horizontalement car, en mode réflexion, l'espacement Tx-Rx reste constant et la vitesse de propagation des ondes aériennes est constante. Un décalage temporel des premières arrivées est donc un défaut expérimental. Pour y remédier, les premières arrivées sont pointées (méthode semi automatique du picking qui permet d'aligner les traces horizontalement).

Gain :

L'amplitude du signal radar décroît avec le temps (cf. équation 2.8). Pour mettre en évidence les structures contenues dans les traces, il est parfois nécessaire d'appliquer un gain. Pour mettre en évidence des variations d'amplitudes, liées à des contrastes de compositions, il est conseillé d'appliquer un gain SEC (Spreading and Exponential gain Compensation). Chaque trace est alors multipliée par une fonction gain $g(t)$ de la forme $g(t) = (1+at).e^{(b.t)}$. Le gain amplifie sans distinction le bruit et le signal.

Filtre passe-bande :

Ce filtre permet de retirer de chaque trace l'information contenue en dehors d'une fenêtre fréquentielle fixée par l'utilisateur.

Modélisation des hyperboles de diffraction :

Sur un radargramme, la signature d'une structure ponctuelle (ou pseudo ponctuelle) située en surface (pylône, arbre...) ou dans le sous-sol (tuyau, bloc de roche, morceau de métal, etc.) est une hyperbole de diffraction. Avec Reflex W, on peut modéliser des hyperboles de diffraction et les comparer avec celles observées sur un radargramme. Comme l'ouverture de l'hyperbole augmente avec la vitesse de propagation des ondes EM, il est possible de savoir si l'hyperbole observée est due à une diffraction sur une structure en surface ou dans le sous-sol. Pour cela, on choisit couramment de modéliser une hyperbole correspondant à la propagation d'onde EM dans l'air (0.3 m/ns) et de la comparer avec celles du radargramme. Si l'ouverture des deux hyperboles sont les mêmes, la structure est située en surface (propagation d'onde aérienne). Si l'ouverture de l'hyperbole modélisée est plus grande que celle observée, (i.e $V_{\text{observée}} < V_{\text{dans l'air}}$), la structure est située en sub-surface. Si c'est le contraire, la vitesse de propagation est supérieure à la vitesse de la lumière (0,3 m/ns). Cette situation est physiquement impossible. Un tel artéfact peut être causé par la réflexion d'ondes radar sur des structures non orthogonales au profil radar.

Migration :

La migration (de Kirchhoff) est basée sur la sommation des signaux selon l'axe x. Elle permet de focaliser l'énergie de diffraction et de réflexion à la source afin d'avoir une image plus réaliste de la position des structures. Grâce aux hyperboles modélisées, on détermine un modèle de vitesse qui servira dans la migration. Cette migration peut être de deux types : temporelle ou en profondeur. Dans le premier cas, l'image obtenue présente la longueur du profil en abscisse et le temps double de propagation des ondes

radar en ordonnée. Dans le deuxième cas, l'image obtenue présente la longueur du profil en abscisse et la profondeur en ordonnée.

2.2.1.4 Acquisition des mesures en forage

La mise en œuvre de dispositifs radar en forage permet d'investiguer et de caractériser la zone comprise entre deux forages. Cette zone sera appelée un panneau dans la suite du mémoire. Le principal avantage des mesures en forage est d'imager des zones difficiles d'accès avec un dispositif de surface classique. Ici, la perte de résolution en profondeur n'est pas un facteur limitatif de la méthode vu que l'appareil peut accéder à des profondeurs équivalentes à celles du trou lui-même. La présence de couches superficielles argileuses (matériau conducteur) peut atténuer la réponse des signaux radar envoyés depuis la surface. L'utilisation du radar en forage peut palier ce problème.

Il existe différentes configurations d'antennes donnant accès à des informations complémentaires. La première configuration est appelée « entre trous » (ou *Cross Hole*) et les mesures sont effectuées en mode *transmission*. Le mode transmission a pour but d'enregistrer la décroissance en amplitude (atténuation) ainsi que le temps de parcours de l'impulsion initiale ayant traversé directement la distance entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, l'antenne émettrice est placée dans un forage et l'antenne réceptrice est placée dans un autre forage. Une impulsion est générée en Tx. L'amplitude et le temps de propagation de l'onde directe sont mesurés au niveau de Rx. Les mesures sont répétées pour différentes positions après translation du dispositif d'un pas constant. La couverture de la zone investiguée (rais ayant voyagés entre les deux forages) sera d'autant plus importante que le pas choisi sera petit. La *figure 2.13* schématise l'acquisition en configuration « entre trous ».

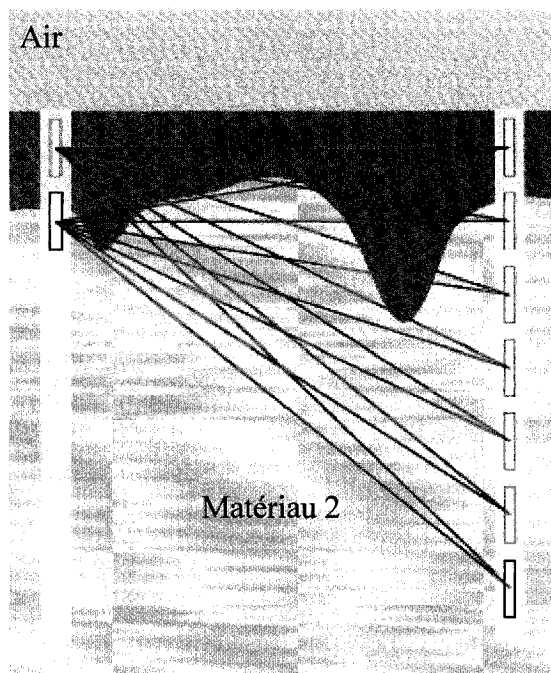


Figure 2.13 : Acquisition en configuration « entre trous ». Pour chaque position de Tx dans un forage, Rx est déplacé d'un pas constant le long d'un second forage (tiré de Giroux et al., 2003)

Ce type d'acquisition permet de réaliser des tomographies (du grec *Tomo* = section et *graphein* = écrire) de vitesse et d'atténuation, c'est à dire des cartes de vitesse et d'atténuation des ondes radar entre les deux forages. La vitesse et l'atténuation des ondes radar étant principalement fonction de la conductivité électrique et de la permittivité diélectrique (cf. équations 2.11 et 2.14), il est ainsi possible de caractériser la distribution de ces propriétés dans le plan formé par les deux forages.

Selon le principe de Fermat (Berryman, 1989), un rai prend le parcours le plus rapide pour se rendre d'un point à un autre (pas forcément la distance la plus courte). Proche de la surface, les ondes radar vont avoir tendance à se propager dans l'air pour atteindre le récepteur. La vitesse des ondes radar sera donc surestimée proche de la surface et la couverture de la couche superficielle est réduite (pas de rais). Pour remédier à ce

problème, l'antenne émettrice peut être placée en surface en laissant l'antenne réceptrice dans un forage. Cette configuration est appelée *Vertical Radar Profiling* (VRP). Comme en configuration « entre trous », l'antenne Tx et l'antenne Rx sont déplacées afin de couvrir le maximum de combinaisons possibles de couples émetteur-récepteur. La *figure 2.14* présente l'acquisition en configuration VRP.

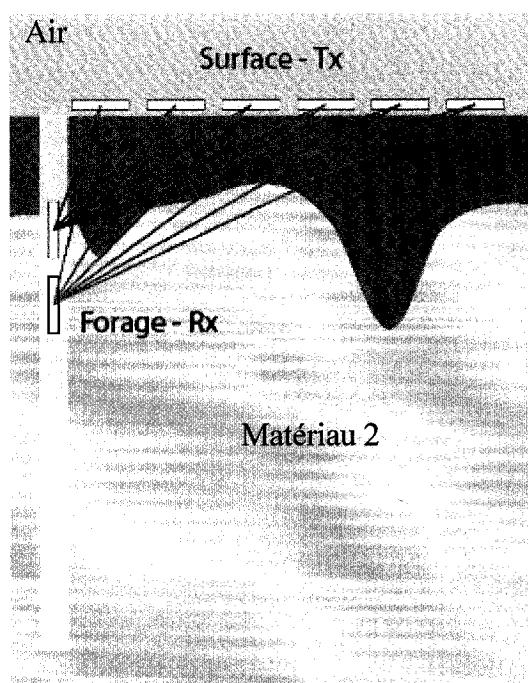


Figure 2.14: Acquisition en configuration VRP. Une antenne est située en surface, l'autre est située dans un trou. Cette configuration permet de densifier la couverture superficielle (Tiré de Giroux et al., 2003)

Finalement, l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice peuvent être placées dans le même forage, espacées d'un déport constant. Cette configuration est appelée « simple trou » (ou *Single Hole*) et les mesures sont effectuées en mode *réflexion*. Le couple Tx-Rx est translaté le long d'un même forage (*Figure 2.15*). Cette configuration permet d'enregistrer les temps de parcours des ondes directes, réfléchies et/ou réfractées. Le

champ des vitesses le long du forage peut ainsi être estimé à partir des temps de parcours des premières arrivées.

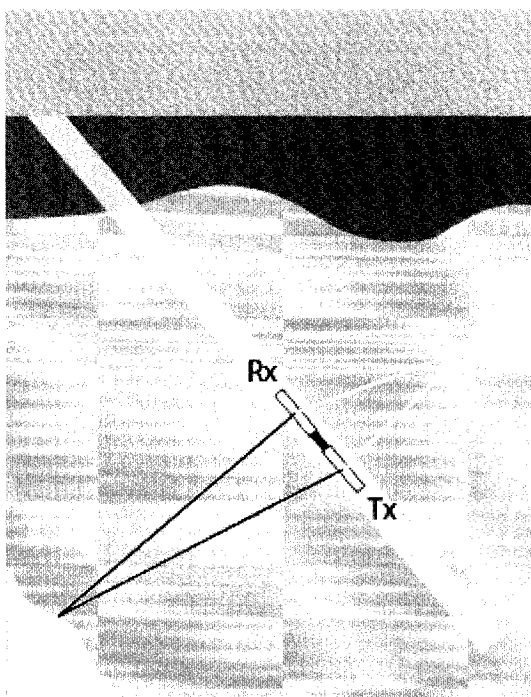


Figure 2.15 : Acquisition en configuration « simple trou ». Les deux antennes sont solidaires et sont déplacées le long d'un forage. Cette configuration permet de déterminer le champ de vitesse le long d'un forage (Tiré de Giroux et al., 2003)

Les mesures réalisées lors d'une investigation tomographique en forage donnent donc accès à un jeu de données associant le temps de parcours et l'amplitude de la première arrivée à chaque position du couple Tx-Rx. Afin de cartographier les propriétés de conductivité électrique et de permittivité diélectrique, il est alors nécessaire de traiter les données obtenues.

2.2.1.5 Traitement des données en forage

La première étape du traitement des données de tomographie radar en forage consiste à déterminer le temps de première arrivée et l'amplitude pic à pic de chaque trace (Figure 2.16). Pour cela, le programme *bh_tomo* a été utilisé (Giroux et al., 2007). Ce programme permet notamment de réaliser un pointé assisté des premières arrivées et des amplitudes.

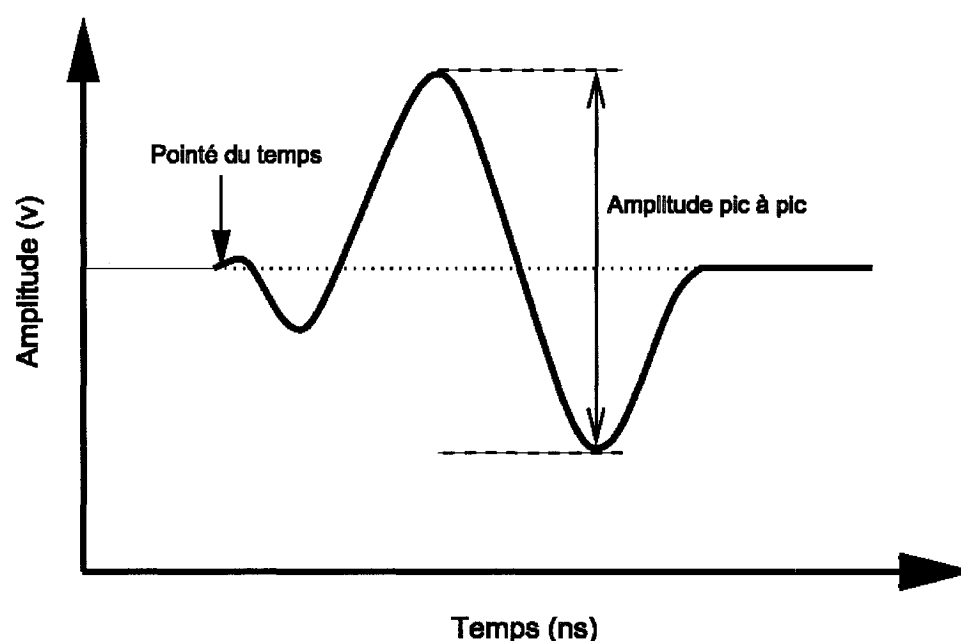


Figure 2.16 : Pointé du temps de première arrivée et mesure de l'amplitude pic à pic d'une onde radar (Tiré de Gloaguen, 2004)

À partir de la connaissance du temps de propagation des premières arrivées (t), il est possible de déterminer la distribution de la lenteur (inverse de la vitesse, noté s) entre les deux forages. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer la distance l correspondant au trajet du rai entre Tx et Rx. Comme chaque rai emprunte le trajet satisfaisant le principe de Fermat, le problème est non linéaire car l'intégration de s se fait le long de l , mais l est fonction de s . Dans le domaine discret, la longueur d'un rai

entre Tx et Rx devient une juxtaposition de segments dont les longueurs sont égales à la portion du rai traversant chaque cellule (*Figure 2.17*).

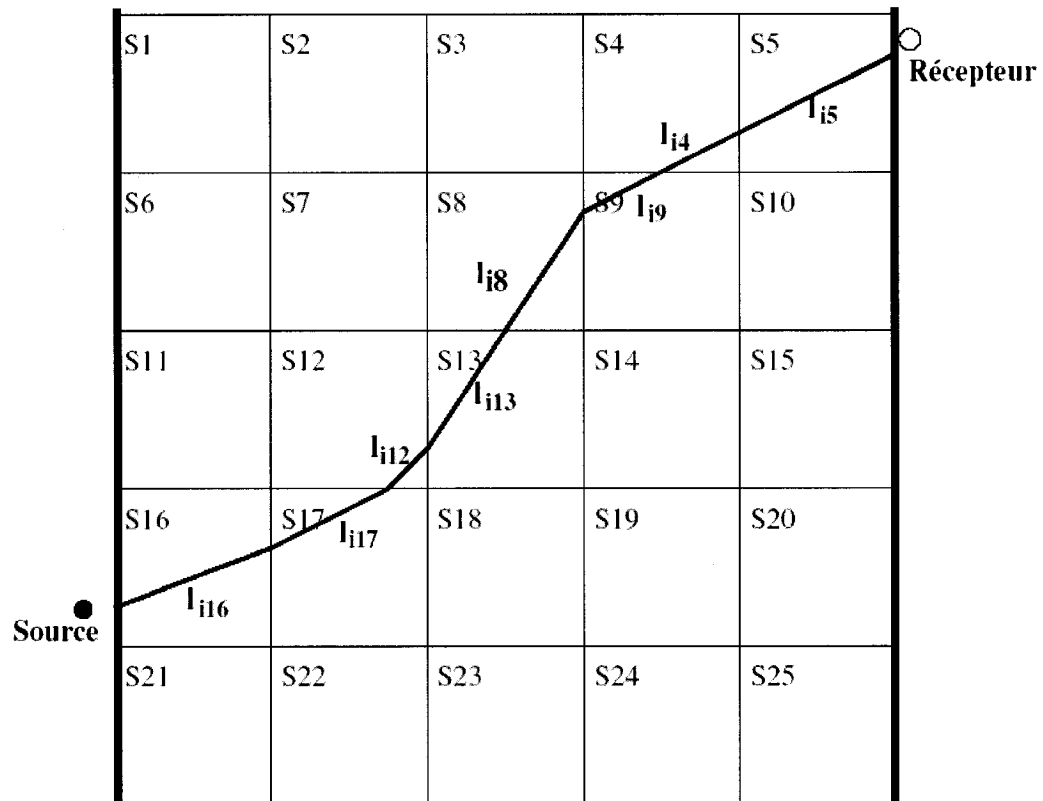


Figure 2.17 : Trajet d'un rai entre Tx (source) et Rx (récepteur) (Tiré de Gloaguen, 2004)

Sous forme matricielle, le système à résoudre s'écrit :

$$L.s = t \quad (\text{Équation 2.15})$$

Avec : L=matrice contenant les segments de rais traversant chaque cellule (L est généralement creuse car les rais ne traversent pas toutes les cellules).

s=matrice contenant les n_p lenteurs inconnues associées à chaque cellule.

t = matrice contenant les n_0 temps d'arrivée mesurés.

Ce système est dit *mal posé* car certaines cellules peuvent être traversées par plusieurs rai (problème surdéterminé) alors que d'autres cellules peuvent n'être traversées par aucun rai (problème sous déterminé). La résolution de l'équation 2.15 n'est donc pas directe et nécessite l'utilisation de méthodes numériques d'inversion.

Il existe plusieurs algorithmes d'inversion permettant de résoudre le problème tomographique (méthodes ART, SIRT, CG, LSQR etc.). Une revue de ces algorithmes se trouve dans Hardage (1992) et dans Gloaguen (2004). Dans cette étude, le programme *bh_tomo* a été utilisé (Giroux et al., 2007). Il est basé sur l'utilisation de méthodes géostatistiques (Gloaguen, 2004). La tomographie d'atténuation n'est pas présentée dans cette étude.

2.2.2 Systèmes dipolaires fréquentiels

2.2.2.1 Principe de fonctionnement

Les systèmes dipolaires fréquentiels sont basés sur la perturbation du champ EM, induit par un signal période (variable) d'origine anthropique. Ils permettent de déterminer la conductivité électrique d'un milieu et peuvent donc donner accès à des paramètres hydrogéologiques (cf. équation 2.7). Un système dipolaire fréquentiel se compose d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice espacées d'une distance, notée e , connue de l'utilisateur. La *figure 2.18* illustre le principe de fonctionnement d'un système dipolaire fréquentiel. Un courant alternatif est injecté dans la bobine émettrice (Tx), générant un champ magnétique primaire, H_p , qui se propage dans le sol. H_p génère par induction dans les sols conducteurs des courants de Foucault qui produisent à leur tour un champ magnétique secondaire noté H_s .

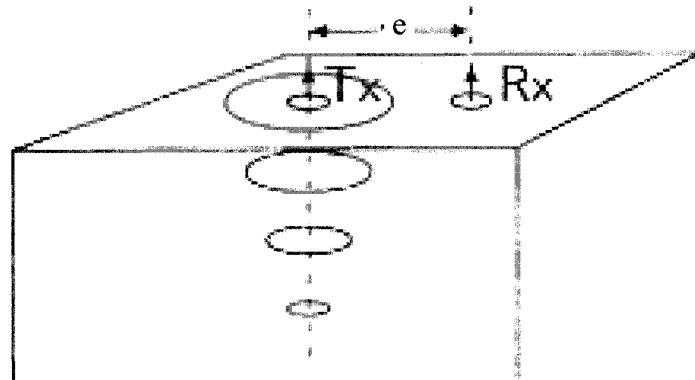


Figure 2.18 : Illustration du principe de fonctionnement du système dipolaire fréquentiel (tiré du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).

La bobine réceptrice (Rx) mesure la composante en quadrature de phase du rapport H_s/H_p lié par l'expression suivante à la conductivité électrique apparente des structures traversées (Mc Neill, 1980):

$$\sigma_a = (4/\omega\mu_0 e^2) \cdot (H_s/H_p)_Q \quad (\text{Équation 2.16})$$

Avec: σ_a = conductivité électrique apparente (Ohm.m)

$\omega = 2\pi \cdot f$ = pulsation (rad/s) où f est la fréquence (Hz)

μ_0 = perméabilité du vide ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

e = espacement entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (m)

$(H_s/H_p)_Q$ = Rapport du champ magnétique secondaire par le champ primaire

2.2.2.2 Modes d'acquisition

Le positionnement des bobines émettrice et réceptrice coplanaires permet de définir deux modes d'acquisition pour les systèmes dipolaires fréquentiels. Quand les plans des bobines sont positionnés horizontalement, l'axe du dipôle magnétique généré est orthogonal à la surface du sol. Cette configuration est appelée le mode vertical. Quand les plans des bobines sont positionnés verticalement, l'axe du dipôle magnétique généré est parallèle à la surface du sol. Cette configuration est appelée le mode horizontal.

Ces deux modes d'acquisition permettent d'atteindre des profondeurs d'investigation différentes. La *figure 2.19* présente la contribution des lignes de courant pour chaque mode en fonction de la profondeur (z) normalisée par l'espacement (e) entre Tx et Rx. En mode vertical, la contribution maximale des lignes de courant est atteinte pour $z = 0.4e$ et est encore significative pour $z = 1.5e$. En surface, la contribution est nulle. En revanche, en mode horizontal, la contribution est maximale à la surface et diminue avec la profondeur. Le mode vertical donne donc accès à une profondeur d'investigation plus importante que le mode horizontal. Ce dernier permet une bonne résolution de la conductivité proche de la surface. En réalisant des acquisitions dans les deux modes, il est donc possible de déterminer l'évolution verticale de la conductivité et donc de renseigner sur la stratification du milieu investigué (Mc Neill, 1980).

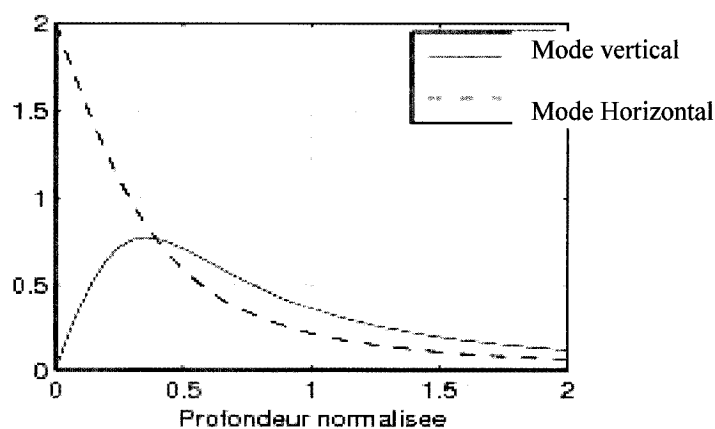


Figure 2.19 : Contribution des lignes de courant pour chaque mode d'acquisition (Adapté du cours GML6201a, Ecole Polytechnique de Montréal).

2.2.2.3 Traitement des données

Les données de conductivité apparente obtenues avec un système dipolaire fréquentiel sont généralement présentées sous forme de profils ou de cartes de conductivité apparente. Les données brutes acquises lors d'une campagne de mesure ne nécessitent donc pas de traitement particulier et peuvent être exploitées directement.

2.3 Performances théoriques des différentes méthodes utilisées

Les différentes techniques géophysiques présentées dans les paragraphes précédents ont été choisies car elles renseignent plus ou moins directement sur des paramètres physiques mesurables dans les haldes à stériles. En particulier, ces méthodes sont sensibles aux variations de conductivité électrique, liée à la teneur en eau. Le *tableau 2.1* suivant est une revue des principaux avantages et limitations des méthodes utilisées (tiré et adapté de Reynolds (1997) et du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal).

Tableau 2.1 : Principaux avantages et limitations des méthodes utilisées (adapté de Reynolds (1997) et du cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal)

	Principaux avantages de la méthode	Principales limitations de la méthode
Électrique	• Détection des anomalies résistives et conductrices • Facilité d'interprétation	• Mise en oeuvre difficile sur les terrains indurés (Couplage électrodes-sol) • Temps d'acquisition
Radar	• Rapidité d'acquisition • Visualisation des résultats en temps réel	• Faible profondeur de pénétration en milieu conducteur • Temps de traitement • Interprétation non intuitive
Radar en forage	• Bonne résolution quelle que soit la profondeur	• Temps d'acquisition • Temps de traitement • Requiert des forages
Système dipolaire fréquentiel	• Excellente résolution de la conductivité • Facilité et rapidité de mise en oeuvre • Pas de problème d'injection de courant • Simplicité d'interprétation	• Dynamique limitée • Dérive instrumentale • Capacité de sondage vertical limitée

Les techniques géophysiques présentées dans ce chapitre vont maintenant être appliquées au cas de la caractérisation d'une halde à stériles. Ceci est l'objet de la suite de ce mémoire.

CHAPITRE 3. PRÉSENTATION DU SITE ET ÉTUDES ANTÉRIEURES

3.1 Mise en contexte

La présente étude a été menée dans le cadre des travaux de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en Environnement et gestion des rejets miniers. Elle s'intéresse au développement d'une approche de caractérisation géophysique de la structure interne d'une halde à stériles. Le site expérimental retenu pour cette étude est la halde N°1 de la mine Laronde, propriété de la compagnie Agnico-Eagle Ltd. La mine Laronde est située à environ 40 km à l'Est de Rouyn-Noranda en Abitibi-Témiscamingue (QC, Canada) (*Figure 3.1*).

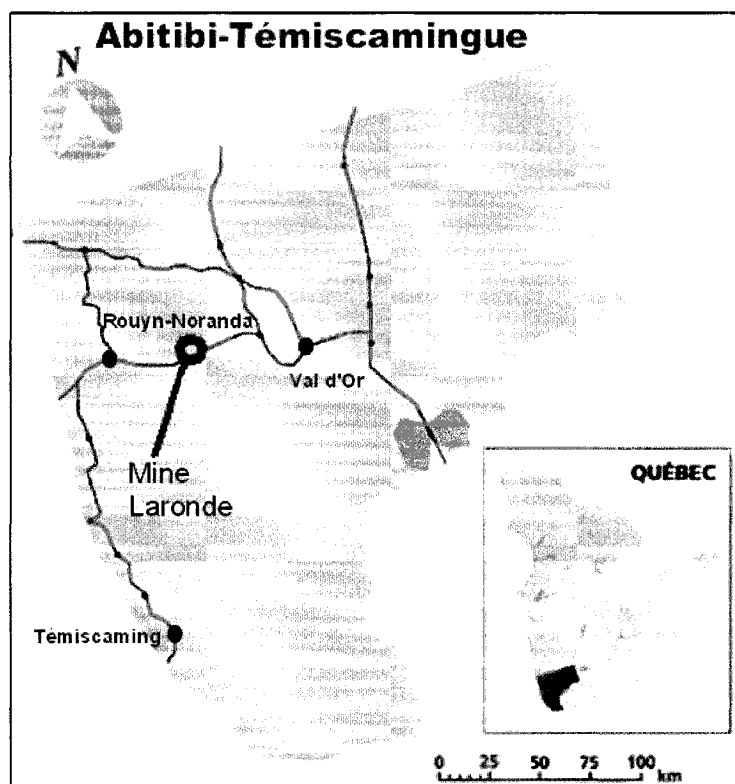


Figure 3.1: Localisation de la mine Laronde en Abitibi Témiscamingue (Québec)

Le gisement de la mine Laronde est de type sulfure massif (cuivre, plomb, zinc), et est exploité principalement pour ses ressources aurifères. C'est le plus important gisement aurifère en activité au Canada en termes de réserves et de ressources et représente un des plus grands dépôts de sulfures massifs archéens riches en or (Aubertin et al., 2002). Les installations de la mine Laronde traitent au-delà de 7 000 tonnes par jour.

Bien que le principal minerai actuellement exploité soit de type sulfure massif, les stériles composant la halde étudiée sont principalement issus de l'ancienne exploitation à ciel ouvert d'une veine de sulfures siliceux située dans un schiste à séricite. Cette minéralisation est composée de 5-7 % de pyrite, de sphalérite et de chalcoppyrite-bornite. La formation encaissante est composée de tuf à lapilli felsique et de tuf felsique avec des inclusions de quartz.

D'un point de vue structural, la halde actuelle couvre une superficie à la base d'environ 50 000 m² et est composée de deux bancs. Vus en plan, les deux bancs sont concentriques et de forme ovale. Le banc supérieur a une épaisseur d'environ 12m et le banc inférieur a une épaisseur d'environ 13 m, pour une hauteur totale d'environ 25 m. Une rampe permet d'accéder au sommet du banc supérieur. L'angle de déposition des stériles est d'environ 37° aux abords des pentes. La morphologie de la halde est présentée sur la photographie suivante (*Figure 3.2*) et sur le modèle numérique de terrain associé (*Figure 3.3*).



Figure 3.2: Photographie de la halde N°1 (Mine Laronde, QC, Canada)



Figure 3.3: Représentation numérique de la morphologie de la halde (données fournies par Agnico-Eagle Ltd). Une ligne de niveau représente une élévation de 1 m.

3.2 Etudes antérieures et axes d'études associés

3.2.1 Généralités

Depuis l'été 2002, différents projets sont réalisées sur la halde N°1 de la mine Laronde. Cette halde potentiellement génératrice de drainage minier acide a fait l'objet de travaux de caractérisation géophysiques (Campos, 2004, Poisson, 2004) et hydrogéologiques (Gamache-Rochette, 2004).

Les premiers travaux géophysiques réalisés sur la halde ont été menés en 2002 par Campos (2004) dans le cadre de ses travaux de maîtrise. Deux campagnes de terrain ont été réalisées en Juillet 2002 et en Octobre 2002 sur une aire géophysique carrée de

30 m de côté située dans la partie Ouest du banc supérieur de la halde. Des mesures ont aussi été effectuées sur une pente du banc supérieur (*Figure 3.4*).

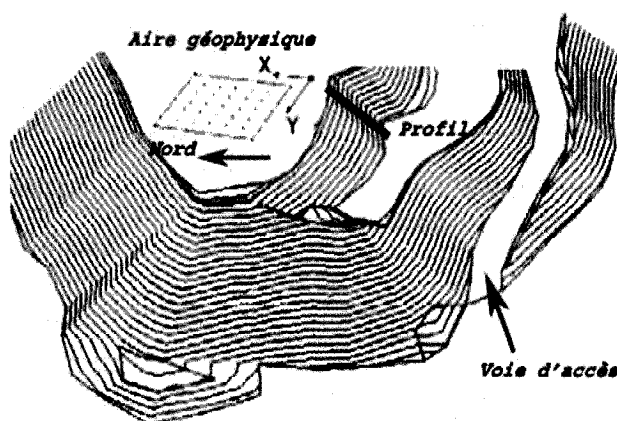


Figure 3.4: Localisation de l'aire géophysique sur la halde de la mine Laronde

Pendant la première campagne de terrain, les méthodes électrique et radar de surface ont été testées sur l'aire géophysique afin d'évaluer le potentiel de ces techniques. Lors de la seconde campagne de terrain, des mesures électrique et radar ont été répétées pour étudier l'évolution temporelle des réponses géophysiques. Une autre série de mesures électrique et radar a été combinée à un essai d'infiltration afin d'étudier la signature géophysique des stériles soumis à des infiltrations d'eau.

A la fin de l'été 2003, d'autres essais géophysiques ont été menés par Poisson (2004) (voir aussi Chouteau et al., 2005) afin de compléter les travaux de Campos (2004) (voir aussi Campos et al., 2003). En plus du radar et de la résistivité électrique, des méthodes électromagnétiques fréquentielles et temporelles (TDEM) ont été utilisées en intégrant les pentes de la halde à l'étude. Un nouvel essai d'infiltration a permis de faire un monitoring de l'écoulement par radar à grand angle et par résistivité électrique en mode « parallèle ».

Parallèlement à ces travaux de caractérisation géophysique, une étude de caractérisation hydrogéologique des roches stériles a eu lieu (Gamache Rochette, 2004). De nombreux échantillons prélevés sur le site pendant l'été 2003 (notamment dans des tranchées) ont

fait l'objet d'essais en laboratoire, afin de déterminer certains paramètres hydrogéologiques des stériles. Par ailleurs, des essais hydrogéologiques in situ ont été effectués dans des bassins et dans des seaux d'infiltration (*Figure 3.5*).

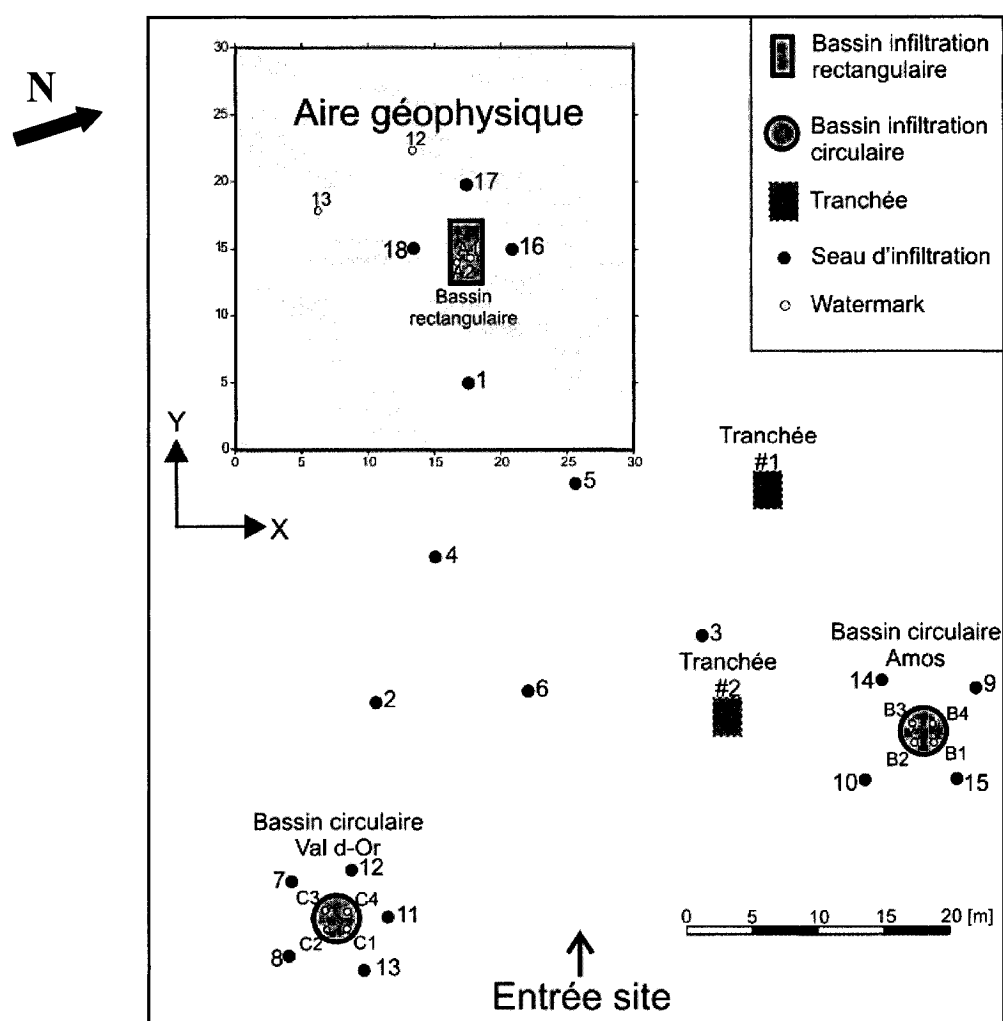


Figure 3.5: Schéma de la zone d'essais sur le sommet de la halde de la mine Laronde (Tiré de Gamache-Rochette, 2004).

3.2.2 Principaux résultats des études antérieures

Les études géophysiques et hydrogéologiques menées depuis 2002 mettent en évidence plusieurs résultats importants pour la caractérisation de la halde à l'étude. Ces résultats donnent des informations sur les propriétés des stériles, sur la structure interne de la halde et sur le potentiel des techniques géophysiques utilisées.

3.2.2.1 Propriétés hydrogéologiques des stériles (tirés de Gamache-Rochette, 2004)

Les travaux menés par Gamache-Rochette (2004) ont été réalisés en laboratoire et sur le terrain lors d'essai d'infiltration in situ.

➤ Résultats des essais en laboratoire

Deux tranchées ont été creusées sur le sommet de la halde respectivement en octobre 2002 (tranchée #1) et en mai 2003 (tranchée #2) (cf. *Figure 3.5*). Chaque tranchée a permis de mettre en évidence une couche de stériles gris d'environ 2 m d'épaisseur au dessus de stériles de couleur ocre. La couleur grise est attribuée à des stériles non oxydés et la couleur ocre à des stériles oxydés avec présence d'hydroxyde de fer.

Dans la tranchée #1, deux échantillons de stérile gris (nommés O1 et O2) et un échantillon de stérile ocre (nommé O3) ont été prélevés. Dans la tranchée #2, un échantillon de chaque couleur a été prélevé (T1=gris; T2=ocre).

Chaque échantillon a fait l'objet d'analyses en laboratoire sur une fraction relativement fine (<5 mm) et sur une fraction plus grossière (5 mm à 20 mm). Ces analyses incluent notamment (Gamache-Rochette, 2004):

- Analyse granulométrique ;
- Pouvoir neutralisant (PN) d'acide;
- Essais de perméabilité.

Les principaux résultats à retenir de ces analyses sont les suivants:

- Les stériles miniers ont une granulométrie très étalée et hétérogène dans le cas où la fraction est limitée à une taille de 10 cm (*Figure 2.6*). La fraction de particules fines est plus importante pour l'échantillon O3 (oxydée) que pour les échantillons O1 et O2.

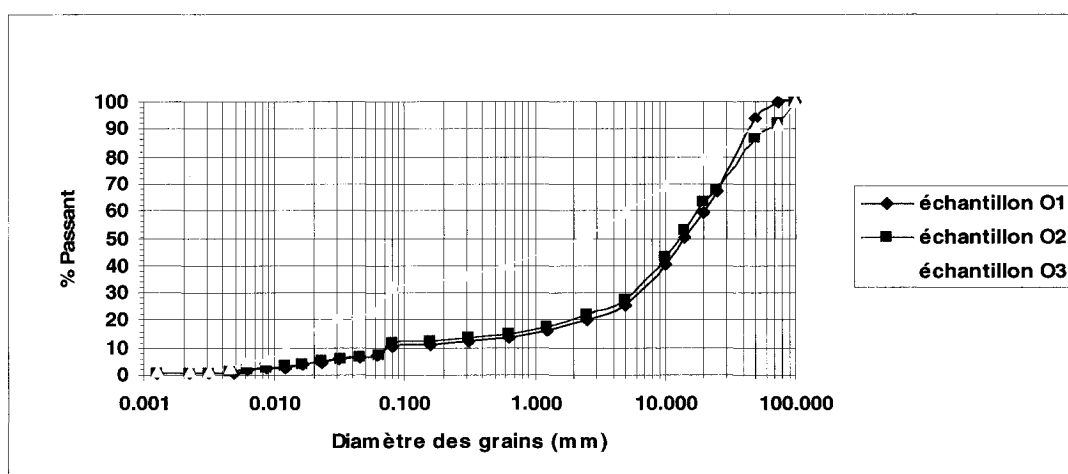


Figure 3.6 : Courbe granulométrique des échantillons O1, O2 (non oxydés) et O3 (oxydé) (Tiré de Poisson (2004), adapté de Gamache-Rochette (2004)); seule la fraction inférieure ≤ 10 cm a été analysée.

- Le potentiel de génération d'acide des différents échantillons (*Tableau 3.1*), indique qu'un échantillon ayant une apparence oxydée a un potentiel de génération d'acide plus important qu'un échantillon non oxydé. De plus, la fraction de particules fines de ces échantillons oxydés semble avoir un potentiel de génération encore plus important. La *figure 3.7* schématise le potentiel de génération d'acide (PNN) des différents échantillons pour les fractions fine (Fin) et grossière (Gros).

Tableau 3.1 : Potentiel de neutralisation net (PNN) pour la fraction fine (<5 mm) et grossière (5-20 mm) des cinq échantillons étudiés. Les échantillons oxydés (O3 et T2) sont présentés en orange. (Tiré de Poisson (2004), adapté de Gamache-Rochette (2004))

	PNN
	kg _{CaCO3} /t
O1 5-20mm	18,91
O1 <5mm	-1,87
O2 5-20mm	-2,84
O2 <5mm	-0,14
O3 5-20mm	-1,21
O3 <5mm	60,63
T1 5-20mm	3,71
T1 <5mm	1,19
T2 5-20mm	82,71
T2 <5mm	102,50

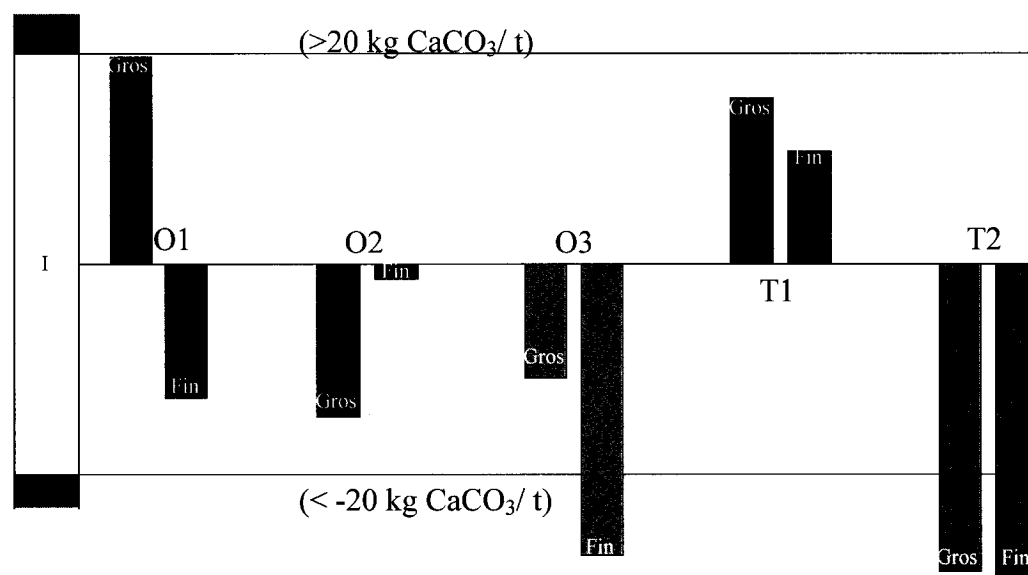


Figure 3.7 : Représentation du potentiel de neutralisation net (PNN) de la fraction fine (Fin) et de la fraction grossière (Gros) des cinq échantillons (adapté de Gamache-Rochette (2004)). NG= Non Générateur, I= zone d'incertitude, G= Générateur

- Des essais de perméabilité réalisés en cellule triaxiale sur la fraction fine de chaque échantillon montrent un lien entre la conductivité hydraulique et la granulométrie. Sur le *tableau 3.2*, il est aussi possible de constater que la conductivité hydraulique saturée est plus faible pour les échantillons oxydés. Ceci peut être expliqué en considérant que le taux d'altération des échantillons oxydés leur confère une fraction fine plus importante (cf. *Figure 3.6*).

Tableau 3.2: Conductivité hydraulique saturée des divers échantillons déterminée par essais de perméabilité en cellule triaxiale. (Tiré de Poisson, 2004; adapté de Gamache-Rochette, 2004). Les échantillons oxydés (O3 et T2) sont présentés en orange.

	O1 (cm/s)	O2 (cm/s)	O3 (cm/s)	T1 (cm/s)	T2 (cm/s)
k_{sat} cellule triaxiale	$1,20 \cdot 10^{-4}$ (n = 0,29)	$2,98 \cdot 10^{-4}$ (n = 0,28)	$1,92 \cdot 10^{-5}$ (n = 0,37)	$4,39 \cdot 10^{-5}$ (n = 0,31)	$3,93 \cdot 10^{-6}$ (n = 0,23)

➤ Résultats des essais d'infiltration

Parallèlement aux analyses des échantillons en laboratoire, des mesures *in situ* ont été menées par Gamache-Rochette (2004). Des essais d'infiltration ont été réalisés à grande échelle dans des bassins d'infiltration (deux bassins circulaires et un bassin rectangulaire) et à petite échelle dans des seaux d'infiltration (cf. *Figure 3.5*). Le principe d'un essai d'infiltration est de laisser percoler dans le sol un débit d'eau connu et de mesurer le taux d'infiltration (I) associé. Le taux d'infiltration représente le volume d'eau qui s'infiltre dans la halde divisé par la surface d'infiltration et par l'intervalle de temps ($[L]^3/[L]^2 \cdot [T] = [L]/[T]$). Le taux d'infiltration a été relié à la conductivité hydraulique saturée à l'aide de modèles d'infiltration. Gamache-Rochette (2004) a utilisée le modèle analytique de Philip (1957) qui pose comme conditions de départ que l'essai d'infiltration s'effectue verticalement (1D) dans un sol homogène

dont la teneur en eau initiale est uniforme et connue (Dingman, 1994). La conductivité hydraulique K_p à l'aplomb du bassin rectangulaire a ainsi été estimée à $3,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s (moyenne sur 5 essais, la plus faible valeur étant $1,1 \cdot 10^{-4}$ cm/s, et la plus forte $1,3 \cdot 10^{-2}$ cm/s; (Fala et al., 2003) ; ces valeurs sont toutefois surestimées à cause des hypothèses restrictives du modèle de Philip, notamment celle qui suppose que l'écoulement est uniquement vertical.

Les essais d'infiltration ont par ailleurs permis de mettre en lumière différents résultats importants:

- Le niveau de compaction (densité) des matériaux, leur granulométrie ainsi que la teneur en eau initiale du sol semblent être des facteurs déterminants quant à la valeur du taux d'infiltration de l'eau dans les matériaux de la halde à stériles.
- Les taux d'infiltration sont plus faibles dans les zones où la compaction est plus importante. De plus, la présence de chemins d'écoulement préférentiel à certains endroits, associés à la présence de pores de grande dimension, semble jouer un rôle considérable dans la valeur locale du taux d'infiltration.

3.2.2.2 Mesures géophysiques (tiré de Campos, 2004 et Poisson, 2004).

Les mesures géophysiques issues des travaux de Campos (2004) et Poisson (2004) donnent diverses informations structurales importantes:

- Il existerait une stratification sub-horizontale dans l'aire géophysique marquée par une couche superficielle résistive d'environ 2 m d'épaisseur. Cette couche semble correspondre à la présence de matériaux grossiers non oxydés qui ont été mis en évidence dans les tranchées (cf. § 3.2.2.1). De plus, de nombreuses hétérogénéités marquées par des variations latérales de résistivité ont été observées. La *figure 3.8* présente la réponse électrique 3D de l'aire géophysique. Elle met en évidence la couche superficielle résistive ainsi que des variations latérales de résistivité dans cette couche.

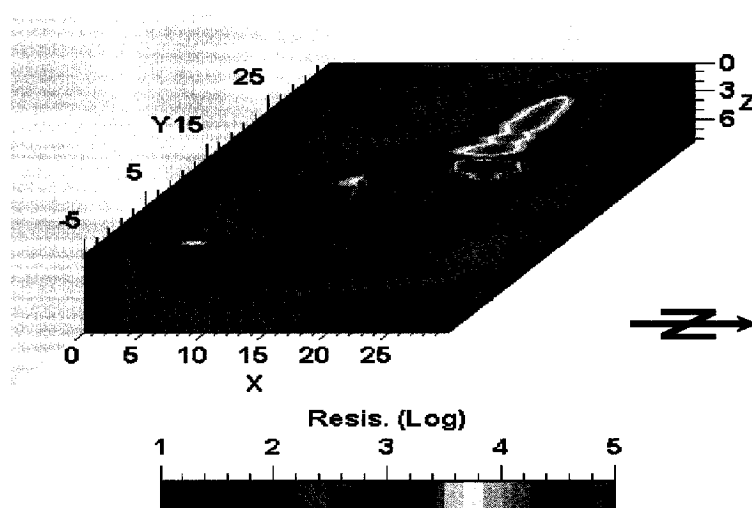


Figure 3.8 : Distribution 3D de la résistivité électrique dans l'aire géophysique mettant en évidence une couche superficielle résistive (0-2 m) ainsi que des variations latérales de résistivité (tiré de Campos, 2004).

- Il existe une corrélation entre les réponses électrique et électromagnétique des stériles. La *figure 3.9* illustre cette information à partir d'une coupe 2D (profil X20 de l'aire géophysique). La couche superficielle mise en évidence avec la méthode électrique (*Figure 3.8* et *Figure 3.9 a*) apparaît sous la forme de réflecteurs sub-horizontaux sur le profil radar (*Figure 3.9 b*). Les contrastes latéraux de résistivité détectés par la méthode électrique (*Figure 3.9 a*) et par les systèmes dipolaires fréquentiels (*Figure 3.9 c*) ont aussi une réponse radar significative. Les zones les plus résistives, associées à des stériles grossiers et/ou peu oxydés (cf. point précédent), présentent en général de fortes réflexions et des hyperboles de diffractions (*Figure 3.9 b*). Poisson (2004) explique ce type de signature par le fait qu'un milieu hétérogène atténue faiblement le signal radar du fait de sa faible capacité de rétention d'eau. Inversement, les zones où le signal radar est atténué à surface correspondent à des zones moins résistives. Celles-ci sont associées à des stériles plus fins et/ou plus oxydés avec une capacité de rétention d'eau probablement plus importante.

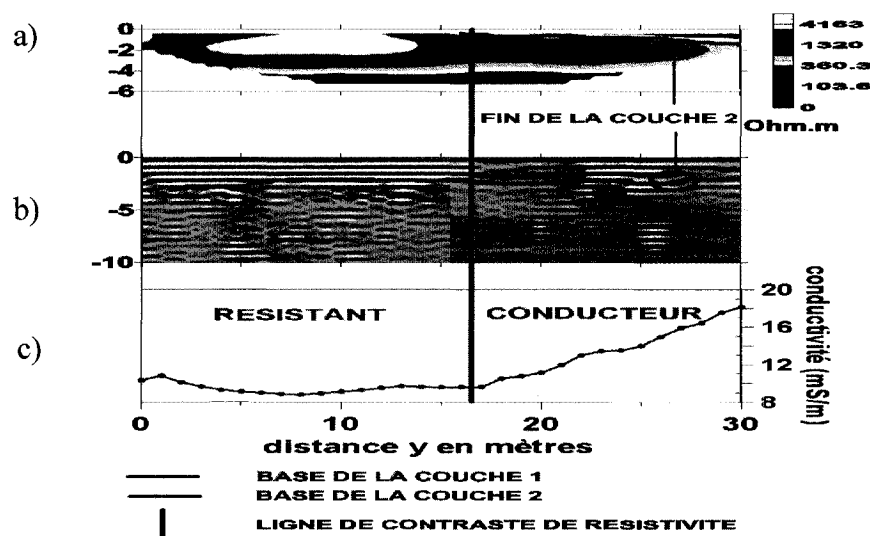


Figure 3.9 : Corrélation des méthodes géophysiques mettant en évidence des variations latérales dans la couche superficielle ; a) résistivité électrique ; b) radar ; c) E.M (profil X20, Tiré de Poisson, 2004).

- Des chemins d'écoulements préférentiels ont été détectés dans la partie Nord de l'aire géophysique (Figure 3.10). Ils ont été mis en évidence grâce aux variations de résistivité mesurées avant (ρ_{avant}) et après ($\rho_{\text{après}}$) un essai d'infiltration dans le bassin rectangulaire (cf. Figure 3.5). D'après Campos (2004), les zones les plus résistives (faible capacité de rétention d'eau), semblent être corrélées aux zones d'écoulement préférentiel.

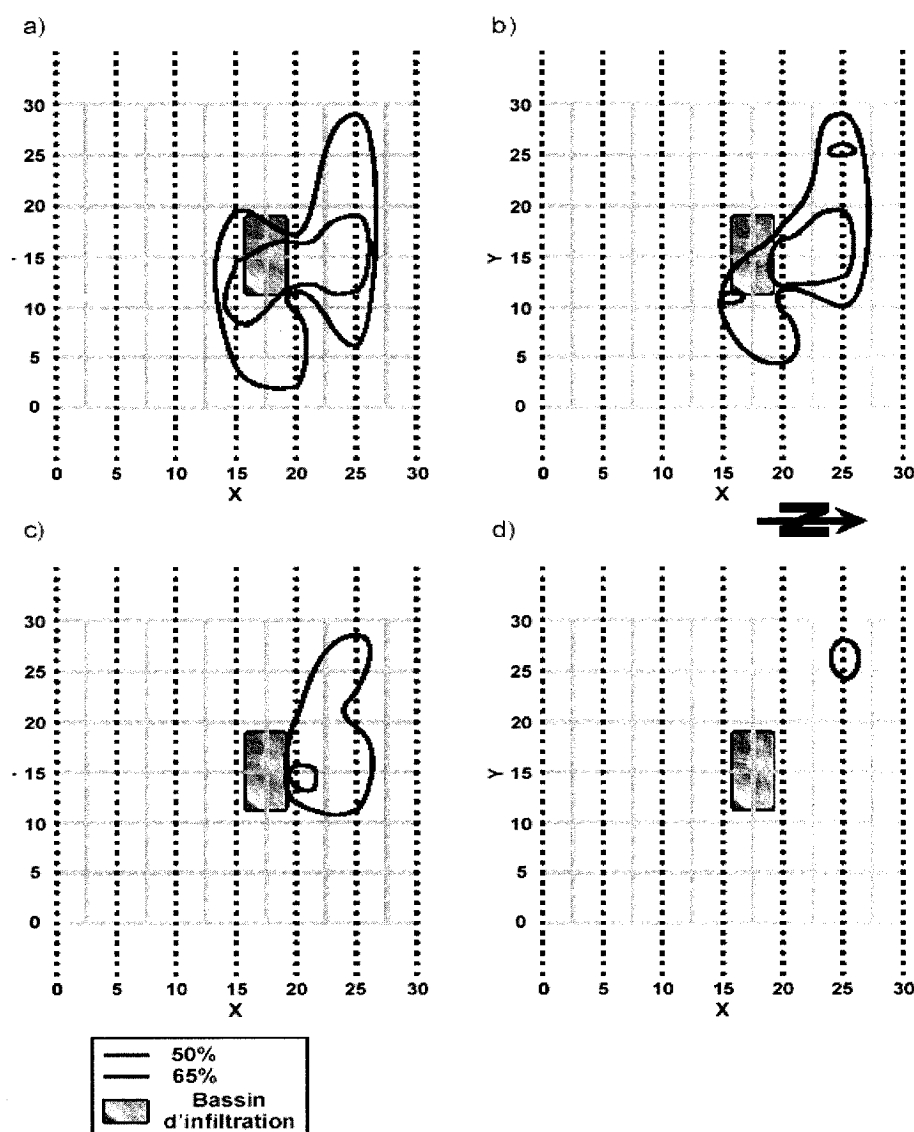


Figure 3.10 : Iso-contours des rapports des résistivités ($\rho_{\text{avant}} / \rho_{\text{après}}$) en fonction de la profondeur ; a) surface, b) 1 m, c) 2 m, d) 3 m. (Tiré de Campos, 2004)

- Les mesures électriques réalisées dans une pente du banc supérieur de la halde (cf. *Figure 3.4*) montrent une augmentation de la résistivité du haut vers le bas de la pente (*Figure 3.11*). Poisson (2004) attribue cette distribution de la résistivité électrique au mode de déposition par déversement en crête (cf. § 1.3.2) qui induisent une ségrégation granulométrique des stériles (cf. *Figure 1.5*). La zone résistive observée en pied de pente est associée aux stériles les plus grossiers ayant roulé à la base du banc. Ces stériles grossiers sont peu/pas compactés et ont une faible capacité de rétention d'eau. La résistivité électrique diminue vers le haut de la pente, témoignant d'une densité plus élevée et/ou d'une granulométrie plus fines.

A noter ici que la profondeur d'investigation est limitée (environ 2 m pour une pente d'environ 15 m de long et un espacement inter-électrodes de 0.5 m). La fine couche superficielle conductrice (en bleu) pourrait être attribuée à une oxydation superficielle (Poisson, 2004) ou à la présence d'humidité.

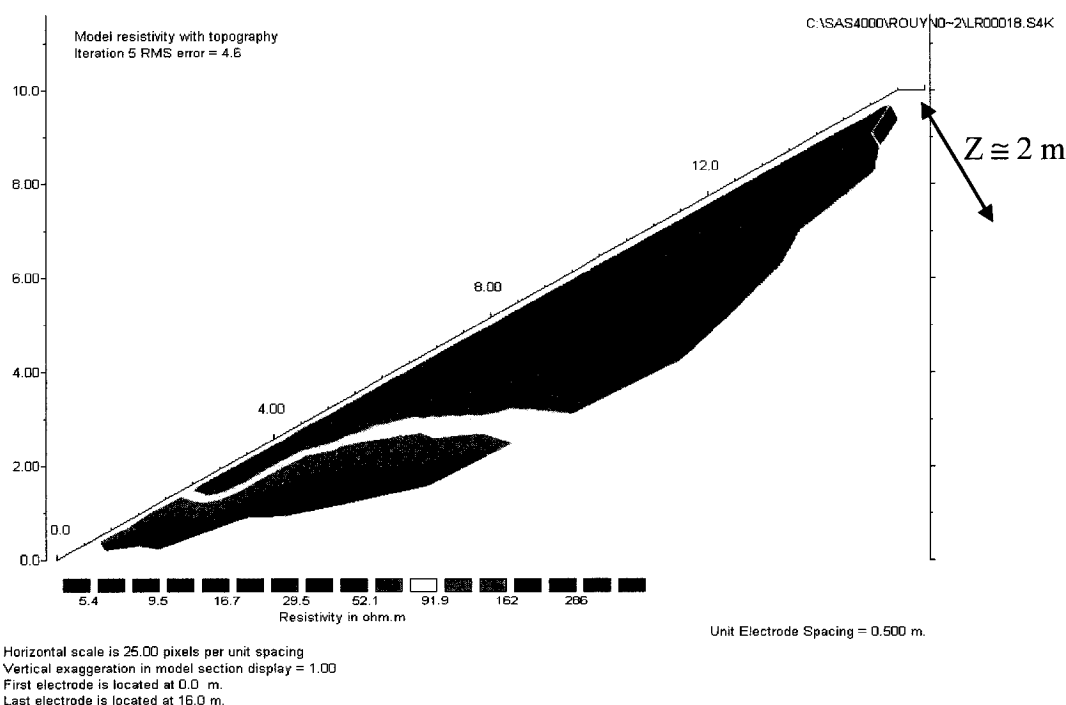


Figure 3.11 : Distribution de la résistivité dans la pente du banc supérieur de la halde (configuration d'électrode en mode Wenner, cf. § 2.1.3. ; tiré de Poisson, 2004).

- Différentes sections radar ont également été réalisées dans la pente. D'après Poisson (2004), une fréquence d'émission de 200 MHz offre un compromis optimal entre résolution et profondeur d'investigation. La *figure 3.12* présente une section radar réalisée pour cette fréquence d'émission. Des interfaces stratiformes (en rouge) et des réflecteurs en discordance (en pointillés) peuvent être observés. Ces signatures sont aussi attribuées au mode de déposition par déversement en crête (cf. § 1.3.2) qui induit d'une part des stratifications obliques subparallèles à la pente et des superpositions successives de couches.

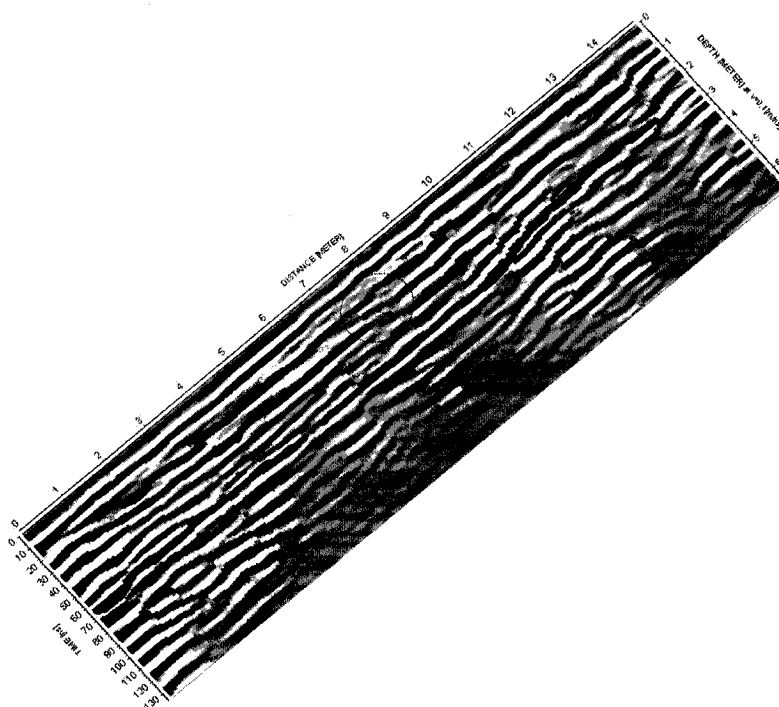


Figure 3.12: Section radar réalisée dans la pente du banc supérieur de la halde avec une antenne de 200 MHz. Des stratifications obliques (rouge) et des réflecteurs en discordances (pointillés) sont mis en évidence (Tiré de Poisson, 2004).

- D'autres résultats moins probants ont été obtenus dans l'aire géophysique et dans la pente du banc supérieur. Les techniques TDEM et le monitoring d'infiltration avec le radar géologique peuvent notamment être cités. Pour plus de détails sur ces résultats, voir Poisson (2004) et Campos (2004).

3.2.3 Axes d'étude

Les différents résultats présentés dans le paragraphe précédent ont montré le potentiel de certaines méthodes de caractérisation hydrogéologique (Gamache-Rochette, 2004) et géophysiques (Campos, 2004, Poisson, 2004) pour le cas des haldes à stériles. Ces résultats représentent d'une part une base solide d'informations et mettent d'autre part en lumière de nouvelles perspectives d'études. Dans le présent projet, qui s'attache principalement à la caractérisation par méthodes géophysiques, les différents axes d'études abordés s'inspirent et s'inscrivent dans la continuité des travaux et des recommandations des études antérieures. Les principaux axes de recherche développés dans la présente étude sont cités ci-dessous. Chaque axe de recherche est associé aux justifications ayant motivé la mise en oeuvre de nouveaux travaux de terrain.

- ÉLARGISSEMENT DE LA ZONE D'INVESTIGATION

Hormis quelques investigations dans une pente de la halde, toutes les mesures préalables ont été réalisées dans une aire de 30 m de côté. Pour caractériser un milieu aussi complexe et hétérogène que celui d'une halde à stériles, il semble hasardeux d'extrapoler les résultats obtenus sur l'aire géophysique à toute la structure de la halde, d'autant que les informations structurales sont inexistantes au delà de 6 m de profondeur. Une étude de plus grande envergure s'impose donc dans les trois dimensions de l'espace.

- PRIORISER LA MÉTHODE ÉLECTRIQUE

La méthode électrique a été utilisée avec succès tant pour la caractérisation structurale que pour le monitoring d'infiltration. Cette technique apparaît comme un outil de caractérisation robuste et performant permettant d'obtenir une information rapide sur la structure interne de la halde tout en donnant accès à des informations hydrogéologiques (variation de teneur en eau et/ou granulométrie et/ou niveau d'oxydation). La profondeur d'investigation de cette méthode étant

principalement fonction de l'écartement inter-électrodes, il semble possible d'investiguer la halde en profondeur en choisissant une configuration d'électrode adéquate. Des méthodes électromagnétiques seront aussi utilisées afin d'apporter un poids supplémentaire aux mesures électriques.

- **ÉTUDIER L'INFLUENCE DES PENTES**

Les essais d'infiltrations réalisés sur le sommet de la halde ont permis de mettre en évidence des taux d'infiltration variables et des variations de résistivité électrique significatives. L'évolution de ces paramètres est liée à la présence de chemins d'écoulements préférentiels. Comme le sommet de la halde, les pentes représentent des zones privilégiées d'interaction entre les stériles, l'oxygène et l'eau. Il est donc nécessaire d'étudier l'effet des pentes sur l'écoulement d'eau. Ceci doit permettre de mieux caractériser la structure des pentes et les phénomènes hydrogéologiques associés.

- **MESURES EN FORAGES**

Toutes les études précédentes ont recommandées l'implantation de forages sur la halde. Pendant l'été 2004, huit trous ont été forés et un tubage crépiné a été mis en place. Les échantillons prélevés dans ces forages (carottes) et des mesures géophysiques visent à étudier les structures internes et à caractériser les stériles superficiels comme ceux situés au cœur de la halde.

- **TRAVAUX CONNEXES**

Les travaux précédents ont montrés que la caractérisation des haldes à stériles est une tâche pluridisciplinaire qui nécessite le couplage et l'intégration de données hydrogéologiques, géophysiques, géotechniques et géochimiques. Bien que principalement basée sur l'aspect géophysique, cette étude s'attachera à tisser des liens avec les informations issues des autres champs d'expertise. La mise en place de nouvelles tranchées doit ainsi permettre une évaluation structurale *de visu* et l'analyse de nouveaux échantillons.

CHAPITRE 4. MESURES GÉOPHYSIQUE DE TERRAIN

4.1 Introduction

A la fin de l'été 2004, huit forages ont été réalisés dans la partie ouest de la halde N°1 de la mine Laronde. Sébastien Vallières¹ a réalisé quelques campagnes de mesures géophysiques dans ces forages. Les principaux résultats obtenus ont été traités par Camille Dubreuil-Boisclair² avec l'aide de Erwan Gloaguen, lors d'un stage et d'un projet de fin d'étude réalisés entre décembre 2004 et juillet 2005.

Plus tard, trois campagnes de terrain ont été menées pendant l'été 2005 en s'appuyant sur les axes d'étude présentés dans le chapitre précédent (cf. § 3.2.3). Les résultats qui vont être présentés dans cette étude ont été obtenus pendant ces trois campagnes de terrain. Ils seront complétés par les résultats des mesures en forage mentionnés ci-dessus.

4.2 Dispositifs d'acquisition utilisés

Afin de réaliser les mesures géophysiques sur le terrain, différents appareils ont été utilisés. Le présent paragraphe décrit les principales caractéristiques des dispositifs électriques et électromagnétiques utilisés.

4.2.1 Méthode électrique

Le dispositif utilisé pour toutes les mesures électriques réalisées dans cette étude est un Lund Imaging System développé par la compagnie suédoise ABEM Instrument.

Ce dispositif est composé d'un module principal appelé "Terrameter SAS4000", couplé à un sélectionneur d'électrodes appelé "LUND ES 1064". Des câbles (flûtes)

¹ Etudiant en génie Minéral, candidat au doctorat à l'Ecole Polytechnique de Montréal (2004).

² Etudiante au bac en génie géologique à l'Ecole Polytechnique de Montréal.

électriques possédant chacun vingt-et-une (21) sorties assurent la connexion du LUND ES 1064 aux électrodes plantées dans le sol. La *figure 4.1* présente les principales composantes du Lund Imaging System.

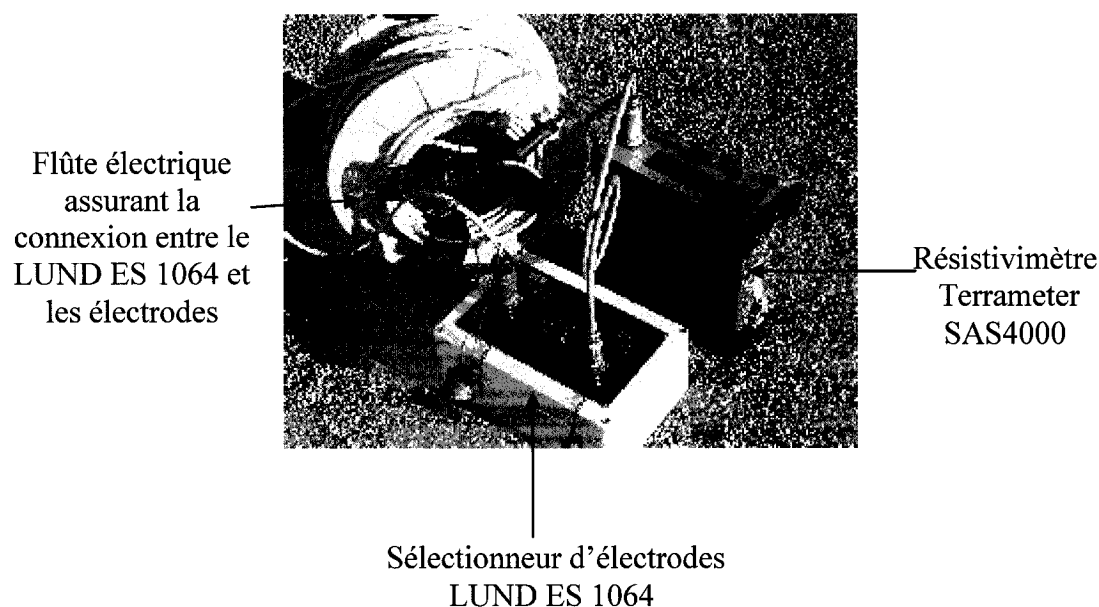


Figure 4.1 : Dispositif électrique utilisé lors des mesures de terrain.

Le Terrameter SAS4000 est un résistivimètre qui possède une interface graphique permettant à l'utilisateur de choisir les paramètres d'acquisition souhaités et de visualiser en temps réel les valeurs de résistivité apparente mesurées. Différents protocoles correspondant à différentes configurations d'électrodes (cf. § 2.1.3.1) sont enregistrés dans la mémoire de l'appareil. Suivant le protocole choisi par l'utilisateur, le LUND ES 1064 va successivement sélectionner des quadripôles d'électrodes et mesurer la résistivité apparente pour les points correspondant à toutes les combinaisons possibles.

Les données acquises sont stockées dans la mémoire interne du Terrameter SAS4000 dans un fichier convertible en format .dat. Ce type de fichier est exploitable par le logiciel d'inversion RES2DINV (Loke, 2002) (cf. § 2.1.4.1).

4.2.2 Méthodes électromagnétiques

4.2.2.1 Radar géologique

Dans cette étude, le radar géologique utilisé est fabriqué par la compagnie suédoise Mala Geosciences. Il est composé d'une unité de contrôle appelée RAMAC/CU II qui communique avec un jeu d'antennes via des fibres optiques. L'unité de contrôle et les antennes possèdent des batteries rechargeables offrant à l'utilisateur une autonomie d'une demi-journée environ. L'unité de contrôle est connectée à un ordinateur portable permettant d'enregistrer et de visualiser les traces acquises en temps réel. La *figure 4.2* présente l'unité de contrôle (1) ainsi que les antennes utilisées pour les mesures de surface (2) et pour les mesures en trous de forage (3). Les deux types d'antennes utilisées ont une fréquence d'émission de 100 MHz. Les fibres optiques permettant la connexion entre l'unité de contrôle et les antennes ne sont pas présentées sur la *figure 4.2*.

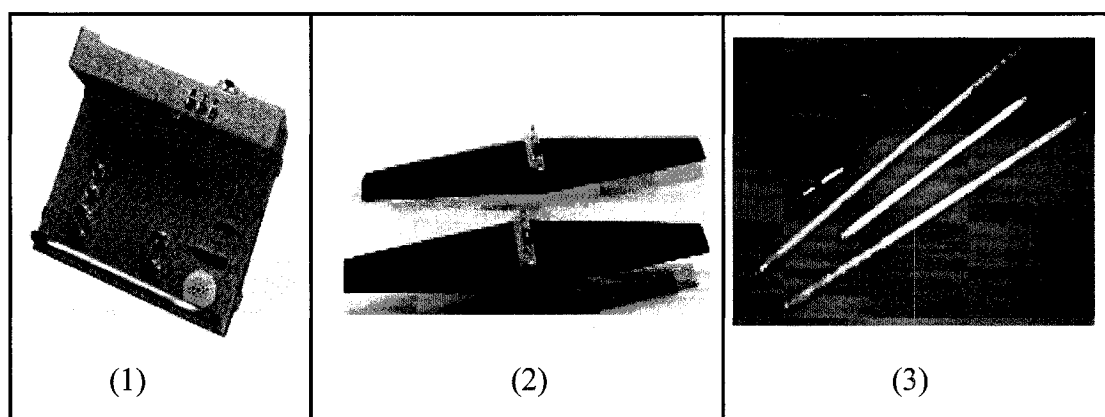


Figure 4.2 : Principales composantes du système radar utilisé - (1) Unité de contrôle RAMAC/CU II - (2) Antennes adaptées aux mesures de surface - (3) Antennes adaptées aux mesures en forage (longueur : 1.35 m, diamètre : 45 mm).

4.2.2.2 Systèmes dipolaires fréquentiels

Le système dipolaire fréquentiel EM31 utilisé est développé par la compagnie canadienne Geonics Ltd pour les mesures de surface. Le EM31 est un conductivimètre composé de deux bobines espacées d'une distance fixe de 3.66 m et d'une unité de contrôle appelée le data Logger. Le EM31 est généralement porté par l'utilisateur à l'aide d'une bandoulière à environ 1 m au dessus de la surface du sol (*Figure 4.3*).

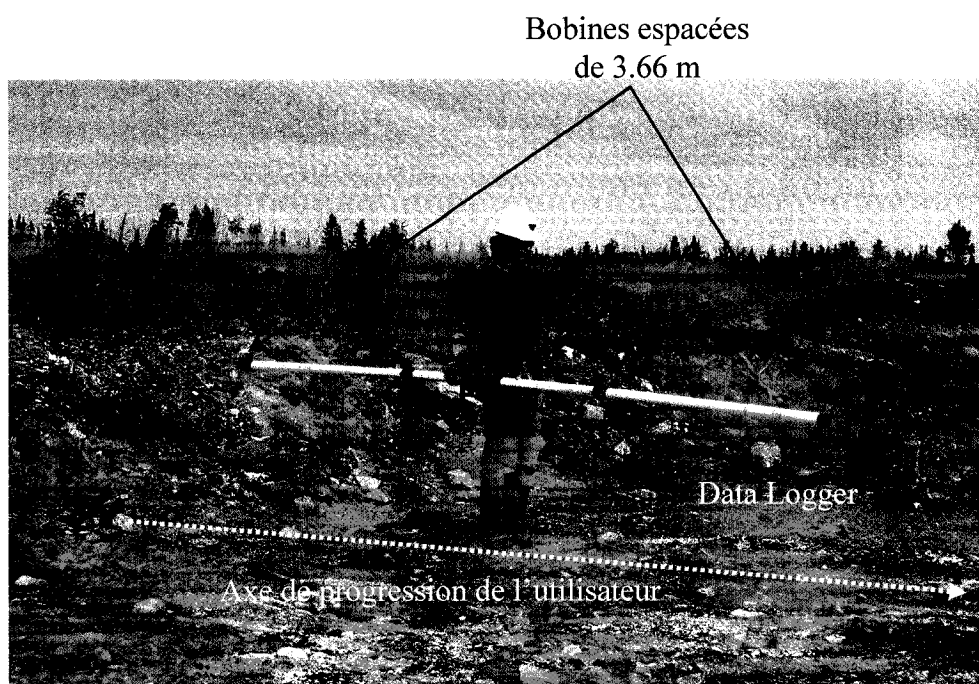


Figure 4.3 : Dispositif EM31 en cours d'utilisation en mode vertical sur la halde.

La prise de mesures est effectuée par l'utilisateur à l'aide d'un bouton situé sur le montant de l'appareil. Chaque fois que l'utilisateur presse ce bouton, une mesure est déclenchée. Suivant le nombre de sommations choisi, cette mesure sera automatiquement répétée par le EM31, permettant d'augmenter le rapport signal/bruit. En fonction de la profondeur d'investigation souhaitée, l'appareil peut être utilisé de telle manière que le dipôle magnétique soit horizontal ou vertical (cf. § 2.2.2.2) en

tournant le dispositif de 90° autour de l'axe longitudinal du dispositif. En mode horizontal, la conductivité mesurée par l'appareil intègre les conductivités du sous-sol entre 0-3 m. En mode vertical, l'appareil intègre les conductivités du sous-sol entre 0-6 m.

Les mesures de conductivité en trou de forage ont toutes été réalisées à l'aide du conductivimètre EM39 de Geonics Ltd. Des composantes peuvent être fixées à l'appareil afin de mesurer la susceptibilité magnétique ainsi que les radiations gamma. Les principales spécifications techniques du EM39 sont résumées dans le *tableau 4.1*:

Tableau 4.1 : Spécifications techniques du EM39 de Geonics Ltd. (Tiré du manuel d'instructions de l'appareil)

Spécifications techniques du EM39	
UNITÉ DE MESURE	CONDUCTIVITÉ APPARENTE EN mS/m
ESPACEMENT ENTRE TX ET RX	50 CM
FRÉQUENCE D'OPÉRATION	39,2 KHz
GAMME DE CONDUCTIVITÉ	0 – 30, 100, 300, 1000, 3000 mS/m
PROFONDEUR MAXIMALE	200 MÈTRES
PRÉCISION DES MESURES	2% DE L'ÉCHELLE COMPLÈTE
EXACTITUDE DES MESURES	5% À 30 mS/m
NIVEAU DE BRUIT	0,5 mS/m

4.3 Implantation des profils géophysiques et paramètres d'acquisition associés

Les différents axes d'étude dégagés dans le paragraphe 3.2.3 sont basés sur trois zones principales d'investigation, soit la surface du banc supérieur, les pentes, et les trous de forage.

La première zone d'investigation géophysique correspond à la surface du banc supérieur de la halde. Afin de couvrir cette surface, une grille de mesures électriques a été définie (Figure 4.4). Cette grille est formée de quatre grands profils longitudinaux (L1 à L4) et de huit profils transverses (T1 à T8). La halde ayant une forme ovale (en plan), l'implantation des profils a été définie afin de couvrir une superficie maximale. Les profils longitudinaux ont été déployés en éventail et les profils transverses, espacés de 20 m, sont parallèles entre eux et leur longueur augmente du S-W vers le N-E. La grille de mesures électriques est donc non uniformément structurée du fait de la géométrie et de la topographie de la halde.

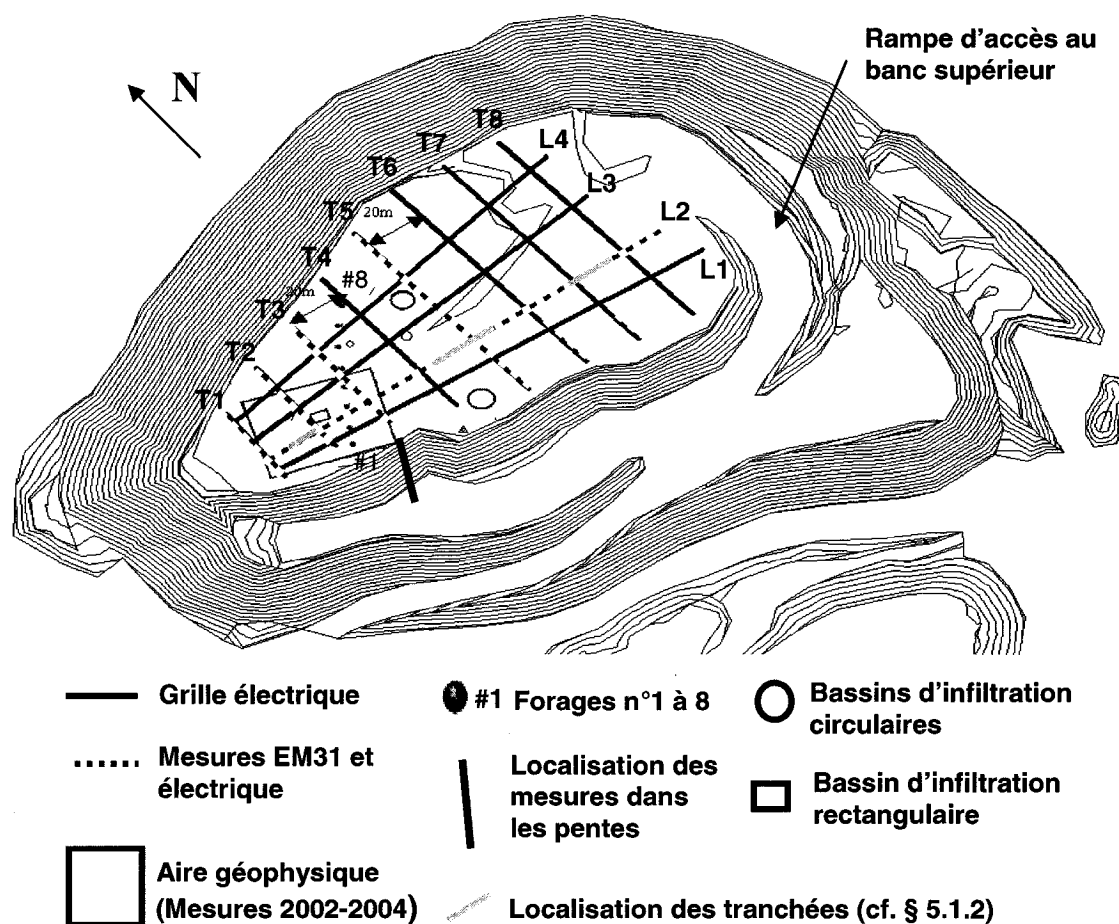


Figure 4.4 : Localisation des mesures géophysiques de terrain sur la halde N°1 de la mine Laronde.

La longueur des différents profils est présentée dans le *tableau 4.2*.

Tableau 4.2 : Longueur des différents profils électriques déployés sur le sommet du banc supérieur de la halde.

Identification	L1	L2	L3	L4	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Longueur (en m)	160	160	160	150	26	36	44	56	68	68	68	68

Les mesures ont toutes été réalisées avec un espacement inter-électrodes de 2 m. Toutes les mesures ont été faite en configuration dipôle-dipôle avec deux câbles de vingt-et-une (21) sorties espacées de 2 m chacune. Afin de relier les deux câbles entre eux, le dispositif d'acquisition est placé au milieu du profil et l'électrode n°21 est connectée aux deux câbles. Dans ces conditions, la longueur maximale d'un profil électrique est donc de 80 m, soit 41 électrodes espacées de 2 m. Les profils transverses ont pu être réalisés en une seule acquisition car ils ont tous une longueur inférieure à 80 m. Pour les profils longitudinaux, la technique du *roll-along* a été utilisée. Cette technique consiste à réaliser une première série de mesures de résistivité apparente sur une longueur de 80 m et de translater le dispositif latéralement. Pour ce faire, le câble auquel sont initialement connectées les électrodes 1 à 21 est utilisé comme second câble (électrodes 42 à 63). Le câble auquel sont connectées les électrodes 21 à 42 est alors considéré comme le premier câble. Lors d'un roll-along, le nombre de mesures réalisées après la translation du dispositif est inférieur au nombre de mesures enregistrées lors de la première acquisition puisque certaines combinaisons d'électrodes ont déjà été réalisées par l'appareil. Le Lund Imaging System (cf. § 4.2.1) permet d'éviter cette redondance en ne sélectionnant que les nouvelles combinaisons de quadripôles. Ceci permet d'accélérer la prise de mesures. La *figure 4.5* schématise le principe de l'acquisition en mode roll-along. Pour chaque profil longitudinal, deux roll-along successifs ont été réalisés.

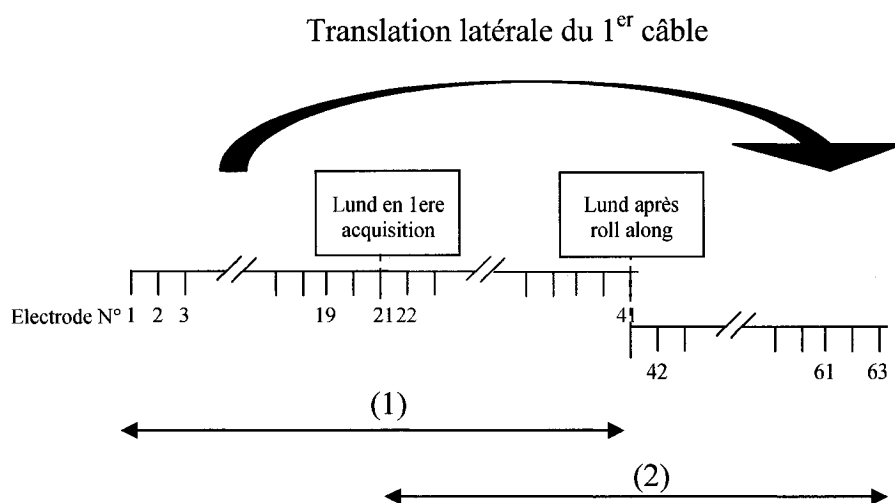


Figure 4.5: (1) - Acquisition classique et (2) - acquisition en roll-along.

Des mesures complémentaires ont aussi été menées sur le sommet de la halde sur des profils colinéaires à certains profils électriques. D'une part, le profil L2 a également été investigué par ERT avec un espacement inter-électrodes de 4 m afin d'évaluer la réponse électrique pour une profondeur d'investigation plus importante. Par ailleurs, le EM31 a été utilisé afin d'étudier la variation de la conductivité à l'approche des pentes et pour corroborer les résultats des mesures électriques, notamment selon le profil L2 (Figure 4.4). Tous les profils acquis avec le EM31 ont été réalisés en mode vertical. Le pas d'échantillonnage choisi est de 1 m avec 10 sommations par point de mesure. Ces paramètres ont été choisis afin d'obtenir un compromis entre le rendement et la résolution. Le *tableau 4.3* résume les mesures réalisées à la surface du banc supérieur et les paramètres d'acquisition associés.

Tableau 4.3 : Mesures réalisées à la surface du banc supérieur et paramètres d'acquisition associés.

	Mesures réalisées	Paramètres d'acquisition
Electrique	• L1 à L4 et T1 à T8 • L2_{4m}	• Configuration dipôle-dipôle • $\Delta x = 2$ m pour tous les profils sauf pour L2 ($\Delta x = 2$ m et 4 m)
E.M	• L2 • Abords des pentes pour T1, T2, T3, T5, T6, T7	• Mode vertical • $\Delta x = 1$ m (pas) • 10 sommations

La seconde zone d'investigation géophysique est localisée sur le versant sud du banc supérieur. Les stériles déposés dans les pentes ont un angle de déposition d'environ 37°, rendant les investigations difficiles. Des échelles installées pour les mesures de Poisson (2004) ont été réutilisées dans cette étude. Sur la *figure 4.4*, le segment noir au sud du banc supérieur schématise la zone dans laquelle se trouvent les échelles. La disposition des échelles a permis de réaliser des mesures électriques et électromagnétiques dans cette zone de façon sécuritaire. Pour étudier la distribution de la résistivité des stériles dans les pentes, trois profils parallèles couvrant la longueur de la pente (~ 15 m) ont été déployés (P1 à P3). Les profils sont espacés d'environ 2 m. Chaque profil a d'abord fait l'objet d'une investigation électrique en configuration dipôle-dipôle avec deux câbles et un espacement inter-électrodes de 0.5 m.

Un test d'infiltration d'eau d'une durée de 1h30 a ensuite été réalisé à l'aide d'un tuyau perforé placé le long du profil P2. Afin d'étudier l'influence de l'infiltration d'eau sur la signature électrique des stériles dans les pentes, les mesures électriques ont été répétées selon P2 avec les mêmes paramètres d'acquisition.

Le profil P3 a également fait l'objet de mesures radar et de mesures avec le EM31 afin de les comparer avec les mesures électriques. Les mesures radar ont été réalisées avec le dispositif RAMAC et des antennes de surface de 100 MHz (cf. § 4.2.2.1) avec un pas d'échantillonnage de 10 cm et 64 sommations. Les mesures EM31 ont été réalisées

en mode vertical et en mode horizontal avec un pas d'échantillonnage de 50 cm et 10 sommations. La *figure 4.6* illustre l'implantation des différents profils géophysiques réalisées dans les pentes.

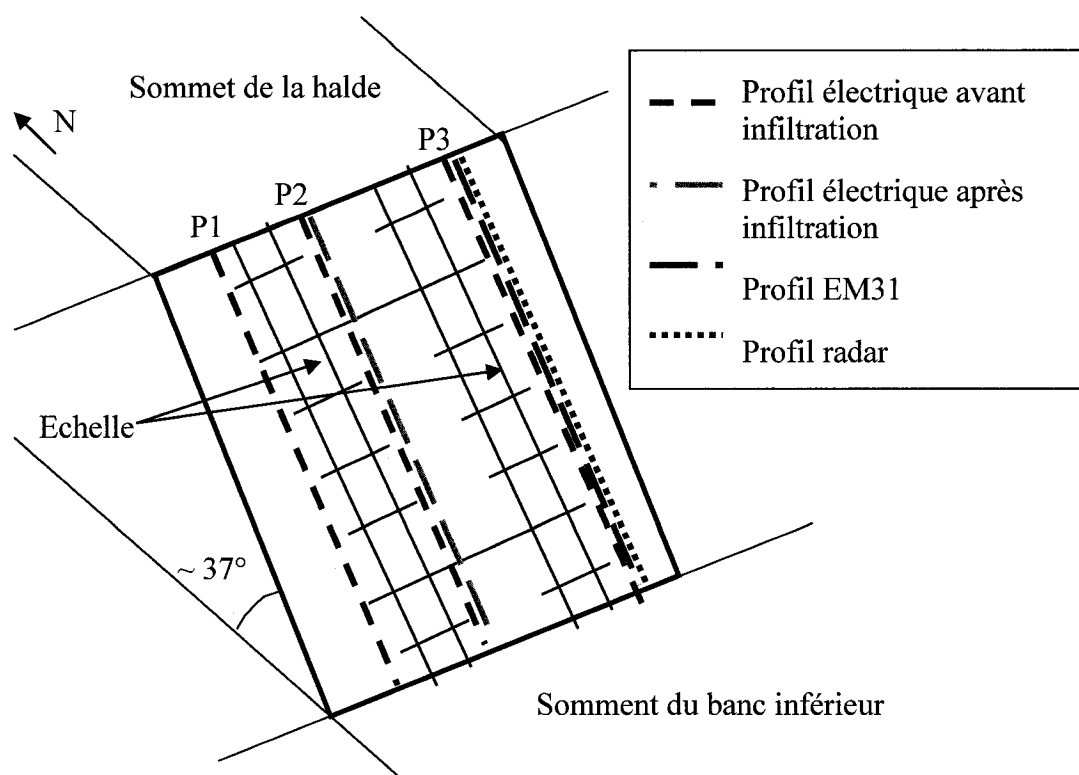


Figure 4.6 : Implantation des profils de mesure sur le versant sud du banc supérieur.

Le *tableau 4.4* résume les mesures réalisées dans les pentes et les paramètres d'acquisition associés. Les indices S (sec) et H (humide) sont utilisés pour indiquer que les mesures ont été respectivement réalisées avant et juste après le test d'infiltration d'eau.

Tableau 4.4 : Mesures réalisées sur le versant sud du banc supérieur de la halde et paramètres d'acquisition associés.

	Mesures réalisées	Paramètres d'acquisition
Electrique	• P1_S, P2_S, P3_S • P2_H	• Configuration dipôle-dipôle • $\Delta x = 0.5$ m
Radar	• P3_S	• Antenne 100 MHz • $\Delta x = 0.1$ m • 64 sommations
E.M	• P3_S	• Mode horizontal • $\Delta x = 0.5$ m • 10 sommations

La troisième zone d'investigation géophysique correspond aux forages. Les huit forages ont été implantés dans la partie Est de l'aire géophysique (cf. *Figure 4.4*) afin d'apporter des informations complémentaires aux études antérieures menées dans cette portion de la halde (cf. § 3.2). Les forages sont de types NQ (diamètre du trou =75.8 mm, diamètre intérieur du tubage=48 mm). Ils sont espacés d'environ 7.5 m et ont été implantés selon un axe SW-NE afin de réaliser des sections bidimensionnelles. Les trous ont été réalisés selon une technique particulière de forage au diamant permettant d'installer un tubage en PVC perforé pendant le forage. Cette technique est appelée « Morissette Drilling ». Les forages ont été numérotés de 1 à 8 du SW vers le NE. Les forages 1 à 7 ont été arrêtés quand le sol naturel a été atteint, soit pour une profondeur d'environ 24 m. Pour des raisons d'instabilité sur le versant Nord de la halde, le forage 8 n'a été creusé que jusqu'à une profondeur d'environ 5 m.

Dans un premier temps, des mesures en forage ont été réalisées avec le EM39 (cf. § 4.2.2.2) afin de déterminer les variations de conductivité le long de chaque trou. Le pas d'échantillonnage choisi était de 25 cm. Des mesures de radar en forage ont ensuite été réalisées en configuration « entre trous » (cf. § 2.2.1.4) afin d'étudier la distribution des vitesses et d'obtenir une estimation de la conductivité électrique entre les forages.

Toutes les mesures ont été acquises avec le dispositif RAMAC/CU II avec des antennes de 100 MHz adaptées aux mesures en forage. Le pas d'échantillonnage choisi était de 25 cm. Le *tableau 4.5* synthétise les mesures effectuées dans les forages et les paramètres d'acquisition utilisés.

Tableau 4.5 : Mesures réalisées dans les forages et paramètres d'acquisition associés.

	Mesures réalisées	Paramètres d'acquisition
Radar	• tomographie	• Configuration entre trous • $\Delta x = 0.25$ m
E.M	• logs dans chaque forage	• $\Delta x = 0.25$ m

CHAPITRE 5. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

L'interprétation conjointe des mesures de terrain visant à caractériser la structure interne de la halde nécessite dans un premier temps une description détaillée des résultats pour chaque zone d'investigation selon la méthode utilisée.

Dans ce chapitre, les résultats des mesures géophysiques vont être présentés selon les trois principales zones d'investigation définies dans le paragraphe précédent (cf. § 4.3). L'interprétation des mesures géophysiques sera étayée par des résultats complémentaires issus d'informations géotechniques et géochimiques.

5.1 Surface du banc supérieur de la halde

Dans ce paragraphe, les résultats issus des mesures de terrain vont être présentés en deux sections correspondant aux deux bancs de la halde. Pour chaque banc, l'emphase sera d'abord mise sur la description des résultats géophysiques. Il s'en suivra une interprétation géomorphologique basée sur l'analyse croisée des résultats géophysiques avec des résultats complémentaires.

5.1.1 Description des résultats géophysiques pour le banc supérieur

Les sections électriques présentées sur les *figures 5.1* et *5.2* correspondent respectivement aux profils longitudinaux (L1 à L4) et aux profils transverses (T1 à T8) (cf. *Figure 4.4*). Elles ont été réalisées à l'aide du logiciel RES2DINV (cf. § 2.1.3.1) avec les paramètres d'acquisitions présentés dans le *tableau 4.3*.

Sur la *figure 5.1*, la profondeur d'investigation atteinte pour chaque profil est d'environ 12 m. Cette profondeur correspond approximativement à l'épaisseur du banc supérieur de la halde. Les quatre profils longitudinaux (L1 à L4) mettent clairement en évidence un fort contraste de résistivité électrique dans le banc supérieur de la halde. La partie Ouest de la zone investiguée ($0 < X_L < 75\text{m}$) est généralement résistive ($> 500 \Omega.\text{m}$) et

semble peu stratifiée. Une zone (en forme de « feuillet ») conductrice sub-vertical ($< 50 \Omega.m$) peut cependant être localisé entre $X_L = 46m$ et $X_L = 50m$. La réponse électrique dans la partie Est ($X_L > 75m$) apparaît comme une alternance sub-horizontale de couches plus conductrices (entre $5 \Omega.m$ et $100 \Omega.m$). A noter, la présence dans cette zone d'une anomalie résistive ($> 500 \Omega.m$) dans la portion N-E correspondant à un dépôt superficiel de stériles peu ou pas compactés. La *figure 5.2* présente les mêmes anomalies sous un angle transverse.

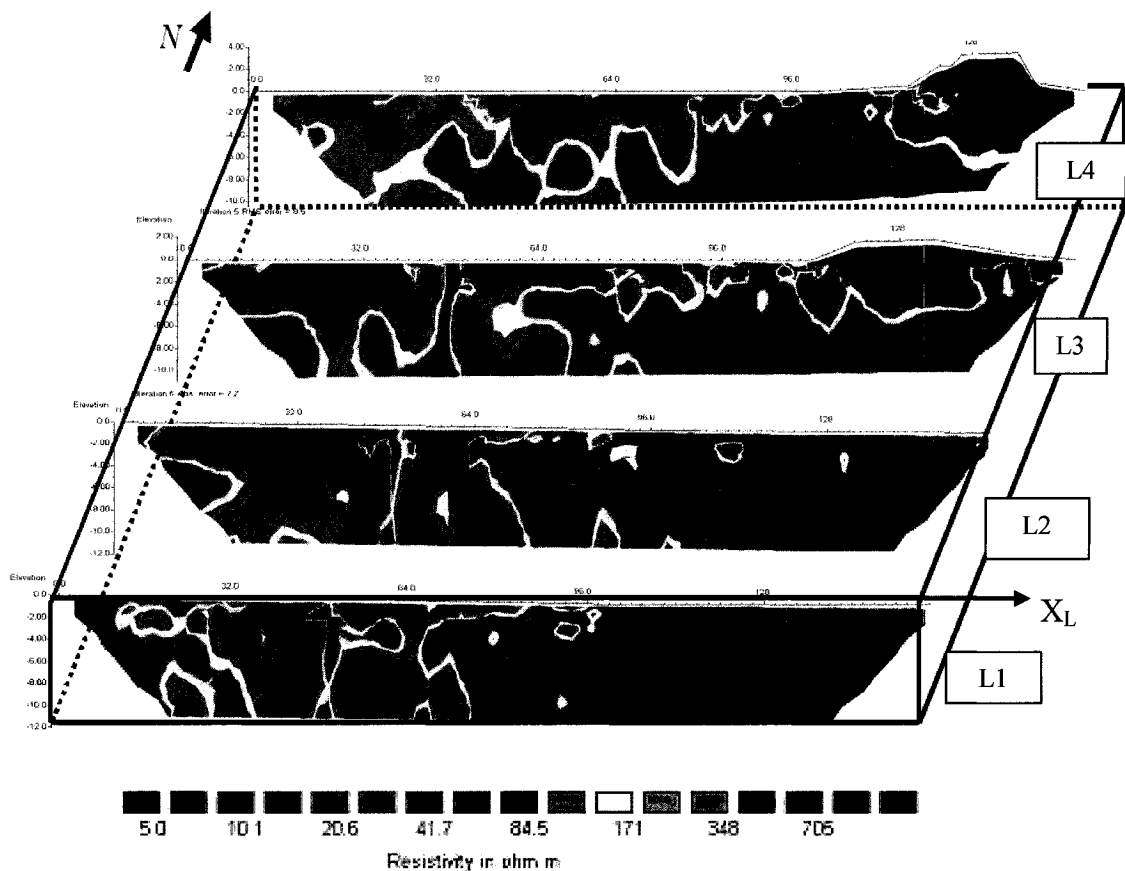


Figure 5.1: Profils électriques longitudinaux (L1 à L4)

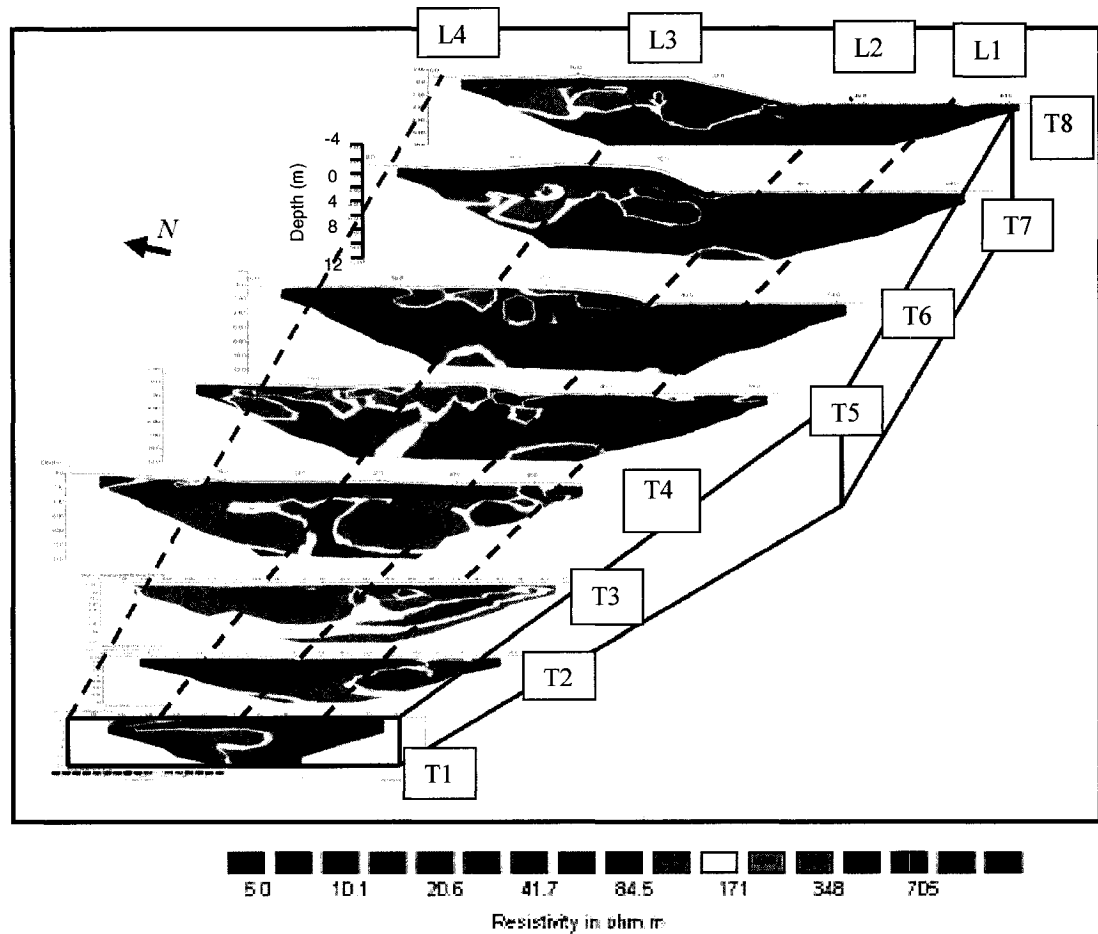


Figure 5.2: Profils électriques transverses (T1 à T8). La localisation des profils longitudinaux L1 à L4 est schématisée en pointillés.

Les principales variations de résistivité détectées sur les sections électriques apparaissent également sur les profils électromagnétiques réalisés avec le EM31. A titre d'exemple, la figure 5.3 illustre la bonne corrélation entre les mesures électriques (prises avec un espacement inter-électrodes de 2 m et en configuration dipôle-dipôle) et électromagnétiques le long du profil L2. D'un point de vue qualitatif, les deux méthodes donnent des résultats similaires. La réponse électromagnétique présente en effet une importante zone résistive comprise entre $0 < X_L < 70\text{m}$ et une zone plus conductrice pour $X_L > 70\text{ m}$ (Figure 5.3 a). Le feuillet conducteur est également mis en évidence

entre pour $X_L \sim 52$ m. D'un point de vu quantitatif, les valeurs de résistivité apparente observées dans la zone résistive ($0 < X < 75$ m) sont d'environ 100 Ohm.m sur le profil EM31 (Figure 5.3 a) et sont supérieure à 200 Ohm.m sur le profil de résistivité apparente obtenue avec la méthode électrique (Figure 5.3 b). Par ailleurs, les valeurs de résistivité sont comparables dans la portion conductrice ($X_L > 75$ m) et sont inférieures à 50 Ohm.m. Ceci confirme la dynamique limitée du EM31 en milieu résistif car les conductivimètres sont peu sensibles à de faibles variations de conductivité quand le milieu est très résistif (cf. § 2.3).

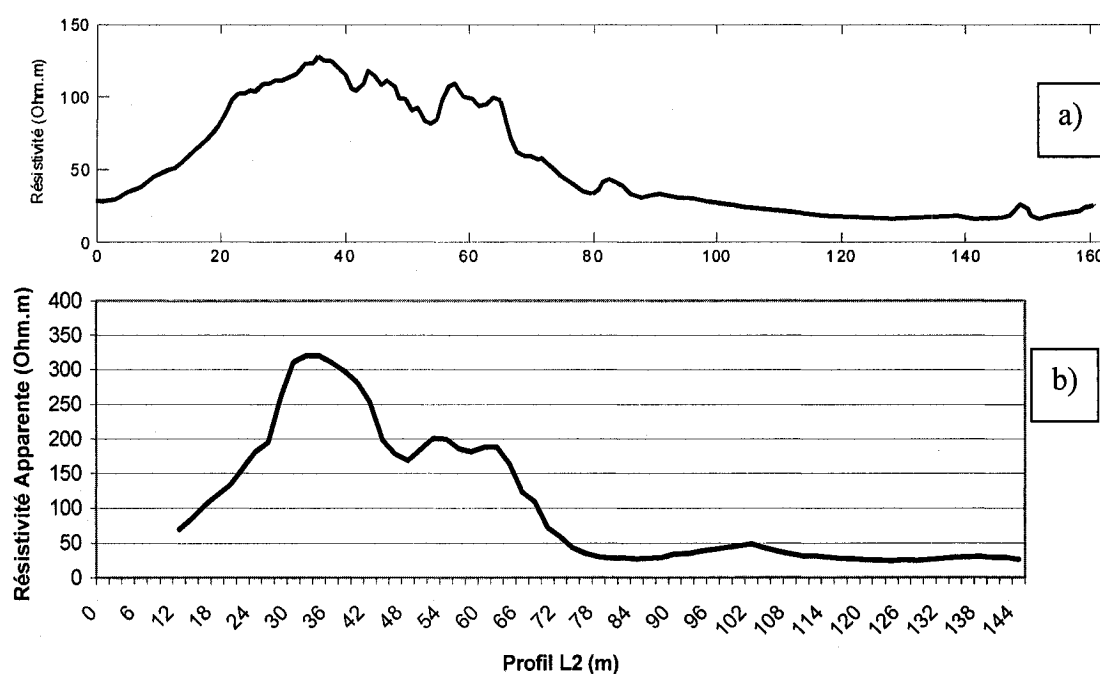


Figure 5.3: Corrélation entre les signatures - a) électromagnétique (EM31) et - b) électrique le long du profil L2.

Les différents profils électromagnétiques ont aussi permis de réaliser une carte de résistivité électrique (Figure 5.4). Cette carte a été obtenue par interpolation linéaire entre les profils. Elle confirme globalement la distribution de la résistivité mise en

évidence sur les profils électriques, soit une zone résistive à l'ouest et une zone conductrice à l'est.

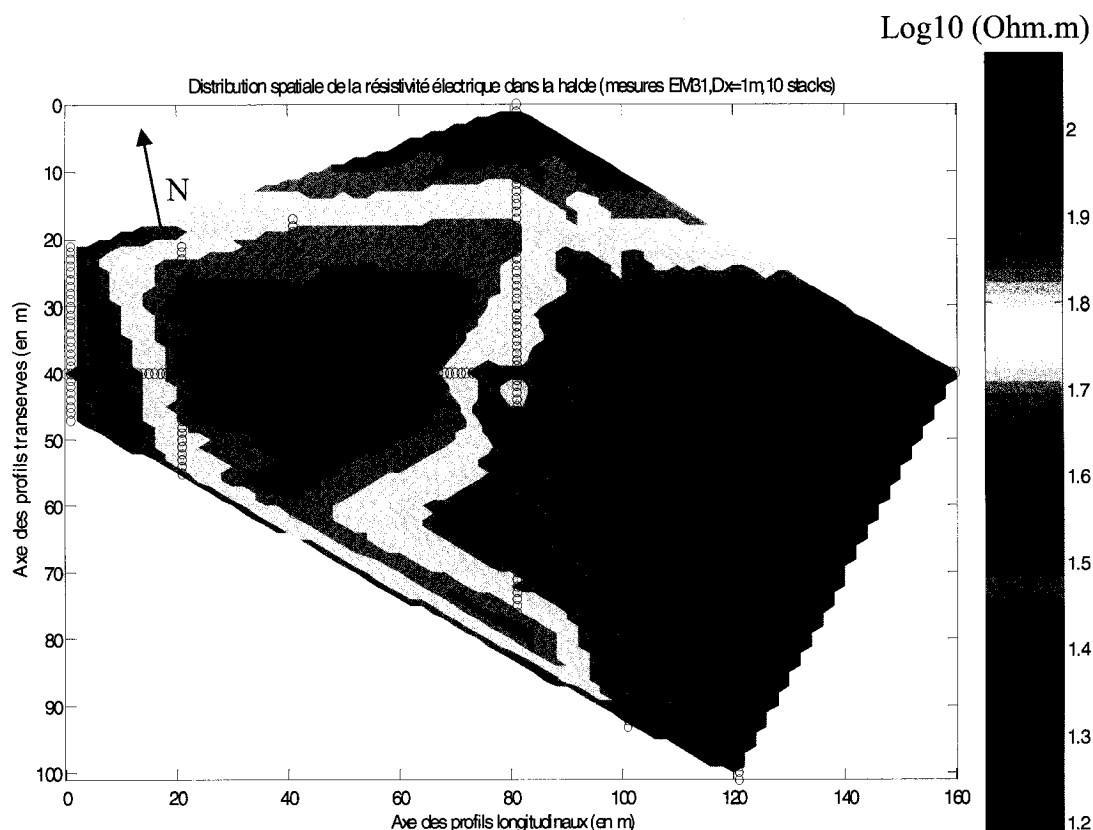


Figure 5.4: Distribution spatiale de la résistivité électrique obtenue avec le EM31. Chaque rond noir représente un point de mesure.

Le fort contraste de résistivité Ouest-Est mis en évidence par tous les résultats géophysiques présentés dans ce paragraphe pourrait être imputable à différents facteurs. Pour tenter d'expliquer cette réponse géophysique, plusieurs hypothèses peuvent être émises :

Il est possible que le contraste de résistivité soit associé à deux types de matériaux aux propriétés hydrogéologiques et minéralogiques différentes (*Hypothèse N°1*). La teneur en eau ayant une influence directe sur la réponse électrique (cf. § 2.1.2.5), il est notamment possible d'associer la variation de résistivité observée à une variation de

capacité de rétention d'eau des stériles. Ainsi, la signature électrique mise en évidence peut refléter la présence de matériaux à granulométrie plus fine à l'Est qu'à l'Ouest. Cette différence granulométrique pourrait être liée (en partie) à la minéralogie des stériles déposés. En effet, d'après Gamache-Rochette (2004), certains stériles plus oxydés ont une fraction de particules fines plus importante, ce qui accroît leur capacité de rétention d'eau.

Le fort contraste de résistivité Est-Ouest peut également résulter d'un changement dans le mode de construction de la halde (*Hypothèse N°2*). La forme tabulaire des anomalies conductrices observées dans la portion Est de la halde (cf. *Figure 5.1* et *5.2*) semble indiquer la présence de bancs sub-horizontaux formés d'une alternance de stériles fins et de stériles plus grossiers. Cette structuration en bancs peut être due au mode d'empilement par étalements successifs des stériles et à l'effet de la machinerie lourde ayant provoqué des compactions différentielles (cf. *Figure 1.5*). Dans la portion Ouest, la forte résistivité peut correspondre à la présence de matériaux plus grossiers et moins compactés. De plus, le feuillet conducteur sub-vertical observé dans cette zone pourrait indiquer que le mode de déversement est été modifié. L'empilement des stériles dans la portion Ouest pourrait être postérieur à la construction de la portion Est. Dans ce cas, les stériles ont possiblement été déposés par des déversements en crête successifs depuis la zone conductrice. Il en résulterait un matériau plus grossier et plus lâche. Les deux hypothèses qui viennent d'être présentées sont résumées dans le *tableau 5.1*.

Tableau 5.1 : Hypothèses émises à partir des mesures géophysiques en surface du banc supérieur.

	Hypothèse
N°1	Le contraste de résistivité Ouest-Est est associé à deux types de matériaux aux propriétés hydrogéologiques et minéralogiques différentes.
N°2	Le contraste de résistivité Ouest-Est est associé à un changement dans le mode de construction de la halde.

Ces hypothèses ne portent que sur les mesures géophysiques. Afin de les confirmer ou de les infirmer, il est nécessaire d'apporter des informations complémentaires provenant d'autres domaines.

5.1.2 Résultats complémentaires et analyses croisées

5.1.2.1 Inspection visuelle dans des tranchées

Les différents résultats obtenus avec les méthodes électriques et EM ont motivé le creusement de trois tranchées le long du profil L2. La localisation de ces trois tranchées est présentée sur la *figure 5.5*. Ces tranchées ont été réalisées à l'aide d'une pelle mécanique et ont été positionnées de façon stratégique afin d'échantillonner et d'examiner de visu les matériaux et la structure superficielle de la halde. La première tranchée, d'une profondeur de 3 m et d'une longueur de 10 m, a été creusée au cœur de la zone résistive (Tranchée Ouest). Une seconde tranchée, d'une profondeur de 3 m et d'une longueur de 25 m, a été implantée à la transition entre l'anomalie résistive et l'anomalie conductrice (Tranchée centrale). La dernière tranchée, d'une profondeur de 3 m et d'une longueur de 16 m, a été creusée au cœur de la zone conductrice (Tranchée Est).

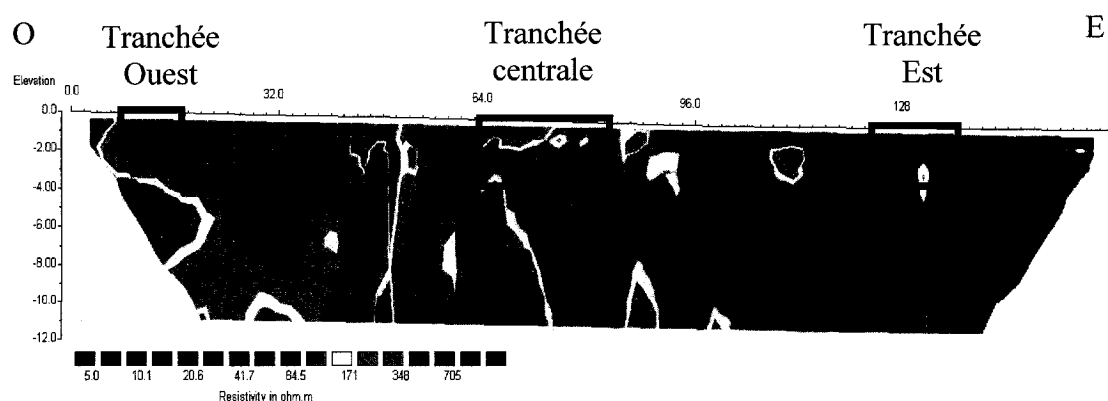


Figure 5.5: Implantation des trois tranchées réalisées le long du profil L2.

Les matériaux excavés ont permis de mettre en évidence plusieurs différences significatives entre la tranchée Ouest et la tranchée Est. Les clichés photographiques pris dans ces tranchées (*Figure 5.6*) confirment une différence de couleur et de granulométrie importante. L'analyse granulométrique sera présentée dans le paragraphe 5.1.2.2.

Dans la tranchée Ouest (*Figure 5.6 a) et b)*) les matériaux présentent une couleur orangée. Dans la tranchée centrale (*Figure 5.6 c) et d)*), la couleur des matériaux varie de orangée à grisâtre. Des stratifications obliques ont aussi été observées dans cette tranchée. Elles sont surlignées en rouge sur la *figure 5.6 d)*. Ces stratifications seront étudiées en détails dans le paragraphe 5.1.2.3.

Dans la tranchée Est, les matériaux sont généralement de couleur grisâtre (*Figure 5.6 e) et f)*). La tranchée Est a aussi permis de mettre en évidence une lentille de stériles de couleur ocre visible sur la *figure 5.6 f)* et plus distinctement sur la *figure 5.7*.

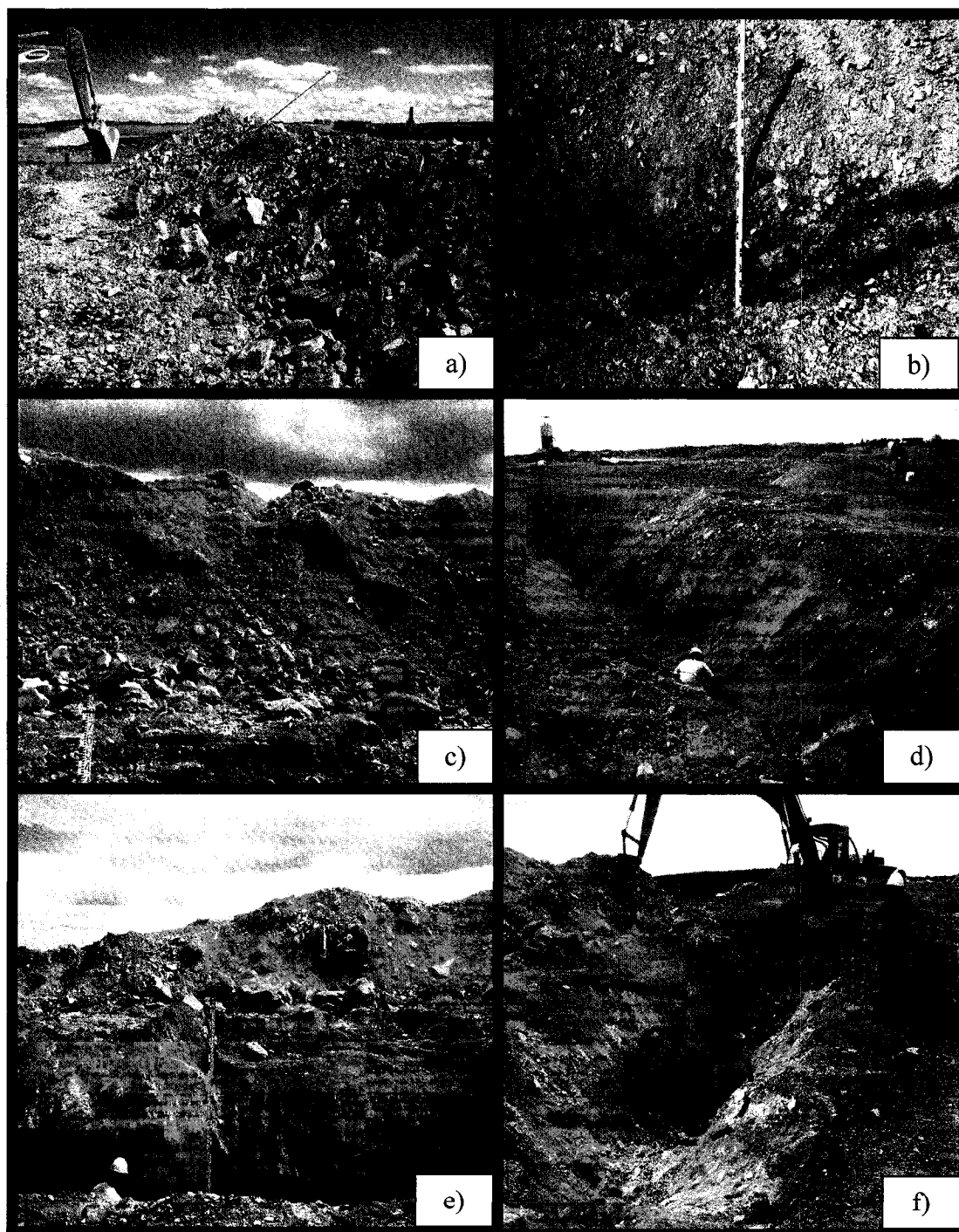


Figure 5.6: Photographies de la tranchée Ouest a) et b), de la tranchée centrale c) et d) et de la tranchée Est e) et f).

Une interface très nette peut être observée sur la *figure 5.7* entre les stériles gris et les stériles ocres (pointillés rouges). Cette lentille a une épaisseur d'environ 1 m et une longueur d'environ 3 m. La couleur ocre (attribuable à l'oxyde de fer) associée à une forte odeur de soufre est indicatrice de l'oxydation des stériles dans cette zone. Cette lentille rappelle les poches de stériles oxydées mises en évidence par Gamache-Rochette (2004).



Figure 5.7: Lentille de stériles ocres mis en évidence dans la tranchée Est. Les pointillés rouges indiquent l'interface entre les stériles oxydés (ocre) et les stériles non oxydés (gris). Une électrode de 60 cm a été placée dans la lentille pour donner l'échelle.

5.1.2.2 Analyses d'échantillons prélevés dans les tranchées

Des stériles ont été prélevés dans chaque tranchée afin d'étudier les différences de propriétés hydrogéologiques et minéralogiques induisant le contraste de résistivité électrique observé entre l'Ouest et l'Est de la halde. Dans les tranchées Ouest et Est, un échantillon de stériles représentatif de l'hétérogénéité granulométrique a été prélevé. Chaque échantillon a été déposé dans un baril scellé de 80 litres. Pour chaque

stratification oblique observée dans la tranchée centrale (cf. Figure 5.6 et § 5.1.2.3), un échantillon de stériles (volume inférieur à 5 litres) a été prélevé et placé dans un sac de plastic scellé. Au total, huit échantillons ont été prélevés dans cette tranchée. Les principales analyses réalisées en laboratoire sur les échantillons sont la granulométrie, la mesure de la teneur en eau, la densité, l'identification minéralogique par Diffraction des Rayons-X (DRX) et l'étude du potentiel de génération d'acide (La granulométrie et la densité ne sont présentées que pour les tranchées Ouest et Est, voir ci dessous). Les résultats présentés par la suite pour les tranchées Ouest et Est correspondent à une mesure (la plus représentative possible) de la propriété recherchée. Pour la tranchée centrale, les résultats présentés correspondent à une moyenne de la propriété recherchée pondérée par l'épaisseur de la strate. Pour les détails des différentes analyses réalisées, se référer au CD ROM en annexe 2.

- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de caractériser physiquement un échantillon en déterminant une courbe correspondant au pourcentage cumulé de grains passant à travers des tamis en fonction du diamètre des grains. L'ouverture de maille de chaque tamis est normalisée et correspond à un intervalle de tailles de grains. Chaque tamis divise les particules qui lui sont appliquées en deux fractions : un refus, correspondant aux particules retenues sur le tamis, et un passant, correspondant aux particules appliquées au tamis inférieur. A l'issue du tamisage, les refus de chaque tamis sont recueillis et pesés. À partir de la courbe granulométrique obtenue pour un échantillon, il est alors possible de déterminer divers paramètres comme le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c). Ces paramètres sont calculés à partir du diamètre effectif (D_{10}), du D_{30} et du D_{60} . Le D_{10} (usuellement exprimé en μm ou en mm) correspond à l'ouverture de maille du tamis laissant passer 10 % en poids de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique. Il en est de même pour le D_{30} (30%) et le D_{60} (60%).

Le coefficient d'uniformité (Équation 5.1) offre une appréciation de l'homogénéité du matériau.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (\text{Équation 5.1})$$

Plus le coefficient d'uniformité est proche de $C_u=1$, plus la granulométrie de l'échantillon est considérée uniforme.

Le coefficient de courbure (Équation 5.2) renseigne sur la forme de la courbe granulométrique d'un échantillon entre le D_{60} et le D_{10} .

$$C_c = D_{30}^2 / D_{10} \cdot D_{60} \quad (\text{Équation 5.2})$$

Une analyse granulométrique a été réalisée sur les échantillons prélevés dans les tranchées Ouest et Est. La quantité de stériles prélevée dans la tranchée centrale n'était pas suffisante pour réaliser une analyse granulométrique représentative. La *figure 5.8* présente donc les courbes granulométriques correspondantes aux stériles prélevés dans la tranchée Ouest et dans la tranchée Est (pour la fraction ≤ 10 cm).

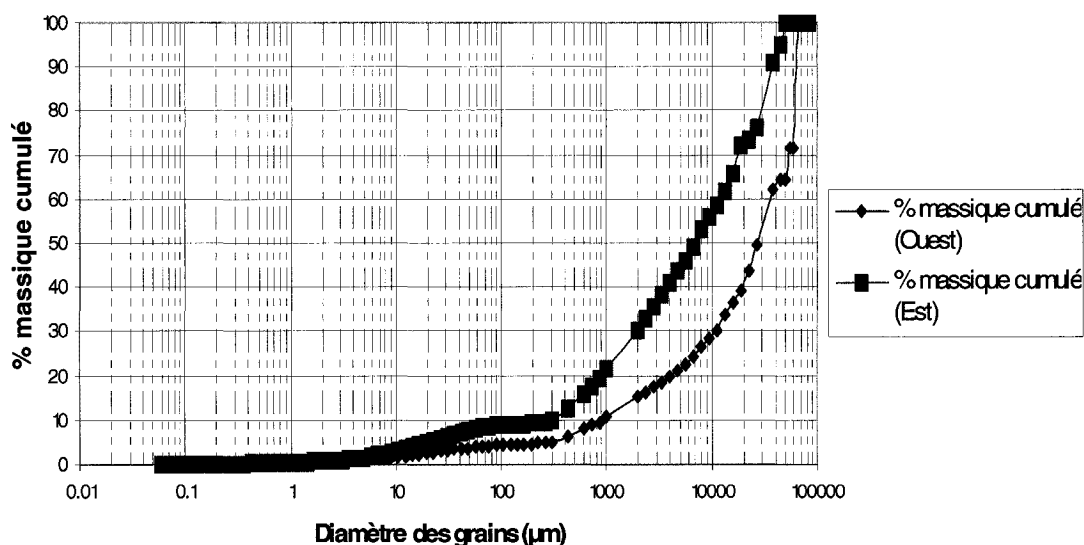


Figure 5.8: Courbes granulométriques correspondantes aux stériles prélevés dans la tranchée Ouest (en bleu) et dans la tranchée Est (en rose) (Adapté des résultats fournis par Mélanie Bélanger, UQAT).

A partir de ces courbes, C_u et C_c ont été déterminés pour les deux échantillons. Le *tableau 5.2* présente les valeurs de C_u , C_c et D_{10} pour les échantillons de la tranchée Ouest et Est.

Tableau 5.2: Valeurs de C_u , C_c et D_{10} obtenues pour les échantillons de la tranchée Ouest et Est.

	Tranchée Ouest	Tranchée Est
C_u	39.9	38.4
C_c	3.74	1.03
D_{10} (μm)	895.9	314.2

Le C_u des deux échantillons est élevé et comparable entre les deux tranchées ce qui indique une distribution granulométrique très étalée dans les deux portions du banc supérieur de la halde. Cependant, la courbe granulométrique de l'échantillon prélevé dans la tranchée Est est décalée vers la gauche (cf. *Figure 5.8*). Ceci indique que la proportion de particules fines est plus importante dans la portion Est que dans la portion Ouest de la halde. Cette proportion de particules fines peut aussi témoigner d'un état d'oxydation avancé comme l'a montré Gamache-Rochette (2004) (cf. § 3.2.2.1). D'autre part, ce résultat est cohérent avec la réponse géophysique observée dans le paragraphe 5.1.1.1 et peut être corrélé à l'hypothèse N°1 (cf. *Tableau 5.1*) car un milieu est d'autant plus conducteur qu'il contient de particules fines car sa capacité de rétention d'eau est accrue.

- Mesure de la teneur en eau

La teneur en eau massique (w) a été déterminée en calculant la différence de masse de chaque échantillon avant et après avoir été asséché dans un four. La *figure 5.9* présente les valeurs de teneur en eau moyennes déterminées pour chaque tranchée.

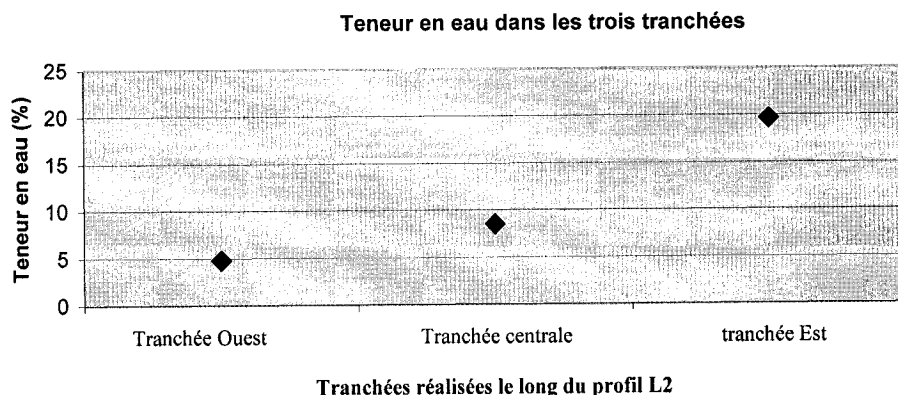


Figure 5.9: Teneur en eau massique moyenne (%) dans chaque tranchée. Les échantillons ont été prélevés en Septembre 2005).

Dans la tranchée Ouest, la teneur en eau est d'environ 5% contre 8% dans la tranchée centrale et quasiment 20% dans la tranchée Est. Cette augmentation significative de la teneur en eau d'Ouest en Est apporte un élément de réponse important pour expliquer le contraste de résistivité électrique observé sur les profils géophysiques (cf. *Figure 5.1* à *figure 5.4*). En effet, la résistivité électrique d'un milieu est d'autant plus importante que sa teneur en eau est faible (cf. Équation 2.5). La distribution de la résistivité électrique est donc cohérente avec les teneurs en eau obtenues. La zone résistive (Ouest) est associée à une faible teneur en eau alors que la zone conductrice (Est) est associée à une teneur en eau plus importante.

- Densité

La densité en place des stériles a été déterminée dans la tranchée Ouest et dans la tranchée Est. Pour réaliser les mesures, un cylindre métallique (longueur = 40,1 cm ; diamètre = 9,2 cm) a été enfoncé dans un mur de chaque tranchée. La densité des échantillons recueillis dans la tranchée Ouest et Est est présentée sur le *tableau 5.3*.

*Tableau 5.3 : Mesures de densité dans la tranchée Ouest et dans la tranchée Est
(Données fournies par Nil Gaudet, UQAT).*

	Tranchée Ouest	Tranchée Est
Densité	1.65	2.27

Les mesures présentées dans le *tableau 5.3* indiquent que la densité est supérieure dans la portion Est. Ceci pourrait être dû à un degré de compaction plus important dans cette portion de la halde (effet de la machinerie) et/ou à la présence de stériles plus fins. Il est cependant important de mentionner que ces mesures sont ponctuelles et ne représentent donc qu'une tendance de la variabilité de la densité dans la halde.

- Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX)

Afin d'évaluer s'il existe un lien entre la réponse géophysique des stériles et les propriétés géochimiques des minéraux constitutifs, une caractérisation minéralogique des différents échantillons a ensuite été réalisée par la technique de diffraction des rayons X. Cette méthode de caractérisation, basée sur l'étude des propriétés de diffraction des minéraux soumis à un faisceau de rayon X, permet de déterminer la nature et la proportion des minéraux présents dans un échantillon. Pour chaque échantillon, il est ainsi possible de déterminer et de quantifier les minéraux potentiellement impliqués dans la génération du drainage minier acide. Les principaux minéraux recherchés pour leurs propriétés acidifiante ou neutralisante sont présentés dans le *tableau 5.4* et sont regroupés selon deux classes, soit les minéraux acidogènes et les minéraux acidivores (cf. § 1.2).

Tableau 5.4: Principaux minéraux acidogènes et acidivores détectés par DRX sur les échantillons de la mine Laronde (Données fournies par Villeneuve, M., URSTM).

Minéraux acidogènes	Minéraux acidivores
• Pyrite • Gypse • Chalcoppyrite • Sphalérite • Galène	• Muscovite • Chlorite • Paragonite • Albite • Pyrophyllite • Actinolite

Pour chaque tranchée, les pourcentages de ces minéraux acidogènes et acidivores sont respectivement présentés sur les *figures 5.10* et *5.11*

La *figure 5.10* montre que la teneur en pyrite est plus importante dans la tranchée Est (~ 3.5 %) que dans la tranchée Ouest (< 1%). Ceci pourrait indiquer que le potentiel de génération d'acide soit plus important dans la portion Est de la halde car la pyrite joue un rôle prépondérant dans la formation du DMA (cf. § 1.2).

De plus, la présence de gypse dans la tranchée Est indique que des réactions d'oxydation ont eu lieu dans cette portion de la halde. En effet, le gypse est un minéral secondaire issu de l'oxydation des minéraux sulfurés comme la pyrite (Note de cours GML6112, École Polytechnique de Montréal). Une partie de la pyrite présente dans la zone Est a donc probablement déjà été oxydée.

Les autres minéraux présentés sur les *figures 5.10* et *5.11* ont des taux de réactivité faibles et/ou n'interviennent que dans des proportions négligeables dans la formation du drainage minier acide.

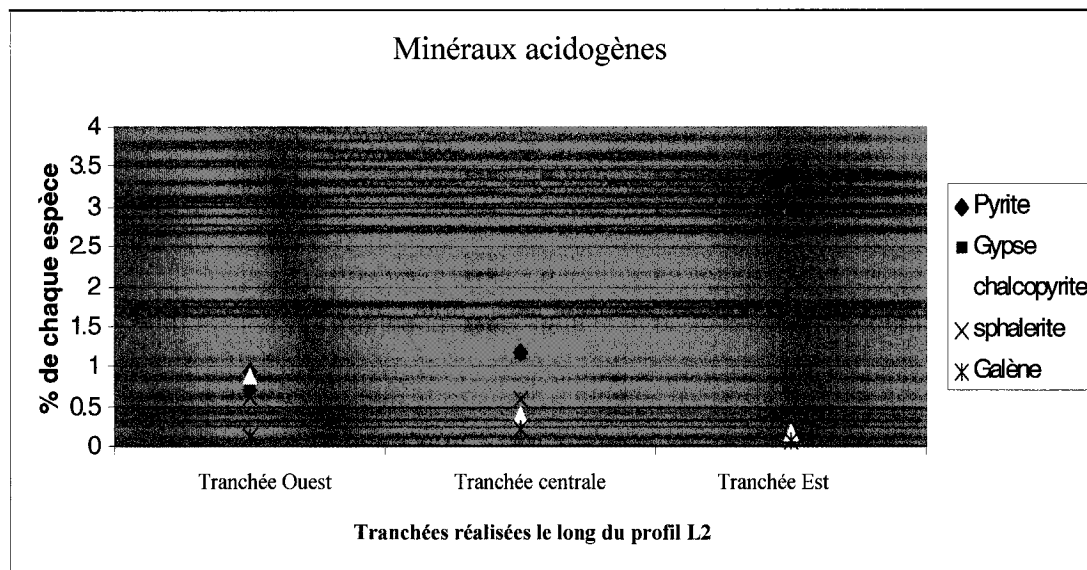


Figure 5.10: Pourcentages des principaux minéraux acidogènes présents dans chaque tranchée (déterminés par DRX).

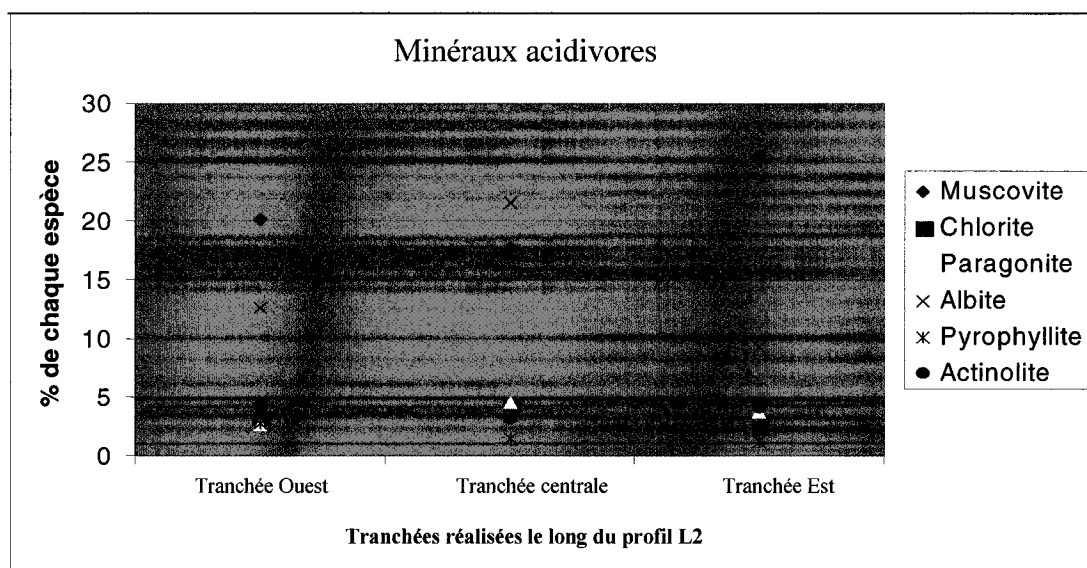


Figure 5.11: Pourcentages des principaux minéraux acidivores présents dans chaque tranchée (déterminés par DRX).

- Potentiel de génération d'acide

Un essai statique de prédiction de génération d'acide a été réalisé sur chaque échantillon (cf. § 1.2.2). Le *tableau 5.5* présente le potentiel d'acidification (PA), le potentiel de neutralisation (PN), le PNN (1^{er} critère ABA) et le ratio PN/PA déterminés pour chaque tranchée.

Tableau 5.5: Résultats des essais statiques réalisés dans chaque tranchée (adapté du bilan des essais statiques fournis par Mélanie Bélanger, UQAT).

Echantillon	PA (kg CaCO ₃ /t)	PN (kg CaCO ₃ /t)	PNN=PN-PA (kg CaCO ₃ /t) 1 ^{er} critère ABA	Ratio PN/PA 2 ^{ième} critère ABA
Tranchée Ouest	13	1,5		0,12
Tranchée centrale	33,5	7,5	-26	0,22
Tranchée Est	60,2	0 (épuisé)	-60,2	0

Le premier critère ABA (PNN) indique que l'échantillon prélevé dans la tranchée Ouest est situé dans la zone d'incertitude et que le potentiel de génération d'acide augmente d'Ouest en Est. Le second critère ABA (PN/PA) indique que tous les échantillons prélevés sont potentiellement générateurs d'acide et que le potentiel de neutralisation dans la tranchée Est est épuisé.

Ces résultats peuvent être corrélés avec les teneurs en pyrite observées sur la *figure 5.10*. En effet, le potentiel de génération d'acide d'un échantillon augmente avec sa teneur en pyrite.

5.1.2.3 Informations structurales

Des stratifications obliques orientées vers l'Ouest ont été mises en évidence dans la tranchée centrale (cf. *Figure 5.6 d*). Afin d'étudier plus en détails ces stratifications, des échantillons ont été prélevés dans chaque strate observée. De plus, un profil de résistivité électrique a été réalisé à deux mètres de profondeur sur le mur Nord de cette tranchée. L'intérêt d'effectuer un profil de résistivité en section horizontale est double. Il sert d'une part à établir un lien entre la réponse électrique et la nature des matériaux échantillonnés. Il permet d'autre part d'étudier la continuité latérale des stratifications discernées dans la tranchée. Les électrodes ont donc été plantées à l'horizontale et l'acquisition des mesures électriques a été réalisée en configuration dipôle-dipôle pour un espacement inter-électrodes de 0.5 m. La mise en œuvre du dispositif électrique pour cette investigation en plan est présentée sur la *figure 5.12*.

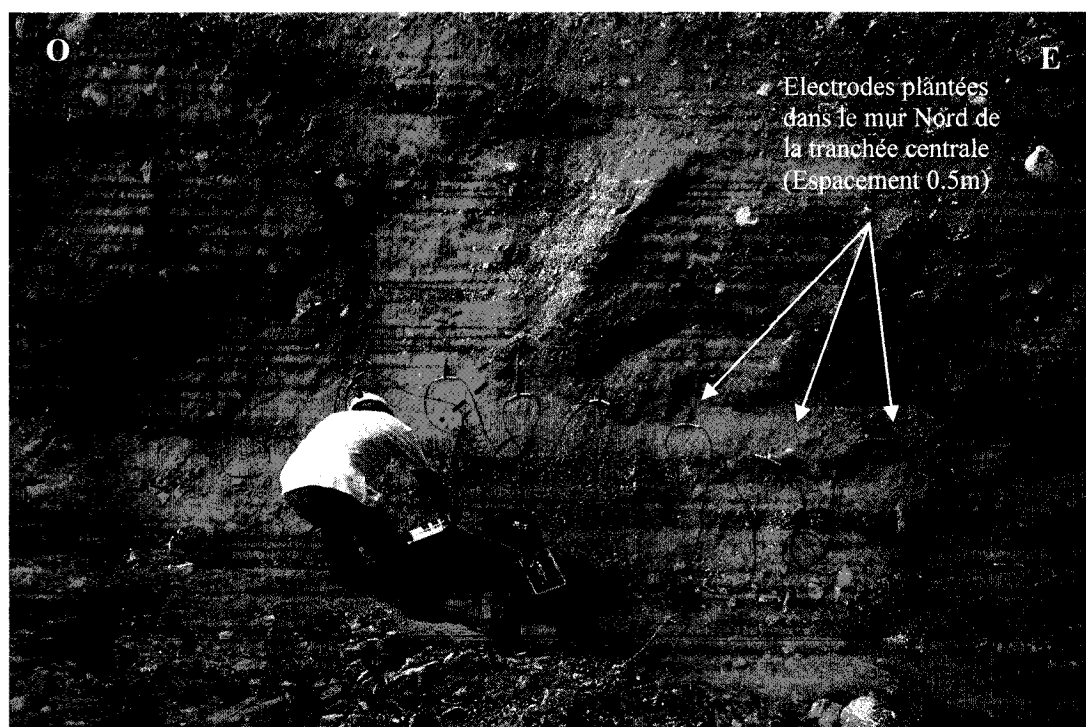


Figure 5.12: Acquisition d'un profil électrique dans le mur Nord de la tranchée centrale. Les pointillés rouges indiquent la présence de stratifications obliques.

L'inspection visuelle et l'analyse des échantillons prélevés dans les différentes strates a permis de définir une séquence présentant une alternance de couches de type sable et silt fortement cohésives et de couches composées de matériaux plus lâches et plus grossiers (graviers et blocs principalement). La teneur en eau de chaque échantillon a aussi été déterminée en laboratoire afin d'étudier si il existe un lien entre la nature des matériaux, leur capacité de rétention d'eau et leur réponse électrique. La *figure 5.13* présente successivement le profil de teneur en eau (a)), la séquence stratigraphique (b)) et la section de résistivité électrique (c)).

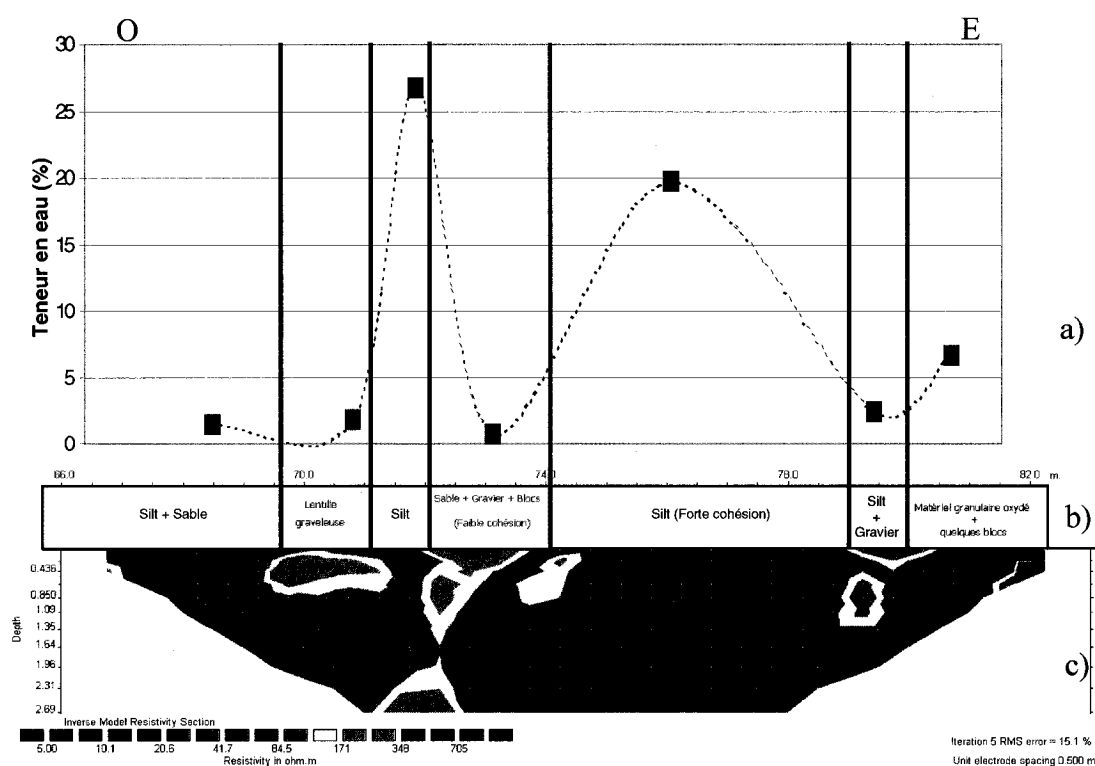


Figure 5.13: Comparaison entre le profil de teneur en eau (a), la nature géotechnique des matériaux (b) et la réponse électrique (c) pour les strates mises en évidence dans la tranchée centrale.

Le profil électrique met en évidence une alternance de zones conductrices ($< 50 \Omega.m$) et résistives ($> 200 \Omega.m$). Les anomalies conductrices sont associées aux matériaux fins

et ont une capacité de rétention d'eau importante. Les anomalies résistives correspondent aux matériaux plus grossiers. La faible teneur en eau de ces matériaux indique qu'ils sont plutôt drainant et peuvent agir comme des chemins d'écoulement préférentiel. De plus, la forme allongée des anomalies électriques témoigne d'une certaine continuité latérale des structures mises en évidence dans la tranchée, soit la présence de stratifications obliques inclinées vers l'Ouest.

D'un point de vue géotechnique, l'orientation de ces strates semble donc indiquer que les matériaux constituant le banc supérieur de la halde ont été déposés de l'Est vers l'Ouest de la halde par des déversements en crête successifs.

Finalement, à l'extrémité Est de la tranchée, un plan de « fissuration » oblique a été identifié (*Figure 5.14 a*). Ce plan sépare une couche de matériaux fins denses d'une couche de matériaux plus grossiers. Ces deux couches sont respectivement associées à l'anomalie conductrice et à l'anomalie résistive situées à l'extrémité Est du profil électrique (cf. *Figure 5.13 c*).

Une vue rapprochée le long de ce plan permet de distinguer la présence de cavités décimétriques (*Figure 5.14 b*) à l'intérieur desquelles des cristaux ont pu être observés (*Figure 5.14 c*) et échantillonnés.

Une analyse par DRX sur les différents échantillons prélevés dans la tranchée centrale révèle que la teneur en sulfate hydrosoluble (gypse notamment) et en pyrite le long du plan de fissuration est supérieure aux autres échantillons (*Figure 5.15*).

La formation de telles cavités peut s'expliquer en considérant que l'alternance de couches fines et grossières provoquée par le mode de déversement induit des zones plus poreuses dans lesquelles l'eau et l'oxygène peuvent pénétrer.

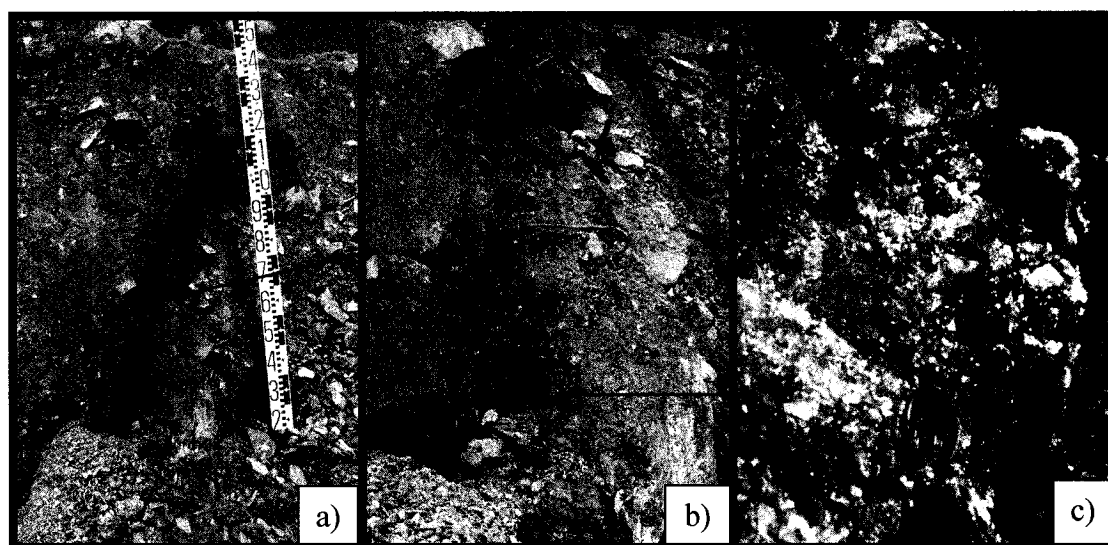


Figure 5.14: Mise en évidence d'un plan de fissuration (pointillés rouges) à l'extrémité Est de la tranchée central : a) Vue générale, b) Cavités le long du plan (cercles en pointillés rouges), c) Présence de cristaux dans les cavités témoignant de l'oxydation des stériles.

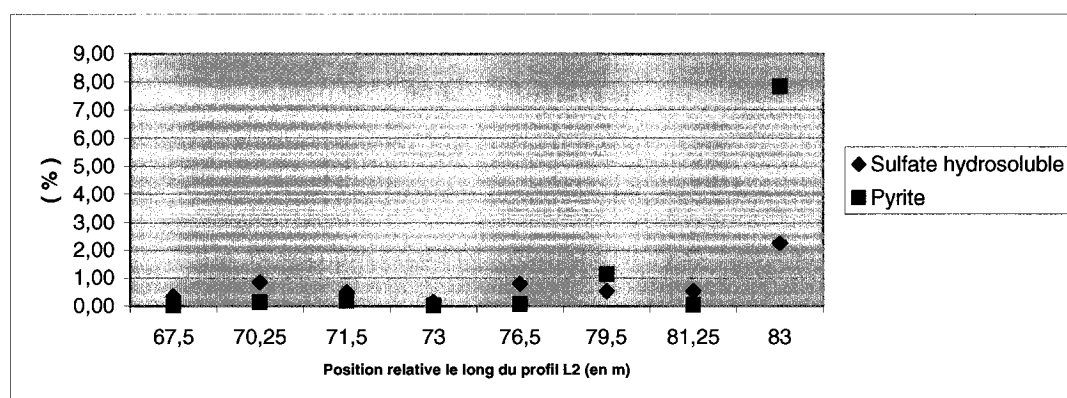


Figure 5.15: Teneur en pyrite et en sulfate hydrosoluble pour les différents échantillons prélevés dans la tranchée centrale.

5.1.2.4 Synthèse des résultats pour le banc supérieur

Les résultats géophysiques présentés dans cette partie ont permis de distinguer un fort contraste de résistivité électrique entre la portion Ouest et la portion Est de la halde. Différentes analyses réalisées en complément des mesures géophysiques ont permis de mettre en évidence des liens étroits entre les variations de résistivité électriques observées et les propriétés minéralogiques et géotechniques des stériles miniers. Ces liens sont résumés dans le *tableau 5.6* et serviront de base à l'interprétation générale proposée dans le chapitre 6.

Le couplage de ces différents résultats semble indiquer la présence de deux types de stériles mais aussi une évolution dans le mode de construction de la halde. Les hypothèses N°1 et N°2 (cf. *Tableau 5.1*) semblent donc interconnectées. Ainsi, le contraste de résistivité Ouest-Est serait associé à la présence de deux types stériles (composition minéralogique différente) mais aussi à des modes de construction différents.

Tableau 5.6: Synthèse des principaux résultats mis en évidence dans le banc supérieur.

	Evolution du paramètre	Ouest	Centre	Est
Géophysique	Résistivité électrique	Résistant ($>500 \Omega.m$) + Feuillet conducteur ($\sim 10 \Omega.m$)	Alternance de bancs conducteur/résistif	Conducteur ($< 100 \Omega.m$)
	Forme des anomalies	Massive (résistant) Sub-verticale (feuillet cond.)	Obliques et allongées	Tabulaires (alternance de couches conductrices 10-100 $\Omega.m$)
Excavation	Couleur des stériles	Orangée	Alternance gris /orangée	Gris + lentille d'oxydation ocre
	Granulométrie	Très étalée (Silt→blocs métriques)	Étalée (Silt→blocs décimétriques)	Étalée (Silt→blocs décimétriques) Plus de particules fines qu'à l'ouest
	Densité	Inférieure à 2	(Pas mesurée)	Plus importante (Supérieure à 2)
	Teneur en eau	Faible ($\sim 5\%$)	Moyenne ($\sim 8\%$)	Plus élevée ($\sim 15\%$)
Minéralogie	Teneur en pyrite	Faible ($<1\%$)	Variable (généralement faible)	Plus élevée ($\sim 3.5\%$)
	Teneur en gypse	Faible ($<1\%$)	Variable (généralement faible)	Plus élevée ($\sim 3\%$)
	Potentiel de génération d'acide	Incertitude (1 ^{er} critère ABA) Générateur (2 ^{ième} critère ABA)	Variable (généralement faible)	Générateur (1 ^{er} critère ABA) Générateur (2 ^{ième} critère ABA)
Structure observée	Faciès particuliers	Dispersée	Stratifications obliques + Fissuration	Dispersée

5.1.3 Description des résultats géophysiques pour le banc inférieur

La section électrique présentée sur la *figure 5.16* correspond à l'acquisition selon le profil L2 (cf. *Figure 4.4*) répétée pour un espacement inter-électrodes de 4m. La profondeur d'investigation atteinte est d'environ 22 m (soit quasiment la hauteur de la halde qui est de 25 m). Malgré la perte de résolution due à l'espacement inter-électrodes plus important, la zone conductrice (à l'Est) et la zone résistive (à l'Ouest) mises en évidence précédemment (cf. § 5.1.1) sont aussi identifiables dans la partie supérieure de cette section (entre 0 et 12 m de profondeur). Le trait en pointillé sur la *figure 5.16* représente la limite approximative entre le banc supérieur et le banc inférieur. Au delà de 12 m de profondeur, les variations de résistivité apparaissent moins importantes que dans le banc supérieur et varient principalement entre 10 $\Omega.m$ et 100 $\Omega.m$. La signature électrique du banc inférieur est généralement assez semblable à la réponse électrique de la portion Est du banc supérieur.

Sachant que la réponse électrique est fortement conditionnée par les propriétés minéralogiques, hydrogéologiques et structurales des matériaux d'une formation, il est possible d'émettre l'*hypothèse N°3*: les matériaux du banc inférieur pourraient présenter des caractéristiques minéralogiques, hydrogéologiques et structurales comparables à celles de la portion Est du banc supérieur (cf. *Tableau 5.6*).

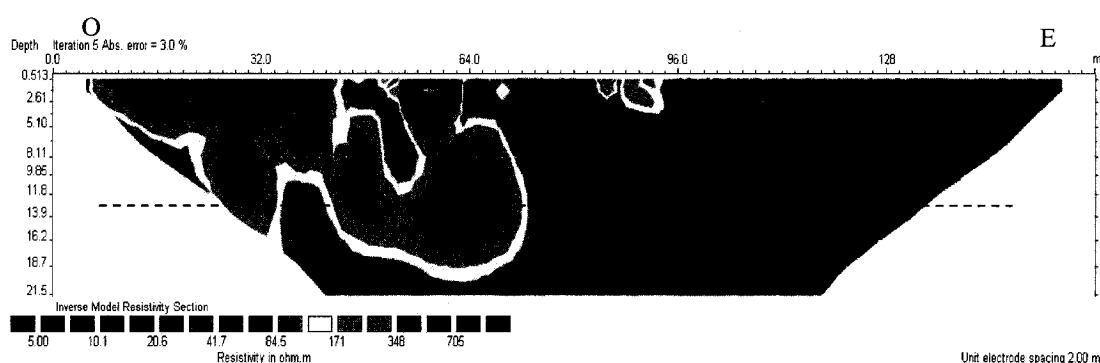


Figure 5.16: Section électrique réalisée le long du profil L2 obtenue pour un espacement inter-électrodes de 4 m (les pointillés représentent la limite approximative entre le banc supérieur et le banc inférieur).

5.1.4 Résultats complémentaires et analyses croisées

L'excavation d'une portion du banc inférieur localisée au S-W de la halde a été réalisée par les propriétaires de la mine Laronde, pour des raisons de remblayage sur un autre site. Cette excavation a eu lieu entre deux campagnes d'essais géophysiques (entre Juillet 2005 et septembre 2005). Les observations de la zone excavée, située à proximité de la rampe d'accès, ont permis d'obtenir de précieuses informations sur la structure du banc inférieur et sur les matériaux le composant. La *figure 5.17* présente la zone excavée sur une vue d'ensemble de la halde.

De façon générale, les matériaux mis à jour sont de couleur grise et s'apparentent donc aux matériaux excavés dans la tranchée Est du banc supérieur (cf. *Figure 5.6 e*) et *f*)).

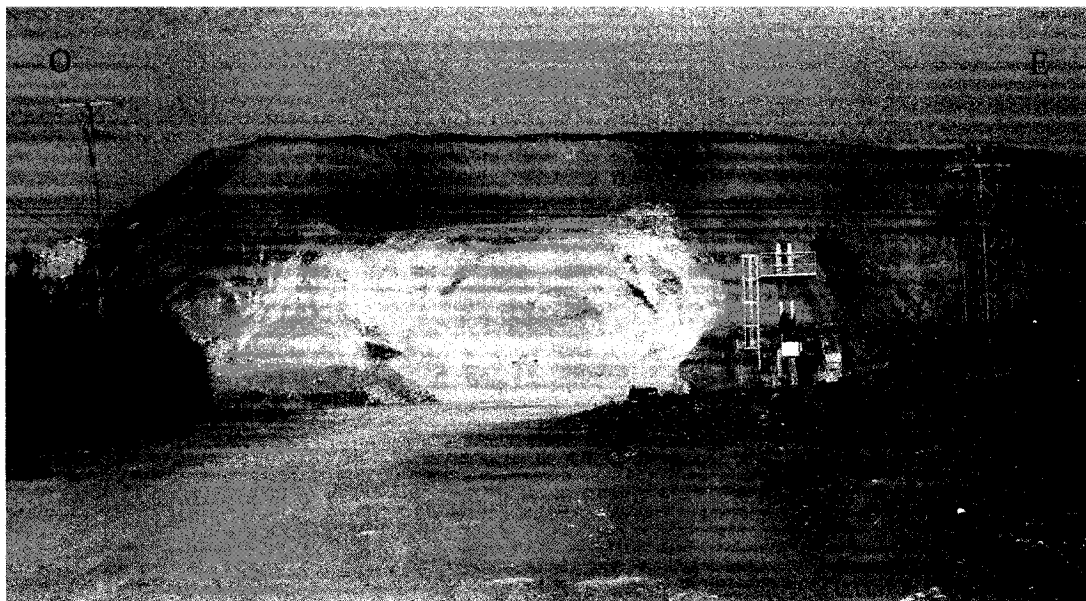


Figure 5.17: Zone excavée dans le banc inférieur de la halde.

Une vue rapprochée de la zone excavée est présentée sur la *figure 5.18*. Les observations visuelles et les différents clichés photographiques mettent en évidence plusieurs informations importantes. La granulométrie des stériles est étalée passant de particules fines (silteuses) à des blocs décimétriques.

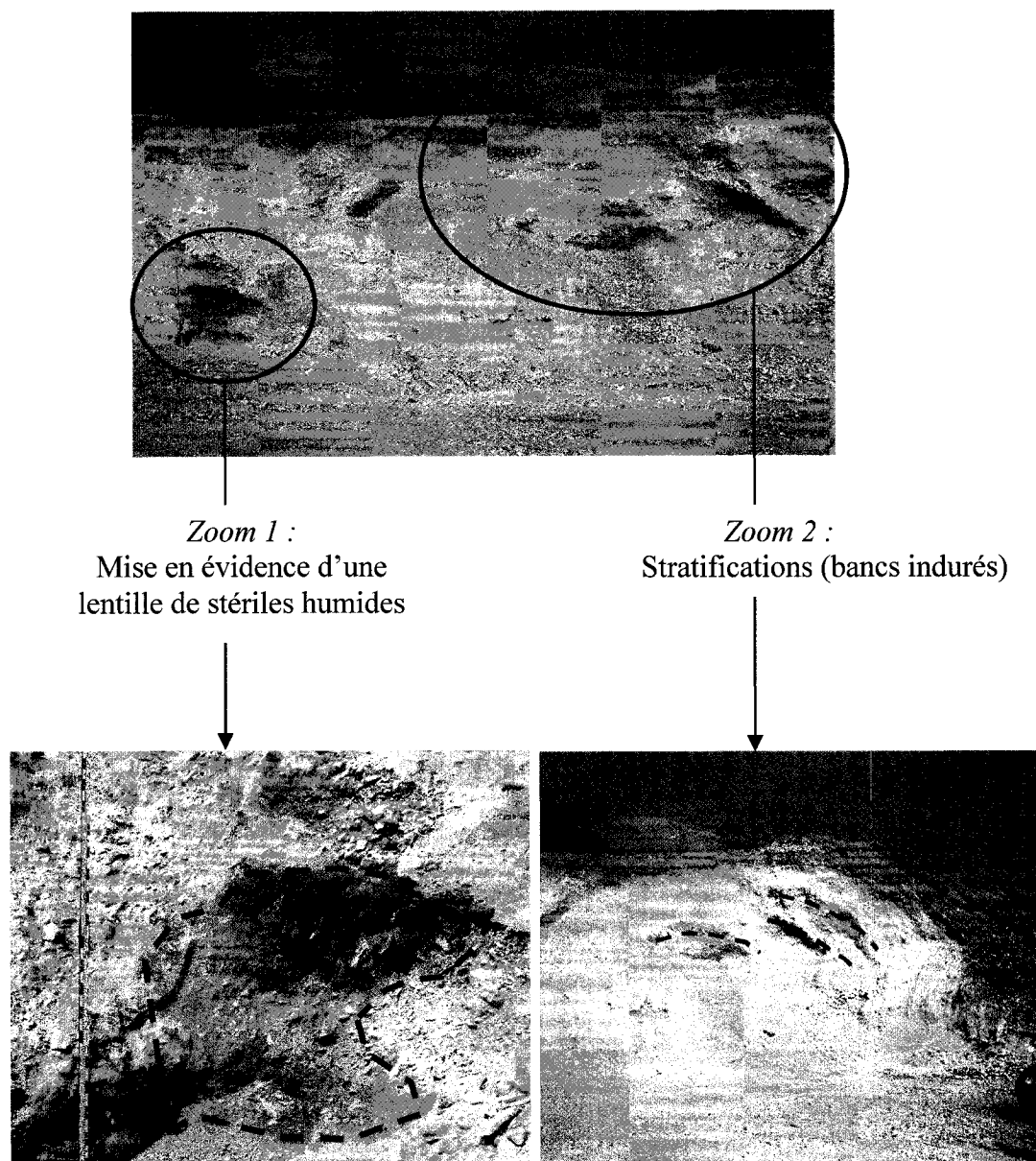


Figure 5.18 : Mise en évidence de zone humide (zoom 1) et de stratifications dans le bac inférieur de la halde (zoom 2).

Localement, des lentilles de stériles humides, de couleur ocre et/ou gris, peuvent être distinguées. L'accumulation d'eau dans ces lentilles (situées dans une matrice poreuse plus sèche) est clairement mise en évidence sur le *zoom 1* de la *figure 5.18*, témoignant de la variabilité de la capacité de rétention d'eau des stériles au sein de la halde. La couleur ocre peut être interprétée comme le témoignage de l'oxydation des stériles réactifs. Ces observations renforcent donc l'hypothèse émise dans le paragraphe précédent, selon laquelle les stériles déposés dans le banc inférieur auraient des propriétés assez analogues aux stériles déposés dans la partie Est du banc supérieur (cf. § 5.1.3, *Hypothèse N°3*).

De plus, ces lentilles semblent connectées entre elles le long de plans de stratifications visibles sur le *zoom 2* de la *figure 5.18*. Ces stratifications sont obliques aux abords des pentes (avec un angle proche de celui de la pente $\sim 35^\circ$) et s'horizontalisent vers le cœur du banc. La nature et la forme de ces stratifications peut s'expliquer par le mode de mise en place des stériles. En se basant sur le modèle de construction présenté sur la *figure 1.5*, il est possible de considérer qu'à chaque déversement de stériles soit associé une ségrégation granulométrique d'origine gravitaire et un grano-classement dû à une compaction différentielle d'origine anthropique lié à l'effet de la machinerie lourde. Les zones composées des matériaux les plus fins sont plus cohésives et engendrent d'importantes accumulations d'eau.

Dans certains cas, il est aussi possible que sous l'effet des infiltrations de fluides dans la halde, les particules fines migrent dans des zones d'accumulations produisant des lentilles localisées et indépendantes du mode de construction (Morin et al., 1991; Fala, 2002).

5.2 Pente

Comme le sommet de la halde, les pentes représentent une surface d'échange privilégiée entre les stériles et le milieu environnant (incluant l'eau et l'oxygène). Afin d'étudier la nature des matériaux près des pentes et l'influence sur l'écoulement d'eau, différentes mesures géophysiques ont été réalisées avant et après un test d'infiltration. Cette partie est divisée en trois paragraphes qui portent respectivement sur les résultats des mesures géophysiques avant et après infiltration d'eau et sur une interprétation conjointe des résultats.

5.2.1 Mesures géophysiques avant infiltration d'eau

Différents essais géophysiques à sec ont été réalisés sur le versant Sud du banc supérieur de la halde (cf. *Figure 4.4* et *figure 4.6* pour la localisation des profils et *tableau 4.4* pour les paramètres d'acquisitions).

Les trois profils électriques présentés sur la *figure 5.19* sont espacés d'environ 2 m et ont été obtenus pour un espacement inter-électrodes de 0.5 m le long de la pente. La profondeur d'investigation atteinte est d'environ 2 m. Chaque profil met en évidence une augmentation de la résistivité électrique du sommet vers la base du banc supérieur passant graduellement d'environ 10 $\Omega.m$ à 1000 $\Omega.m$. Une anomalie conductrice pelliculaire peut également être observée en surface. Ce résultat est cohérent avec les mesures réalisées par Poisson (2004) (cf. *Figure 3.10*). Le gradient de résistivité croissant du haut vers le bas de la pente est attribuable au mode de déversement en crête (cf. § 1.3.2) induisant une ségrégation granulométrique et des variations de densité. Typiquement, les stériles les plus grossiers sont localisés en pied de pente, ils sont faiblement compactés et leur capacité de rétention d'eau est faible. Vers le sommet de la pente, la granulométrie des stériles s'affine et le pouvoir de rétention d'eau est accru. A noter ici qu'une forte zone résistive est observée au sommet de chaque profil. Cette anomalie témoigne de la présence de stériles grossiers constituant le talus de

sécurité qui ceinture le sommet du banc supérieur. D'autre part, la continuité latérale des signatures électriques observées sur la figure 5.19 permet d'émettre l'hypothèse selon laquelle la distribution des stériles dans les pentes serait comparable sur tout le pourtour de la halde (*Hypothèse N°4*).

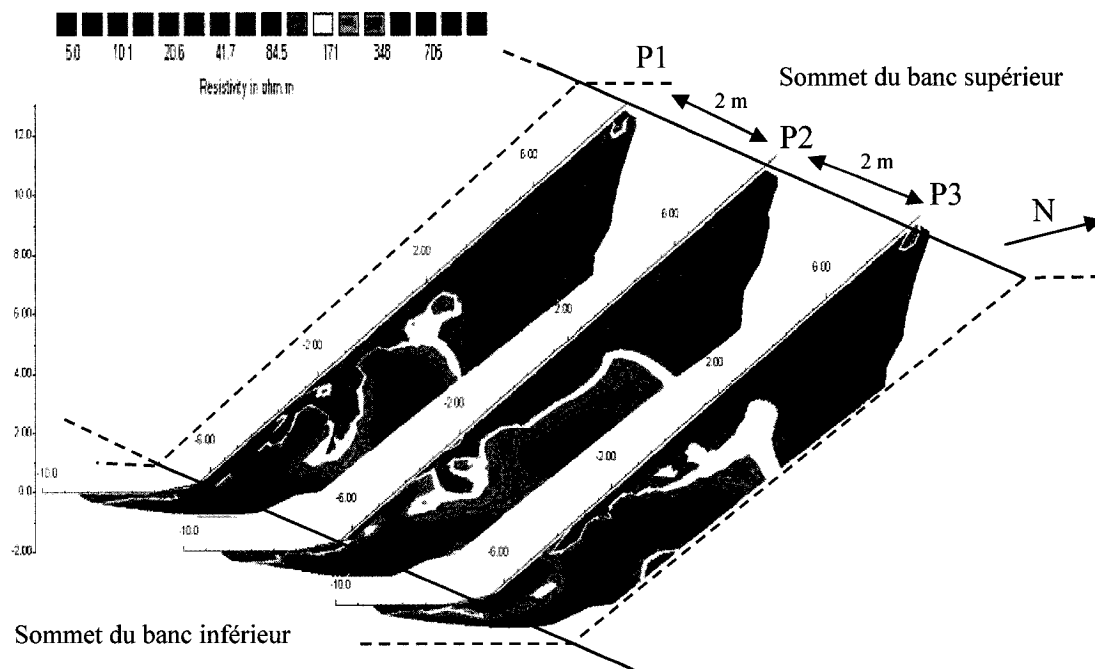


Figure 5.19 : Profils électrique réalisées sur le versant Sud du banc supérieur de la halde. Les profils sont espacés d'environ 2 m.

Afin d'apporter des informations complémentaires sur la structure des pentes, le profil P3 a également été investigué par méthodes électromagnétiques. La planche de données géophysiques présentée sur la figure 5.20 permet de comparer et de corréler les mesures EM31 (a), radar (b) et électrique (c). Le profil de résistivité présenté en a) a été obtenu avec le EM31 en mode horizontal (cf. § 2.2.3.2) Dans ce cas, les valeurs de résistivité mesurées correspondent à la résistivité moyenne des stériles intégrée entre 0 et 3 m de profondeur environ. Les tendances observées sur ce profil corroborent les résultats obtenus par la méthode électrique à savoir une augmentation de la résistivité

du haut vers le bas de la pente. Une forte anomalie résistive est aussi observée au sommet de la pente. Elle est associée au talus de sécurité composé de stériles grossiers. Sur la section radar (b), des réflecteurs peuvent être distingués entre 0 et 2 m de profondeur. Ces réflecteurs indiquent la présence de stratifications sub-parallèles à la ligne de pente et n'avaient pas été identifiées avec la méthode électrique. Par ailleurs, l'amplitude des réflexions est atténuée dans une zone schématisée par des pointillés sur la *figure 5.20*. Cette zone est corrélée à l'anomalie conductrice mise en évidence sur les profils a) et c). D'après l'équation 11, le signal est d'autant plus atténué que le milieu est saturé (en eau minéralisée). La zone où le signal radar est atténué correspondrait donc à une zone où la capacité de rétention d'eau est plus importante.

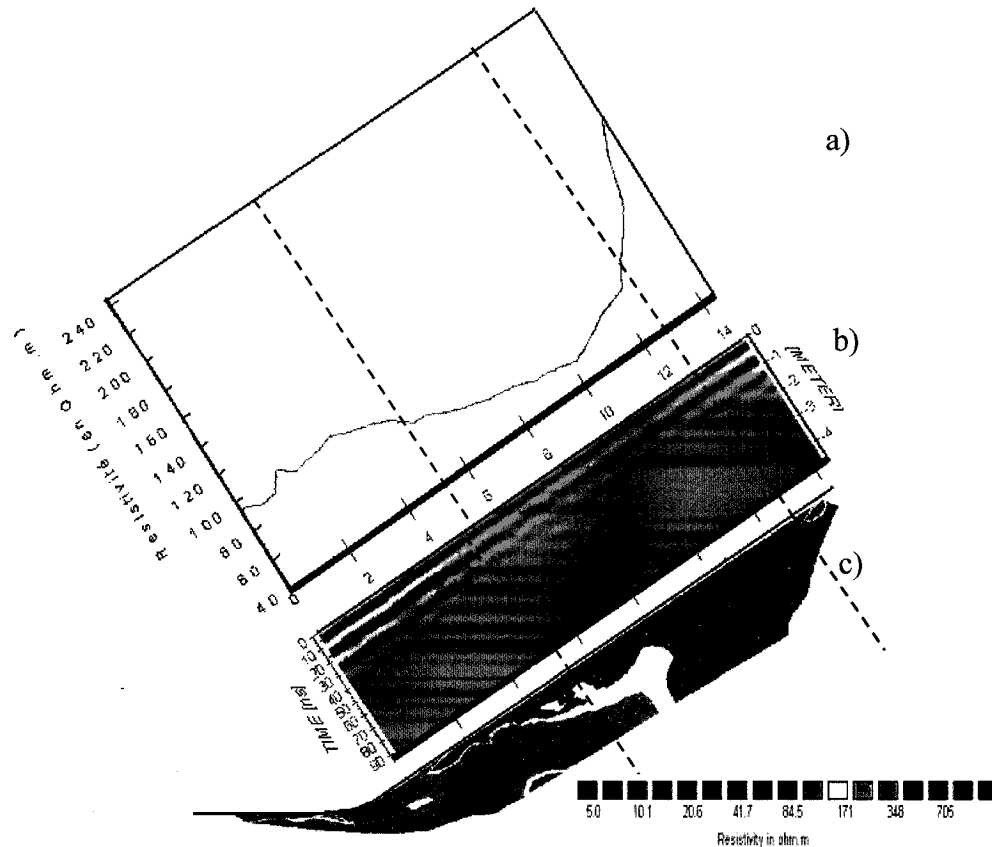


Figure 5.20: Mesures géophysiques réalisées dans la pente le long du profil P3. a) Profil de résistivité obtenu avec le EM31 (mode horizontal). b) Section radar (100 MHz). c) Section électrique.

5.2.2 Essai d'infiltration

Un essai d'infiltration d'une durée de 1h30 a été réalisé le long du profil P2. Le but de cet essai était d'étudier l'influence de l'infiltration d'eau sur la signature électrique des stériles afin de mieux caractériser la structure et les écoulements d'eau dans les pentes. Le profil P2 a été choisi pour des raisons logistiques. En effet, pour réaliser le test d'infiltration, un tuyau perforé a été déployé dans la pente et a été fixé aux montants en bois reliant les deux échelles. Le dispositif d'arrosage est montré sur la *figure 5.21*.



Figure 5.21: Arrosage uniforme des pentes à l'aide d'un tuyau perforé.

Une section électrique a été réalisée après l'infiltration d'eau le long du profil P2. La *figure 5.22* présente la réponse électrique obtenue avant (a)) et après l'infiltration d'eau (b)). Les deux sections ont été réalisées à l'aide du logiciel RES2DINV (cf. § 2.1.3.1) avec des paramètres d'acquisitions identiques (cf. *Tableau 4.4*).

En comparant la section b) à la section a), des variations de résistivités apparaissent, notamment au milieu de la pente (entre 5 m et 12 m environ). Dans cette zone, une anomalie plus conductrice parallèle à la ligne de pente peut être mise en évidence.

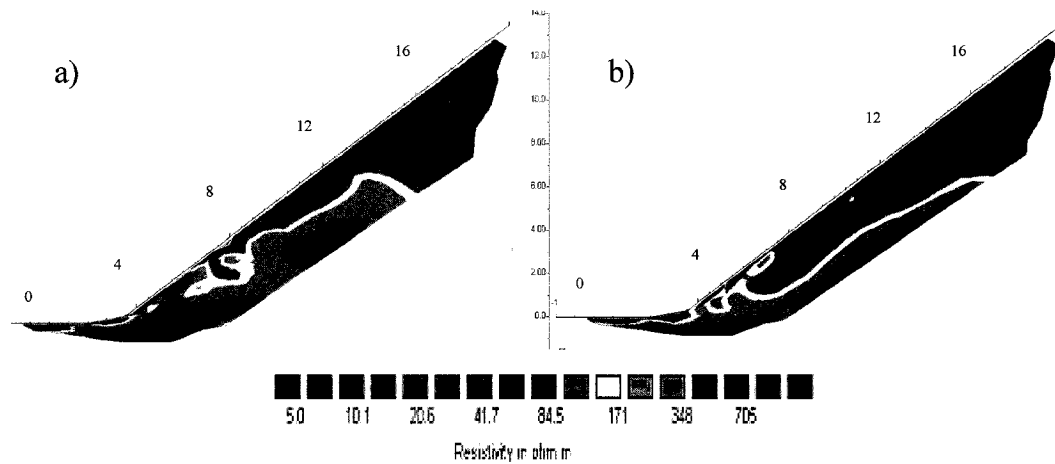


Figure 5.22: Section électrique réalisée avant (a)) et après (b)) l'essai d'infiltration

Les résultats obtenus peuvent être analysés en termes de variation de la teneur en eau volumique. A partir de l'équation 2.5, il est en effet possible d'établir une relation entre la variation de la teneur en eau et le rapport des résistivités avant et après l'infiltration d'eau. En considérant comme hypothèses simplificatrices que le milieu étudié ne contienne pas (ou peu) d'argile, que la porosité et que la résistivité de l'eau interstitielle n'évoluent pas durant tout l'essai d'infiltration, cette relation s'exprime sous la forme simplifiée suivante.

$$(\rho_H/\rho_S)^{0.5} = \theta_S/\theta_H \quad (\text{Équation 5.3})$$

Avec : ρ_H = Résistivité électrique mesurée après infiltration d'eau ($\Omega.m$)

ρ_S = Résistivité électrique mesurée avant infiltration d'eau ($\Omega.m$)

θ_S = Teneur en eau volumique avant infiltration (%)

θ_H = Teneur en eau volumique après infiltration (%)

En utilisant l'équation 5.3, la variation de la teneur en eau volumique a ainsi pu être cartographiée. Les quatre sections de la *figure 5.23* présentent les zones où la teneur en eau volumique a respectivement augmenté (a)), de plus de 20 % (b)), de plus de 40 % (c)) et de plus de 55 % (d)) pour une porosité constante.

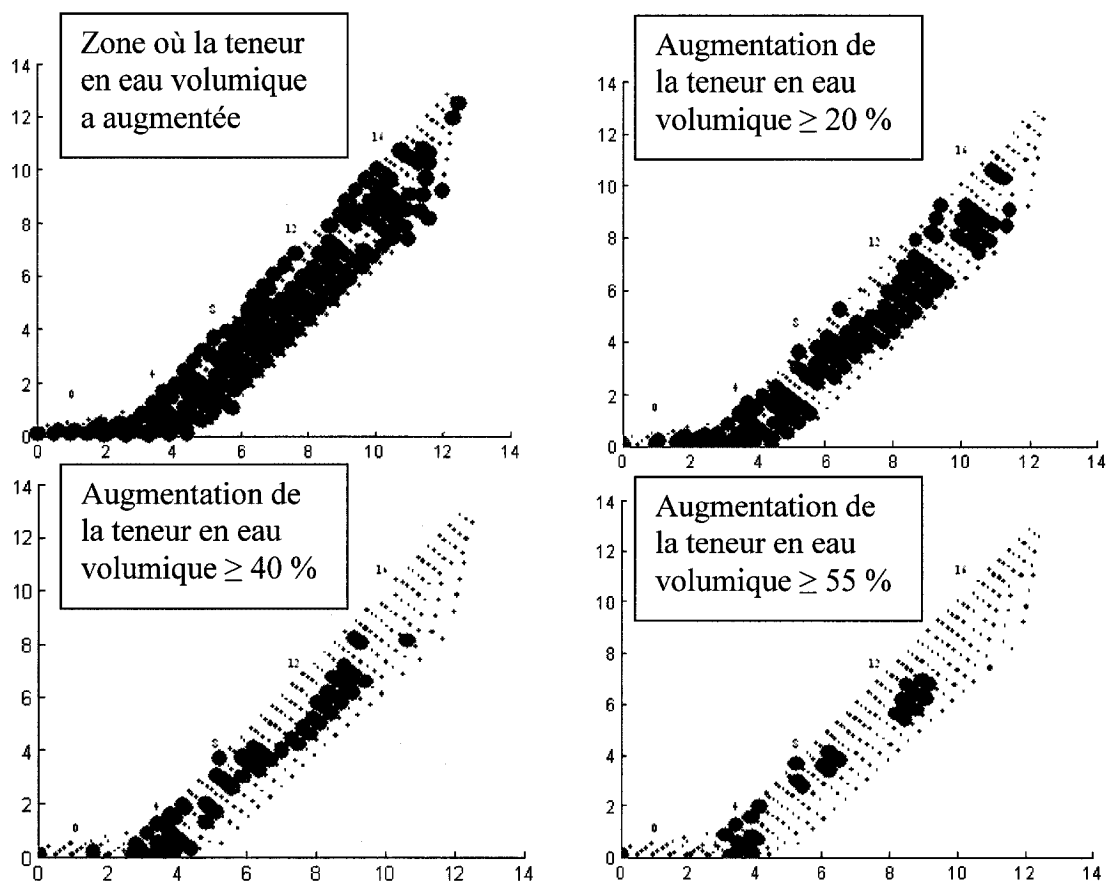


Figure 5.23: Les zones en vert correspondent à une augmentation du degré de saturation en eau (a)), de plus de 20 % (b)), de plus de 40 % (c)) et de plus de 55 % (d))

La *figure 5.23 a)* indique que l'essai d'infiltration a provoqué une augmentation quasiment générale de la teneur en eau volumique dans la pente. Seul le sommet de la

pente ne présente pas une augmentation significative de teneur en eau. Les stériles fins situés dans cette zone étaient déjà probablement saturés en eau.

Les *figures 5.23 b) c) et d)* montrent que l'augmentation de la teneur en eau s'est principalement produite à mi-pente (entre 5 et 13 m environ) suivant un plan pseudo parallèle à la ligne de pente. Ceci révèle d'une part la présence de stratifications pseudo parallèles à la pente qui sont probablement liées au mode de déposition par déversement en crête et d'autre part que les stériles situés dans cette zone ont une capacité de rétention d'eau importante et sont généralement peu saturés.

La brisure de pente associée au pied du banc supérieur de la halde semble aussi être une zone d'accumulation préférentielle. Cette zone d'accumulation peut être attribuable à l'interface entre les stériles grossiers du bas de la pente et les stériles compactés situés en surface du banc inférieur (qui est une voie de circulation de la machinerie). Il est cependant possible que la zone mise en évidence ne soit qu'un artéfact numérique lié à l'inversion des mesures électriques dans les zones où le changement de topographie est fort.

5.2.3 Synthèse des résultats pour les pentes

Les résultats issus des mesures géophysiques ont permis de mettre en relation la structure et les propriétés hydrogéologiques des stériles dans les pentes. Au niveau structural, les mesures ont montré la présence d'une ségrégation granulométrique importante et la présence de stratifications obliques pseudo-parallèles à la ligne de pente. Ces résultats tendent à valider le modèle conceptuel de construction présenté sur la *figure 1.5*. Le test d'infiltration a par ailleurs permis de montrer que les structures distinguées ont une influence importante sur l'accumulation d'eau dans les pentes (à court terme). Dans le sommet de la pente, la faible évolution de la teneur en eau volumique indique la présence de stériles fins (donc peu perméables) avec une forte capacité de rétention d'eau. Cette zone potentielle d'accumulation d'eau est attribuable à la ségrégation granulométrique. Une zone de drainage préférentiel parallèle à la

surface a aussi été distinguée dans le milieu de la pente. Cette zone est attribuable au mode de construction produisant des stratifications obliques de matériaux grossiers et plus fins. Il est difficile de statuer sur l'influence de la brisure de pente en base de banc sur l'augmentation de la teneur en eau volumique (réelle ou problème lors de l'inversion numérique).

5.3 Levés en forages

Les résultats géophysiques présentés dans ce paragraphe sont adaptés des mesures réalisées par Sébastien Vallières et du traitement et de l'interprétation de Dubreuil-Boisclair (2006) et Gloaguen et al., (2006). Les mesures géophysiques présentées sont aussi corrélées avec des analyses géochimiques sur les carottes de forage. Une interprétation conjointe des résultats sera réalisée. La localisation et les paramètres d'acquisition des mesures géophysiques réalisées en forage sont respectivement présentés sur la *figure 4.4* et sur le *tableau 4.5*.

5.3.1 Description des résultats géophysiques

5.3.1.1 Système dipolaire fréquentiel

Les données de conductivité mesurées dans chaque forage à l'aide du conductivimètre EM39 ont été interpolées par krigeage en utilisant un modèle de covariance anisotrope (les logs de conductivité sont présentés en annexe 2 sur le CD ROM). Du fait de la structure conceptuelle plutôt tabulaire de la halde (cf. *Figure 1.5*) ce modèle attribut plus d'importance aux variations verticales qu'aux variations latérales de conductivité (Dubreuil-Boisclair, 2006; Gloaguen et al., 2006). La *figure 5.24* présente le résultat de l'interpolation. Deux zones peuvent principalement être distinguées.

La première zone correspond à l'épaisseur du banc supérieur ($z = 0-12$ m) et présente de faibles valeurs de conductivité (inverse de la résistivité). Hormis une couche conductrice (pointillés) comprise entre 5 et 7 m (~ 20 mS/m ou ~ 50 Ω .m), les valeurs observées sont généralement inférieures à 5 mS/m (ou > 200 Ω .m). Ce résultat est cohérent avec la zone résistive mise en évidence dans la portion Ouest du banc supérieur (cf. § 5.1.1). Cependant, les conductivimètres sont peu sensibles à de faibles variations de conductivité quand le milieu est très résistif (cf. § 2.3). Les faibles contrastes de conductivité observés dans cette zone ne seraient donc pas représentatifs

d'un milieu « électriquement homogène », mais témoigneraient plutôt d'une zone plus résistive.

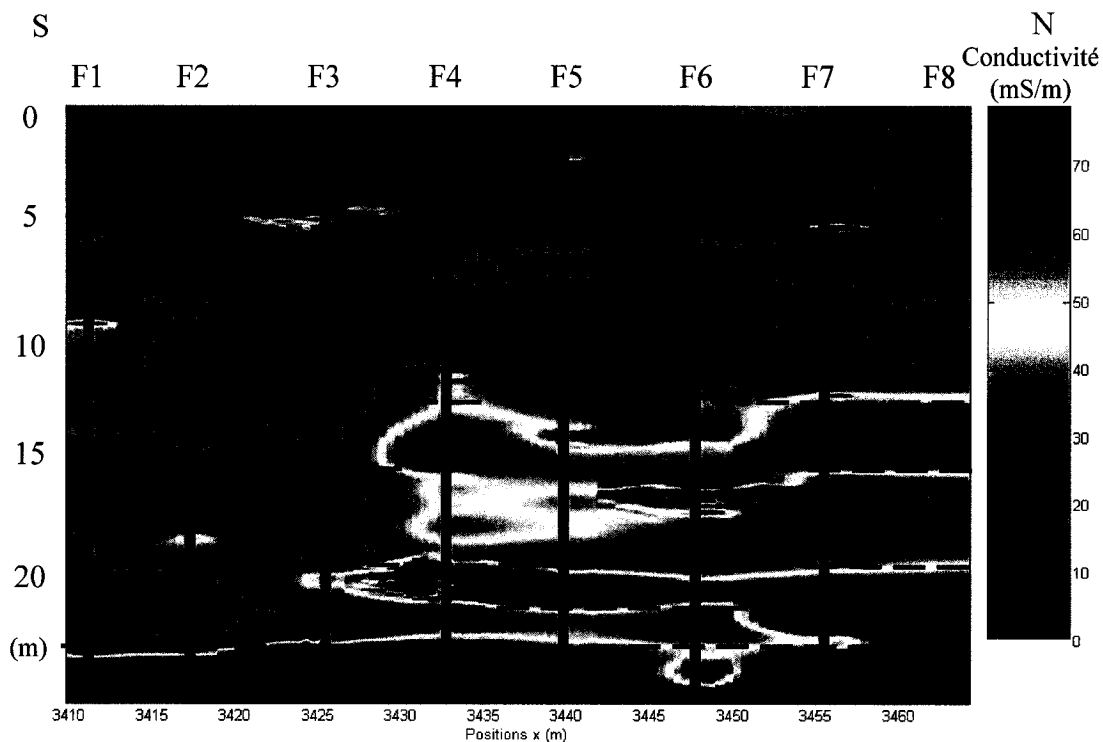


Figure 5.24: Conductivités électriques krigées entre les huit forages (Tiré de Dubreuil-Boisclair, 2006). Les pointillés noirs correspondent aux limites approximatives des couches mises en évidence.

Au delà de 12 m de profondeur, une seconde zone peut être mise en évidence. Celle-ci correspond au banc inférieur de la halde. Cette zone présente une alternance de couches conductrices (> 70 mS/m) et résistives (< 20 mS/m) entre les forages F3 et F7. Ces couches sont schématisées par des pointillés sur la figure 5.24. Les couches conductrices sont localisées entre 12-15 m, 19-21 m et au delà de 23 m. Comparées aux zones résistives, les couches conductrices peuvent être associées à des stériles plus fins, compactés et avec une capacité de rétention d'eau plus importante. Ce résultat vient renforcer l'hypothèse selon laquelle la structure et la nature du banc inférieur s'apparente à celle de la portion Est du banc supérieur (cf. § 5.1.3, *Hypothèse N°3*). De plus, la forte anomalie conductrice située au delà de 23 m de profondeur semble

indiquer que l'interface entre le bas de la halde et le substratum est une zone d'accumulation d'eau. A l'abord des pentes, entre les forages F1 et F3, le milieu est généralement résistif et peut être associée à la présence majoritaire de stériles plus grossiers accumulés lors de déversements en crête successifs.

5.3.1.2 Radar

La *figure 5.25* présente les résultats des mesures de radar en forages, en terme de vitesse de propagation des ondes. Sachant que la vitesse des ondes radar est fonction de la constante diélectrique (équation 2.13) qui est elle même reliée à la teneur en eau (équation 2.14), il est ainsi possible de considérer que la vitesse des ondes radar est d'autant plus faible que la capacité de rétention d'eau est importante.

D'importants contrastes de vitesses sont identifiables sous la forme de stratifications obliques (pointillés) entre les forages F1 à F3 et de stratifications sub-horizontales entre les forages F3 et F7. Les zones de faible vitesse peuvent être assimilées à des zones électriquement conductrices où la capacité de rétention d'eau est supérieure à celle des zones de forte vitesse.

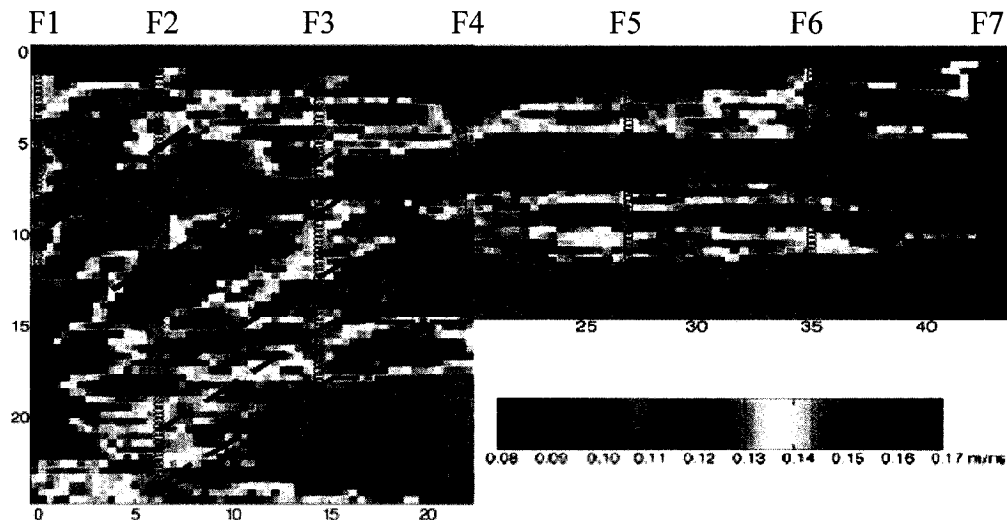


Figure 5.25: Réponse radar obtenu à partir des mesures entre forages (Adapté de Gloaguen et al., 2006). Les pointillés correspondent aux limites approximatives des couches mises en évidence

Des stratifications obliques peuvent être mises en évidence entre les forages F1 et F3, ce qui renforce le résultat de l'essai d'infiltration dans les pentes (cf. § 5.2.2). En effet, les déversements en crête induisent des stratifications aux abords des pentes. De plus, l'anomalie de forte vitesse observée proche du forage F1 ($z = 12-23$ m) serait attribuable à la présence de stériles grossiers accumulés en base de pente.

A noter que les acquisitions dans les forages F4, F5, F6 et F7 ont été limitées à 12 m de profondeur. La raison est présentée dans le paragraphe suivant (cf. § 5.3.2.1).

Les stratifications sub-horizontales observées entre les forages F3 et F7 indiquent que le cœur de la portion résistive de la halde est composé d'une alternance de couches. Les couches de faible vitesse (couches conductrices) sont localisées entre 5-7 m, 12-15 m et 19-22 m. Ce résultat est principalement mis en évidence entre F3 et F4. Ces couches seraient associées à des matériaux plus fins ayant une capacité de rétention d'eau importante. Ces résultats tendent à corroborer les résultats obtenus avec le EM39. Il semble par ailleurs que le radar ait une bonne capacité de détection des structures dans la portion résistive, ce qui n'était pas le cas avec le EM39.

Proche de la surface ($z = 0-2$ m), une anomalie de fortes vitesses peut aussi être observée. Elle correspond au signal radar qui se propage plus rapidement dans l'air ($v=0,3$ m/ns) que dans le sol et qui emprunte le chemin le plus rapide conformément au principe de Fermat (Berryman, 1989).

Remarques : Aucune mesure de radar en forage n'a été réalisée dans le forage F8 du fait de sa profondeur limitée (~ 5 m). De plus, le traitement et le mode de représentation des données présentés sur la *figure 5.25* sont disponibles dans Gloaguen et al. (2006) et dans Giroux et al. (2007).

La présence de couches sub-horizontales déduites des observations sur la *figure 5.25* semble contredire l'hypothèse selon laquelle les stériles ont été déposés d'Ouest en Est par déversement successif dans les pentes, induisant des stratifications obliques dans la portion résistive de la halde. La présence de stratifications sub-horizontales dans cette

portion de la halde n'est toutefois pas incompatible, en tenant compte de l'orientation Sud-Nord des forages (cf. *Figure 4.4*). En combinant ces informations, les stratifications sub-horizontales qui apparaissent entre les forages F3 et F7 correspondraient au recoupement de structures inclinées vers l'Ouest par le plan formé par les forages. Le schéma suivant (*Figure 5.26*) permet d'expliquer la structure tabulaire obtenue entre les forages F3 et F7 tout en tenant compte du pendage des couches vers l'Ouest.

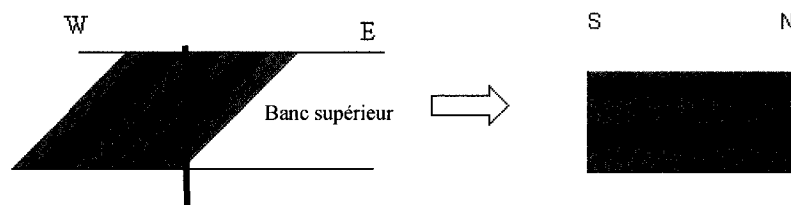


Figure 5.26: Schématisation de l'influence de l'orientation des profils sur la réponse obtenue. Les structures inclinées dans un plan W-E apparaissent sub-horizontales dans un plan N-S.

5.3.2 Résultats complémentaires

5.3.2.1 Obstruction des trous de forages

La profondeur d'investigation dans les forages F4, F5, F6 et F7 a été limitée à environ 12 m, soit proche de la frontière entre les deux bancs. Dans ces quatre forages, le dispositif radar s'est en effet heurté à une limite qui obstruait le trou. Un objet de petite taille (dummy : 21 cm de long et diamètre ~37 mm) a été utilisé pour tenter de caractériser cette « barrière ». Il a atteint le fond des trous de forages. Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette obstruction au passage des antennes radar.

D'une part, le tubage de ces forages a pu être soumis à des contraintes plus élevées à la limite entre les deux bancs. En tenant compte des dimensions importantes des antennes de radar en forage, soit environ 1.35 m de long et 45 mm de diamètre (cf. *Figure 4.2*), il est possible qu'une faible déformation des parois du tubage (diamètre intérieur ~ 48

mm) ait empêché le passage des antennes. D'autre part, des suintements (particules fines et fluides) le long des forages (tubages crépinés) et la formation de précipité proche de l'interface entre les deux bancs peuvent être à l'origine de obstruction ayant empêché le passage des antennes radar.

5.3.2.2 Analyses géochimiques

Dans un milieu aussi hétérogène que les haldes à stériles, il est très difficile de récupérer des carottes de forages complètes. Les segments de carottes recueillis sont composés de matériaux parfois massifs (au milieu d'un bloc), parfois très fins et peu cohérents rendant le positionnement exact des échantillons imprécis. Une analyse mégascopique des huit carottes de forage réalisée par Dubreuil-Boisclair (2006) témoigne de cette complexité. Cette analyse est présentée sur le CD ROM en annexe 2. Dans le présent mémoire, l'analyse DRX et l'analyse du potentiel de génération d'acide de six échantillons ont néanmoins été réalisées. Trois échantillons ont été prélevés dans le forage F3 à des profondeurs d'environ 2 m, 8 m et 22 m; un échantillon a été prélevé dans le forage F4 à environ 16 m de profondeur; deux échantillons ont été prélevés dans le forage F6 à environ 12 m et 22 m de profondeur. Le *tableau 5.7* présente la teneur en pyrite, en gypse et les deux critères ABA (cf. § 1.2.2) pour chaque échantillon.

Tableau 5.7: Principaux résultats des analyses géochimiques réalisées sur les six échantillons prélevés dans les forages (adapté des données fournies par Villeneuve, M., URSTM).

Forage	Profondeur (m)	% Pyrite	% Gypse	PNN	Ratio (PN/PA)
F3	~2	1,01	5,17	20,3	4,1
	~7	0,31	1,81	-2,0	0,8
	~22	1,87	2,08	-11,5	0,49
F4	~16	0,65	3,03	-1	0,9
F6	~11	30,18	0,75	-400,1	0
	~22	2,35	0,74	-33,3	0,04

La figure 5.27 est une représentation schématique de la teneur en pyrite (a)), en gypse (b)), du 1^{ier} critère ABA (c)) et du second critère ABA (d)) présentés dans le tableau 5.7. Pour chaque résultat, le panneau des conductivités krigées entre les huit forages (cf. Figure 5.24) apparaît en « filigrane » pour sous-tendre l'interprétation.

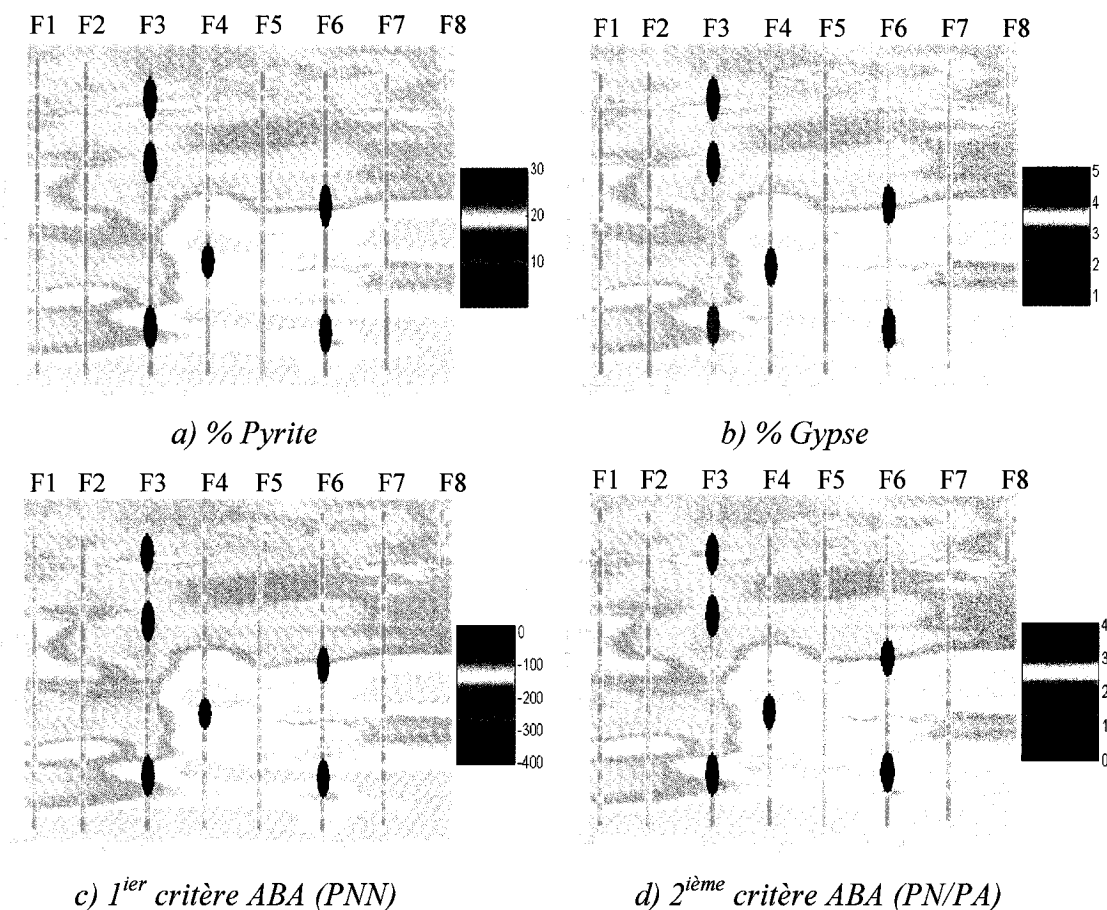


Figure 5.27: Représentation des analyses géochimiques réalisées dans les forages a) Teneur en pyrite, b) Teneur en gypse, c) 1^{ier} critère ABA, d) 2^{ème} critère ABA.

Sur la figure 5.27 a), les teneurs en pyrite les plus élevées semblent souvent associées aux couches conductrices, principalement pour $z \sim 11$ m (dans F6) et pour $z \sim 22$ m (dans F3 et F6). Les teneurs en gypse représentées sur la figure 5.27 b) correspondent généralement aux valeurs obtenues dans la tranchée Ouest ($< \sim 2\%$) (cf. Figure 5.10).

Deux zones présentent une teneur en gypse plus élevée, soit pour $z = \sim 2$ m (dans F3) et $z = \sim 16$ m (dans F4), indiquant un état d'oxydation avancé. La faible teneur en pyrite également observée dans ces deux zones, associée à des potentiels de génération d'acide faible (cf. *Tableau 5.7*), semble indiquer qu'une partie de la pyrite a été consommée pendant les réactions d'oxydation et que le potentiel de génération d'acide a été limité. À noter ici que ces deux zones semblent correspondre à deux poches conductrices localisées qui pourraient être associées à deux lentilles de roches stériles de granulométrie plus fine.

Finalement, il semble que le potentiel de génération d'acide soit important à l'interface entre les deux bancs ($z = \sim 11$ m). Il serait aussi généralement plus important dans le banc inférieur que dans le banc supérieur. Bien que ces résultats semblent coïncider avec l'hypothèse N°3 (cf. § 5.1.3), il semble raisonnable de n'accorder qu'un poids mineur à ces mesures dans l'interprétation générale, compte tenu de la faible quantité de matériaux échantillonnés et de l'imprécision liée au positionnement de ces échantillons dans les forages.

CHAPITRE 6. ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus sur les trois zones investiguées de la halde ont été présentés en détail dans la partie précédente. Une bonne corrélation a pu être observée entre les réponses géophysiques et les résultats complémentaires issus des mesures hydrogéologiques, géotechniques et géochimiques. En s'appuyant sur l'utilisation conjointe de ces résultats et des hypothèses émises au chapitre précédent, on peut tenter de reconstituer un scénario de construction de la halde avec la structure interne qu'elle a pu engendrer.

6.1 Analyse et modèle structural proposé

Dans un premier temps, le banc inférieur de la halde semble avoir été construit suivant un schéma qui pourrait correspondre à des déversements à la benne avec régallage (free-dumping) et à la benne traînante (drag-line) (cf. § 1.3.2) ayant produit des compactions différentielles sub-horizontales au sein du banc. Par la suite, les stériles ont probablement été entassés selon un mode de déversement similaire à partir de la rampe d'accès, formant dans la portion Est, un « banc supérieur Est ».

La portion Ouest du banc supérieur aurait été construite dans un troisième temps avec des stériles différents (provenant d'une autre zone d'extraction par exemple) et un mode de déversement différent. Il semble que les stériles aient été déversés d'Est en Ouest depuis les crêtes du banc supérieur « primitif ». Le « feuillet conducteur » mis en évidence par les mesures géophysiques (cf. § 5.1.1) pourrait correspondre à un amas de stériles de type « banc supérieur Est » déversé au cours de la construction de la portion Ouest.

En compilant toutes les informations structurales et les propriétés des stériles mis en évidence dans le chapitre 5, il est possible de générer un modèle général approximatif de la structure interne de la halde associé au scénario de construction proposé ci-dessus. Le modèle bidimensionnel a été réalisé à l'aide du logiciel RES2DMOD (cf. § 2.1.4.2).

Il est présenté sur la *figure 6.1* et correspond à une coupe Ouest-Est de la halde, d'une longueur de 160 m, soit la longueur des profils électriques longitudinaux (cf. § 5.1).

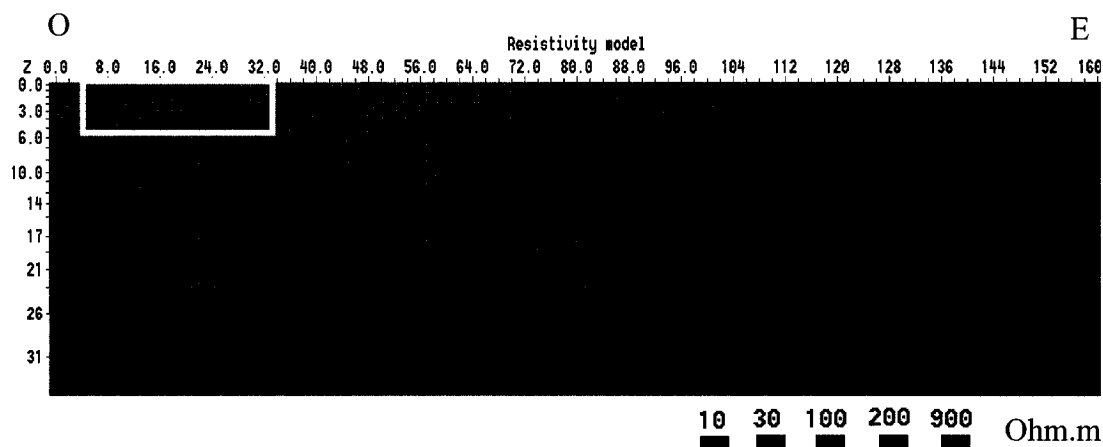


Figure 6.1 : Modèle électrique de la structure interne de la halde. L'aire géophysique (cf. Figure 3.4) est représentée en jaune, et les couches résistives déterminées par les mesures en forages sont présentées en rouge.

Ce modèle met en évidence l'alternance de couches conductrices (10 Ohm.m) et résistives (100 Ohm.m) distinguées dans le banc supérieur Est à l'aide des mesures de surface et dans les tranchées (cf. § 5.1) et dans le banc inférieur à l'aide des mesures en forage (cf. § 5.3). Les couches conductrices sont associées aux couches les plus denses et/ou compactées à granulométrie plus fine.

Dans la portion Ouest du banc supérieur, le modèle présente de grandes stratifications obliques composées de stériles grossiers (900 Ohm.m) et de stériles plus fins (200 Ohm.m) résultant de la ségrégation granulométrique induite par des déversements en crête successifs. Par ailleurs, la résistivité du feuillet conducteur (X=50 m) serait de l'ordre de 30 Ohm.m.

Pour rendre compte de l'hétérogénéité du milieu, certaines cellules ont aussi été affectées de valeurs de résistivité très dissemblables de la résistivité de la zone dans laquelle elles sont situées.

Le modèle de la structure interne proposé présente également la localisation de l'aire géophysique (en jaune) (cf. *Figure 3.4*) et les couches résistives mises en évidence par les mesures en forage (en rouge) (cf. *Figure 5.24*).

La réponse électrique du modèle présenté sur la *figure 6.1* a été déterminée à l'aide de RES2DMOD. Un jeu de données synthétiques a été obtenu en considérant les mêmes paramètres d'acquisition que ceux utilisés lors des mesures réelles sur les profils L1 à L4 (cf. *Tableau 4.3* et *figure 4.4*), soit une configuration dipôle-dipôle et un espacement inter-électrodes de 2 m. Les données synthétiques ont ensuite été inversées à l'aide du logiciel RES2DINV (cf. § 2.1.3.1). Le résultat de l'inversion des données synthétiques est présenté sur la *figure 6.2 a)* et est comparé avec l'inversion des données réelles le long du profil L2 (*Figure 6.2 b)*).

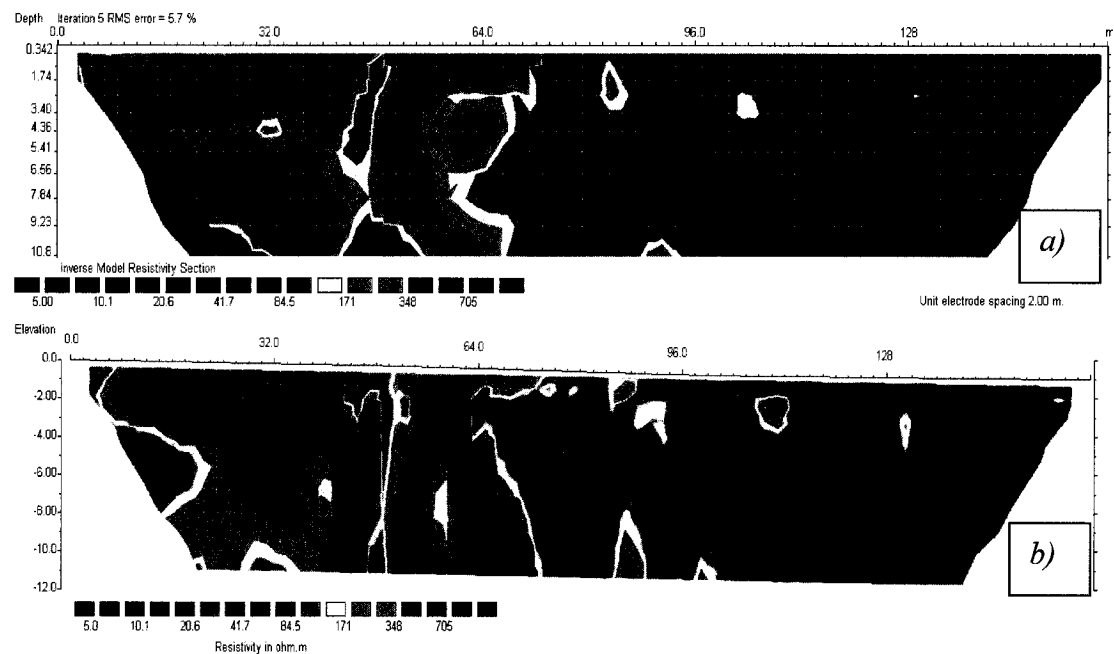


Figure 6.2: a) Données synthétiques inversées (issues du modèle structural présenté sur la figure 6.1) et b) Données réelles inversées (profil L2, cf. Figure 5.1).

Une assez bonne corrélation peut être observée entre les données réelles et les données synthétiques issues du modèle structural proposé. Ceci laisse supposer que le modèle

structural proposé est représentatif. Il subsiste cependant des différences entre les deux réponses, car le modèle proposé est un modèle 2D simple qui ne prend en considération que les principales composantes de la structure interne de la halde. Il ne tient donc pas compte notamment de structures plus petites (hétérogénéités locales) et des variations latérales de résistivité pouvant avoir une influence sur la réponse électrique obtenue.

6.2 Discussion

Les différents résultats ayant menés à la conception du modèle structural proposé mettent en relief plusieurs informations importantes qui nécessitent d'être développées un peu plus dans cette partie.

Il apparaît d'abord essentiel de souligner qu'un problème mettant en relation des phénomènes hydriques et géochimiques dans un cadre structural aussi hétérogène et complexe qu'une halde, n'aurait pu être appréhendé sans l'utilisation conjointe de techniques de caractérisation différentes présentant chacune des avantages et des limitations. En se basant sur les essais réalisés et les résultats obtenus dans cette étude, ce paragraphe traitera de la qualité et de la validité des méthodes géophysiques utilisées. Puis, un guide préliminaire de caractérisation systématique pour l'étude de futures haldes à stériles sera proposé.

6.2.1 À propos des méthodes géophysiques

Il est d'abord important de mentionner que les anomalies distinguées par les différentes méthodes proviennent de la contribution de paramètres comme la teneur en eau, la composition chimique des stériles (et du bain électrolytique associé), la granulométrie, le taux d'oxydation, etc. Les valeurs de conductivité électrique mesurées correspondent toujours à l'influence combinée de ces paramètres. Cet effet intégrateur peut être conceptualisé comme une forme d'homogénéisation des propriétés structurales et physiques du milieu fortement hétérogène que représente la halde.

Les méthodes géophysiques utilisées dans cette étude ont chacune montré des points forts et des limitations. Ainsi, le système dipolaire fréquentiel (EM31) et la méthode électrique présentent l'avantage de pouvoir déterminer rapidement et à moindre coût (comparé à des forages), la distribution spatiale de la conductivité électrique qui peut être reliée à la teneur en eau, à la granulométrie, à la densité et à la nature des stériles (cf. *Tableau 5.6*). Les données acquises avec le EM31 présentent aussi l'avantage de ne pas nécessiter de traitement particulier. Les valeurs mesurées par le EM31 ne correspondent cependant qu'à une intégration des conductivités du sous-sol sur une profondeur de 3 m (mode horizontal) ou de 6 m (mode vertical) (cf. § 4.2.2.2) ce qui ne permet pas de distinguer des structures tabulaires fines ou des anomalies de petite taille comme il en existe dans les haldes (lentilles d'oxydation, stratifications sub-horizontales fines, etc.). Une autre limitation vient de la dynamique limitée des conductivimètres qui présentent un faible pouvoir de détection dans les zones fortement résistives (cf. *Figure 5.3*). Néanmoins, le EM31 apparaît comme un outil performant et efficace qui peut être utilisé pour réaliser une investigation préliminaire depuis la surface d'une halde afin de cartographier rapidement la distribution superficielle des propriétés physiques des stériles en présence.

Concernant la méthode électrique (avec le Lund Imaging System d'Abem, cf. § 4.2.1), deux atouts importants peuvent être cités : la possibilité d'obtenir des sections 2D de résistivité électrique (et éventuellement 3D) et l'adaptabilité des configurations d'électrodes pour des problèmes à géométrie variable. Dans cette étude, l'espacement inter-électrodes a été choisi en tenant compte des dimensions de la halde étudiée, permettant ainsi d'atteindre des profondeurs équivalentes à celle des bancs ou d'étudier l'influence des pentes. Cependant, même si l'augmentation de l'espacement inter-électrodes permet d'atteindre des profondeurs plus importantes (cf. *Figures 5.1* et *5.16*), la résolution est amoindrie du fait de la diminution de la densité de courant avec la profondeur (cf. *Figure 2.3*). Il en résulte de faibles contrastes de résistivité qui ne sont pas forcément représentatifs des structures sous-jacentes. Ce facteur limitatif rend

compte de l'effet intégrateur de la méthode électrique sur la géométrie du sous-sol et sur les valeurs de résistivités associées. Dans le cas d'une halde, où la structure interne joue un rôle important sur le transport des fluides, la méthode électrique doit donc être utilisée en établissant un compromis entre résolution et profondeur d'investigation.

Par ailleurs, le radar géologique de surface, comme l'avait déjà mis en évidence Poisson (2004), ne présente qu'un intérêt relatif vu le faible pouvoir de pénétration liée à la dissipation du signal générée par l'hétérogénéité du milieu. Sur la halde étudiée la profondeur maximale atteinte avec un radar de surface est d'environ 6 m (cf. *Figure 3.9 b*). En revanche, la tomographie de radar en forage a permis de passer outre les problèmes de perte de résolution avec la profondeur et d'évaluer la géométrie interne de la halde et indirectement, les propriétés physico-chimiques associées. Cette méthode présente donc un atout important pour la caractérisation des haldes. Les principales limitations de la méthode consistent dans les coûts liés à la mise en place des forages, le temps d'acquisition et dans le traitement coûteux en temps. Les résultats sont d'autant plus probants que la couverture des rais est dense. Il est donc important d'établir le meilleur compromis entre qualité des mesures et résolution voulue. A noter ici que, dans le cas de la halde étudiée, si des mesures EM et électriques couvrant la surface de la halde avaient été réalisées avant l'implantation des forages, ceux-ci auraient probablement été implantés selon un axe Ouest-Est plutôt que Nord-Sud. Le contraste de résistivité Ouest-Est aurait dans ce cas pu être étudié avec plus de détail.

6.2.2 Quelques lignes directrices pour la caractérisation des haldes à stériles

Le paragraphe précédent a montré que les techniques d'investigation géophysiques présentent de nombreux avantages pour obtenir de l'information sur la structure et les propriétés des matériaux constitutifs. Par sa capacité de détection relativement rapide et (quasi) non destructive, la géophysique peut représenter la première étape à conseiller pour la caractérisation d'une future halde.

Dans un premier temps, un système ne nécessitant pas de contact direct avec le matériau pourrait être préconisé. L'utilisation d'un système dipolaire fréquentiel de type conductivimètre pourrait être intéressant car il permet de cartographier rapidement la variabilité latérale des propriétés physique des stériles en présence. La gamme dynamique limitée des conductivimètres en zone fortement résistive contraint cependant la caractérisation à une première interprétation plus qualitative que quantitative. Une telle investigation présenterait néanmoins l'avantage de ne pas nécessiter de traitement, ce qui permettrait de cibler et de définir rapidement les grandes structures superficielles. L'intégration des conductivités sur une profondeur de 6 m ne devrait servir que d'aperçu à des mesures ultérieures. Un système comme le EM31 offre une profondeur d'investigation limitée (6 m en mode vertical) qui peut être suffisant dans le cas d'une petite halde comme celle étudiée dans ce mémoire. Un conductivimètre de type EM34 (Geonics Ltd.) pourrait être utilisés en complément pour investiguer rapidement des haldes plus imposantes. Avec un EM34, la profondeur d'investigation pourrait être supérieure à 10 m.

Suivrait ensuite une investigation électrique en forme de grille, implantée stratégiquement à partir des mesures EM et utilisant une configuration adaptée à la hauteur de la halde (cf. § 2.1). Ces mesures devraient permettre de distinguer les principales structures, (extensions latérale et verticale), et d'associer aux valeurs de résistivité obtenues, des a priori quant à la nature des matériaux constitutifs. Par exemple, les zones conductrices pourraient être associées à des stériles contenant une teneur en pyrite importante et/ou une teneur en eau importante liée à une granulométrie plus fine.

À partir de cette première caractérisation, l'utilisation de forage semble être nécessaire pour palier aux problèmes de perte de résolution avec la profondeur. Il a été vu dans ce mémoire que le radar géologique, utilisé en forage, présentait un fort intérêt pour caractériser la structure interne de la halde. Les forages devraient être positionnés stratégiquement, à partir d'une première caractérisation superficielle avec le EM et l'électrique, après une analyse détaillé de ces mesures.

L'utilisation des résultats géophysiques réalisés dans cet ordre, permettrait de déterminer par la suite des zones d'échantillonnage préférentiels, servant à définir le lien entre les réponses géophysiques observées et les propriétés physico-chimiques des stériles en présence. Cette étape est cruciale car elle permet dans un second temps de définir un modèle structural réaliste (géo-électrique dans le cas de cette étude, cf. *Figure 6.1*) de l'intérieur de la halde. Ce modèle ne peut être obtenu que par le couplage des différents résultats géophysiques « calibrés » par les résultats des analyses des échantillons en laboratoire.

De plus, des essais hydrogéologiques sont aussi nécessaires pour étudier le transport des fluides depuis la surface de la halde (Fala, 2007) et dans les pentes (cf. § 5.2.2).

La *figure 6.3* récapitule les différentes étapes qui pourraient être suivies pour la caractérisation d'une nouvelle halde.

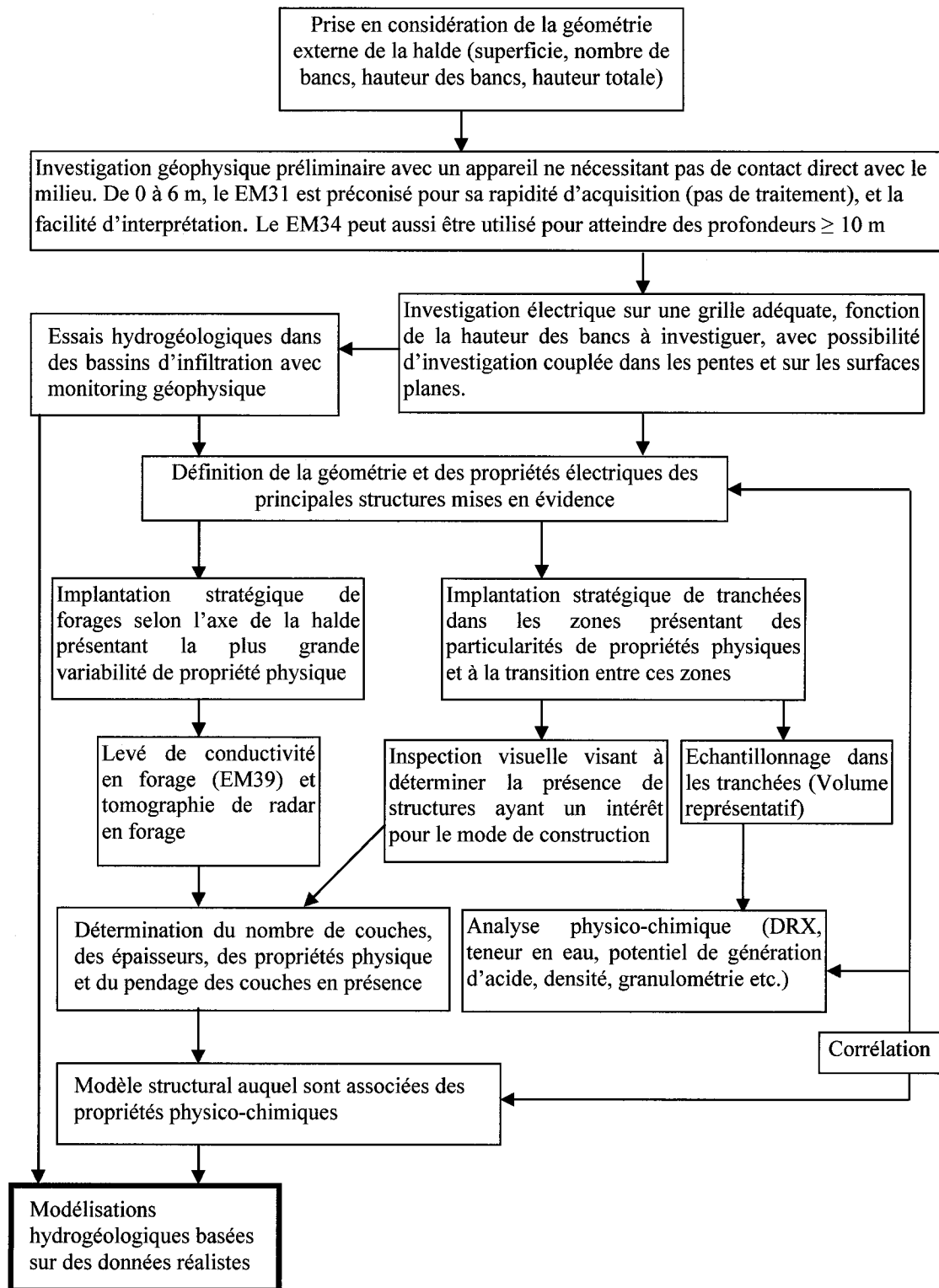


Figure 6.3 : Principales étapes suggérées pour caractériser une halde à stériles.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Une étude de caractérisation géophysique de la structure interne de la halde de la mine Laronde a été réalisée dans la continuité d'autres études menées depuis l'été 2002. Trois zones ont été investiguées à l'aide de la méthode électrique, du radar de surface et en forage et du système dipolaire fréquentiel.

La première zone d'investigation, correspondant au sommet du banc supérieur de la halde, a été étudiée à l'aide de la méthode électrique et du système dipolaire fréquentiel (EM31). Ces techniques ont permis d'identifier des zones présentant de forts contrastes de conductivité électrique, notamment entre la portion Ouest et la portion Est de la halde. Des stratifications ont également été observées dans la portion Est du banc supérieur avec la méthode électrique.

Des investigations ont ensuite été réalisées dans les pentes du banc supérieur avec la méthode électrique, avec le EM31 et le radar de surface. Ces mesures ont montré la présence de stratifications obliques quasi-parallèles à la pente. Un essai d'infiltration a aussi permis d'étudier l'influence des pentes sur les écoulements d'eau en réalisant un monitoring d'infiltration avec la méthode électrique. Ce test a notamment permis de distinguer des zones préférentielles d'accumulations d'eau orientées selon des plans parallèles à la ligne de pente.

Des mesures de conductivité en forage avec le EM39, et des mesures de radar en forage (dans 8 forages) ont aussi permis de déterminer avec plus de précision la structure interne de la portion Ouest de la halde. Ces résultats ont montré distinctement une alternance de couches sub-horizontales dans le cœur de la halde et des structures inclinées aux abords des pentes, validant ainsi le modèle conceptuel initialement proposé (cf. *Figure 1.5*).

Ces méthodes ont été corrélées avec des résultats hydrogéologiques, géochimiques et géotechniques issus d'échantillonnage dans trois tranchées. La mise en commun des différents résultats a permis d'établir de nombreux liens entre les anomalies géophysiques déterminées, le mode de construction de la halde et les propriétés physiques et chimiques des stériles déposés. Les zones électriquement conductrices ont

ainsi pu être associées à une capacité de rétention d'eau importante, une granulométrie étalée avec une importante fraction de particules fines et la présence non négligeable de minéraux acidogènes. Des échantillonnages additionnels peuvent être suggérés afin d'appuyer les corrélations mises en évidence entre les propriétés géophysiques et hydrogéologiques des stériles.

À partir des différents résultats obtenus, un scénario de construction de la halde est proposé, indiquant une évolution dans le mode de construction de la halde dans la portion Ouest du banc supérieur. Ces résultats ont montré l'influence du mode de construction de la halde sur la réponse géophysique obtenue et indirectement sur les propriétés hydrogéologiques des stériles. En combinant tout les résultats, un modèle simple de la structure interne de la halde a finalement été établi et validé (en partie) par la modélisation et l'inversion des données électriques. À l'aide d'un tel modèle et de la loi d'Archie (cf. § 2.1.2.5), il est alors possible d'attribuer à chaque valeur de résistivité, des propriétés hydrogéologiques moyennes et d'établir un modèle hydrogéologique simple de la halde. Le modèle hydrogéologique défini peut alors être utilisé pour réaliser des simulations d'écoulement en milieu non saturé à l'aide de logiciels de modélisations hydrogéologiques adéquats. Une étude préliminaire visant à montrer le lien possible entre les investigations géophysiques et la modélisation hydrogéologique est présentée sur le CD ROM en annexe 2. Dans cette étude préliminaire, le logiciel de modélisation par éléments finis HYDRUS 2D a été utilisé. Les résultats des simulations mettent en évidence différents phénomènes hydrogéologiques ayant un impact potentiel sur la production de DMA (chemins d'écoulement préférentiel en rupture de pente, accumulation d'eau dans les matériaux les plus fins, effet de barrière capillaire). Une autre retombée de la présente étude est l'application des techniques géophysiques étendues à d'autres problèmes d'environnement minier. Une étude a notamment été réalisée en parallèle à ce projet pour montrer l'intérêt et le potentiel des méthodes électrique et radar pour la caractérisation des couvertures à effets de barrière capillaire (CEBC). De plus amples informations à ce sujet sont disponibles dans Maqsoud et al. (2006).

BIBLIOGRAPHIE

ANNAN, P., 2005. *GPR methods for hydrogeological studies*; in Hydrogeophysics, Edited by Yoram Rubin and Susan Hubbard; Springer, Netherlands, 185-213.

ANNAN, P., 2001. *GPR workshop notes*. Sensors and Softwares inc.

AUBERTIN, M., BUSSIERE, B., BERNIER, L., 2002a. *Environnement et gestion des rejets miniers*. [CD-ROM]. Montréal : Presses internationales Polytechnique.

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

BALANIS, C.A., 1989. *Advanced Engineering Electromagnetics*. Edited by John Wiley and Sons.

BARBOUR, S.L., HENDRY, M.J., SMITH, J.L., BECKIE, R.D., WILSON, G.W., 2001. *A research partnership program in the mining industry for waste rock hydrology*. Workshop, University of Saskatchewan, Canada.

BERRYMAN, J.G., 1989. *Fermat's principle and nonlinear travel time tomography*. Physical Review Letters, 62 , 2953-2956

CAMPBELL, D.L., FITTERMAN, D.V., 2000. *Geoelectrical methods for investigating mine dumps*. ICARD 2000 – Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, p.1513-1523.

CAMPBELL, D.L., HORTON, R.J., BISDORF, R.J., FEY, D.L., POWERS, M.H., FITTERMAN, D.L., 1999. *Some geophysical methods for tailings/mine waste rock*. Tailings and Mine Waste '99 p.35-43.

CAMPOS, D., CHOUTEAU, M., AUBERTIN, M., BUSSIERE, B. 2003. *Using geophysical methods to image the internal structure of mine waste rock piles*. Conférence présentée au symposium EEGS, Prague, 2003.

CAMPOS, D., 2004. *Une étude de caractérisation de la structure interne d'une halde à stériles par méthodes géophysiques*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

CHOUTEAU, M., POISSON, J., AUBERTIN, M., CAMPOS, D., 2005. *Internal Structure And Preferential Flow Of A Waste Rock Pile From Geophysical Surveys*; SAGEEP2005, 18th Annual Meeting of the EEGS, Atlanta, Ge., April 2-7, 2005

DANIELS, J.J., ALLRED, B., BINLEY, A., LABRECQUE, D., ALUMBAUGH, D., 2005. *Hydrogeophysical case studies in the vadose zone*; in Hydrogeophysics, Edited by Yoram Rubin and Susan Hubbard; Springer, Netherlands, 413-440.

DINGMAN, S.L., 1994. *Physical Hydrology*. Prentice Hall.

DUBREUIL BOISCLAIR, C., 2006. *Caractérisation de la halde à stérile de la mine Laronde par tomographies radar et diagraphies*. Projet de Fin d'Étude (PFE) en génie géologique, École Polytechnique de Montréal, Canada.

EM39 Operating manual, Geonics ltd

FALA, O., 2002. *Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

FALA, O., AUBERTIN, M., MOLSON, J.W., BUSSIÈRE, B., WILSON, G.W., CHAPUIS, R., MARTIN, V., 2003. *Numerical modeling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles*, In: Farrell, T. and Taylor, G. (Eds.), Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series 3/2003, pp 895-902.

FALA, O., 2007. *Une étude des conditions d'infiltration et d'écoulements non saturés dans les haldes à stériles*. Thèse de doctorat en génie minéral (à venir), École Polytechnique de Montréal, Canada.

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 en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

GIROUX, B., GLOAGUEN, E., CHOUTEAU, M., 2007. *bh_tomo - A Matlab borehole georadar 2D tomography package*. Computers and Geosciences, 33, 126-137, doi:10.1016/j.cageo.2006.05.014

GIROUX, B., GLOAGUEN, E., 2003. *Procédure d'acquisition et de traitement des données de radar en forage*, Rapport technique LGAP-2003-09, École Polytechnique de Montréal.

GLOAGUEN, E., 2004. *Reconstruction des images bidimensionnelles de levés de radar géologique en forage*. Thèse de doctorat en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

GLOAGUEN, E., MARCOTTE, D., GIROUX, B., DUBREUIL-B. C., CHOUTEAU, M., AUBERTIN, M., 2006. *Stochastic Borehole radar velocity and attenuation tomographies using cokriging and cosimulation*. J. Appl. Geophys., doi:10.1016/j.jappgeo.2006.10.001

HARDAGE, B.A., 1992. *Crosswell seismology and reverse VSP*. Geophysical Press.

LESMES, D., FRIEDMAN, S., 2005. *Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils*; in Hydrogeophysics, Edited by Yoram Rubin and Susan Hubbard; Springer, Netherlands, 87-128.

LOKE, M.H., 2002. *RES2DINV ver. 3.5, Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. User manual*.

LOKE, M.H., BARKER, R.D., 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44, 2, 131-152.

MAQSOU, A., BUSSIÈRE, B., MBONIMPA, M., AUBERTIN, M., CISSOKHO, F., ANTERRIEU, O., CHOUTEAU, M., 2006. *Suction break to control slope-induced effects in covers used as gas barrier*, submitted to Canadian geotechnical journal.

MARTIN, V., 2003. *Étude des propriétés non saturées des stériles miniers*. Mémoire de Maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

MC NEILL, J.D., 1980. *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Technical Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario.

MORIN, K.A., GERENCHER, E., JONES, C.E., KONASEWICH, D.E., 1991. Critical literature review of acid drainage from waste-rock. 193p. Rapport NEDEM 1.11.1.

NICHOL, C., 2002. *Transient flow and transport in unsaturated heterogeneous media : fiel experiments in mine waste rock*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, University of British Columbia, Canada

NOTES DE COURS : *Environnement minier et restauration de site* (cours GML6112, École Polytechnique de Montréal, Canada)

NOTES DE COURS : *Techniques géophysiques de haute résolution* (cours GML6201a, École Polytechnique de Montréal, Canada)

PHILIP, J.R., 1957. *The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations*. Soil Science. 84. 257-264.

PLANTE, B., 2005. *Comparaison des essais statiques et évaluation de l'effet de l'altération pour des rejets de concentrateur à faible potentiel de génération d'acide*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

POISSON, J., 2004. *Caractérisation géophysique d'une halde à stériles (Halde N°1, Mine Laronde)*. Rapport interne du laboratoire de géophysique de l'École Polytechnique de Montréal, Canada.

REYNOLDS, J.M., 1997. *An Introduction to applied and environmental geophysics*. Edited by John Wiley and Sons Ltd, England.

SANDMEIER K.J, 2002. *ReflexW : Processing software for propagative geophysical methods*. © Sandmeier Scientific Software, Kralruhe, Allemagne. Link : www.sandmeier-geo.de.

SMITH, B.D., CAMPBELL, D.L., WRIGHT, W.G., 2001. *Using resistivity to map acidic waters at the May Day mine dump*. Silverton, Colorado. Proc. SAGEEP 2001, 12 p.

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P., 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res., v.16, p. 574-582.

VILLENEUVE, M., 2004. *Évaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétiques*. Mémoire de maîtrise en génie minéral, École Polytechnique de Montréal, Canada.

ANNEXES

Annexe 1 : Valeurs de permittivité relative (ϵ_r) et vitesses des ondes radar associées pour différents matériaux fréquemment rencontrés dans la nature (Reynolds, 1997)

Table 12.3 Table of relative dielectric constants and radiowave velocities for a range of geological and man-made materials

Material	ϵ_r	V (mm/ns)
Air	1	300
Water (fresh)	81	33
Water (sea)	81	33
Polar snow	1.4–3	194–252
Polar ice	3–3.15	168
Temperate ice	3.2	167
Pure ice	3.2	167
Freshwater lake ice	4	150
Sea ice	2.5–8	78–157
Permafrost	1–8	106–300
Coastal sand (dry)	10	95
Sand (dry)	3–6	120–170
Sand (wet)	25–30	55–60
Silt (wet)	10	95
Clay (wet)	8–15	86–110
Clay soil (dry)	3	173
Marsh	12	86
Agricultural land	15	77
Pastoral land	13	83
Average 'soil'	16	75
Granite	5–8	106–120
Limestone	7–9	100–115
Dolomite	6.8–8	106–115
Basalt (wet)	8	106
Shale (wet)	7	113
Sandstone (wet)	6	112
Coal	4–5	134–150
Quartz	4.3	145
Concrete	6–30	55–112
Asphalt	3–5	134–173
PVC, Epoxy, Polyesters	3	173

Data from Johnson *et al.* (1979), McCann *et al.* (1988), Morey (1974), Reynolds (1990b, 1991b)

Annexe 2 : CD ROM joint (contient les analyses géochimiques réalisées dans les tranchées et dans les forages, les logs de conductivité EM39 en forage, les analyses mégascopiques des carottes de forage (tiré de Dubreuil-Boisclair, 2006) et une étude préliminaire visant à montrer le lien possible entre les investigations géophysiques et la modélisation hydrogéologique avec le logiciel HYDRUS 2D).

