

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CLASSIFICATION AUTOMATIQUE D'ANOMALIES MEGATEM DE TYPE
PLAQUE MINCE

MAXIME CLAPROOD
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)
OCTOBRE 2005



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: 978-0-494-18129-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-18129-4

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:

CLASSIFICATION AUTOMATIQUE D'ANOMALIES MEGATEM DE TYPE
PLAQUE MINCE

présenté par: CLAPROOD Maxime

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

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

M. MARCOTTE Denis, Ph.D, président

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

Mme CHENG Li Zhen, Ph.D, membre et codirectrice de recherche

M. KEATING Pierre, Ph.D, membre

Remerciements

Je tiens à prendre l'espace nécessaire pour remercier tous ceux m'ayant aidé sur ce projet de maîtrise. Mes remerciements les plus sincères vont à Michel Chouteau pour toute la confiance qu'il a eue en moi lors de la réalisation de ce projet. Son enthousiasme pour la recherche et son habileté à la transmettre font de lui un directeur de maîtrise hors-pair. Je tiens également à remercier tout le monde impliqué dans le projet MEGATEM ; soit Michel Allard, Denis Bois, Abderrezak Bouchedda, Li Zhen Cheng, Dave Fountain, Pierre Keating et Richard Smith. Ce fut pour moi une expérience des plus enrichissantes que de travailler au sein d'un groupe de recherche formé de gens aussi compétents et motivés. Je veux aussi remercier le groupe de recherche de CSIRO à Sydney pour nous avoir fourni les outils de modélisation électromagnétique, ainsi que pour leur support technique dans l'apprentissage du fonctionnement de ces programmes. Je remercie les Fonds québécois de recherche sur la Nature et les Technologie (FQRNT) pour leur soutien financier.

Je tiens aussi à remercier le groupe de géophysique de Polytechnique pour leur appui autant technique que personnel pendant ces dernières années. Un petit merci spécial à Erwan pour son aide en programmation, son support moral et pour avoir été mon souffre douleur préféré au "aki" pendant les heures du midi. Finalement, je veux remercier ma famille et mes amis, particulièrement mes colocataires Jean-Sébastien et Nicolas, pour avoir enduré mes frasques et pour leur support inconditionnel pendant la réalisation de ma maîtrise.

Résumé

Le système MEGATEM permet l'acquisition de données électromagnétiques dans le domaine temporel. Grâce à sa profondeur de pénétration et sa large empreinte au sol, il est très utile pour la recherche de gisements de sulfures massifs volcanogènes (VMS). Le projet "Valorisation de la technologie MEGATEM" étudie les possibilités du MEGATEM pour la découverte de dépôts de sulfures massifs en Abitibi.

La géologie des dépôts de sulfures massifs est assez complexe et peut générer des réponses très variées sur les levés MEGATEM. La variabilité des propriétés de ces gisements fait qu'il est difficile de détecter et d'estimer les propriétés des dépôts. La modélisation numérique d'anomalies MEGATEM de type plaque mince a permis de créer une banque de modèles qui sera utilisée pour l'étude d'une méthode de détection des anomalies et pour la création d'un système de classification automatique des anomalies.

La méthode de détection des anomalies étudiée se base sur les statistiques d'ordre supérieur. Une variance courante est calculée sur chaque ligne de vol. Ce cumulatif d'ordre deux permet la détection des variations des champs électromagnétiques dans l'espace. En comparant la variance courante à un niveau de bruit pré-déterminé, il est possible d'isoler certaines anomalies. Le détecteur permet de reconnaître certaines anomalies. Il est cependant très permissif et ne permet pas d'isoler les anomalies générées par les dépôts de VMS de certains modèles de bruit. Une amélioration du modèle serait d'analyser les décroissances des anomalies ainsi que leurs longueurs d'onde pour assurer une meilleure détection des anomalies de type plaque mince.

Une fois l'anomalie détectée et reconnue comme étant potentiellement un dépôt de

sulfures massifs, il faut estimer ses paramètres physiques ; soit le pendage, les dimensions, la profondeur et la conductance. La régression multi-linéaire pondérée permet de trouver les relations entre les attributs calculés sur les levés $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ et les propriétés des corps ayant généré ces anomalies. Seuls les corps de type plaque mince sont étudiés dans ce projet.

La banque de modèles créée permet de développer un système de classification à deux niveaux. En premier lieu, on estime le pendage des plaques minces. Selon le pendage obtenu, on redirige l'algorithme vers la bonne classe de modèles ($\theta = 90^\circ$, $\theta < 90^\circ$ ou $\theta > 90^\circ$) pour estimer les autres paramètres. Par le test d'ajout, on trouve les attributs ayant un impact significatif sur l'estimation des paramètres. On trouve ainsi que le $\log \frac{\partial b_{z_1} / \partial t}{\partial b_{z_2} / \partial t}$ a un impact prépondérant pour l'estimation du pendage. Les variations de la profondeur sont principalement dépendantes de $|EE_1 - EE_2|$ pour les plaques à pendages verticaux et de $|x_1(z) - x_2(z)|$ pour les autres corps. Comme prévu par la théorie, la constante de temps ($\log \tau$) explique la majorité des variations de la conductance. La longueur d'onde du module du champ électromagnétique total $|EE_1 - EE_2|$ permet d'expliquer en majeure partie les variations des dimensions des plaques minces.

Les résultats obtenus sur les tests numériques sont très encourageants. Le pendage est retrouvé avec une très grande précision. La profondeur est bien retrouvée, mais peut être sensible à certaines variations des autres paramètres. La conductance est bien retrouvée et permet d'obtenir une bonne idée de la qualité du conducteur. La taille de la plaque mince est le paramètre le moins bien estimé. L'estimation des dépôts de VMS dont nous connaissons les propriétés permet de statuer sur les performances du système de classification. En général, les estimations se rapprochent des valeurs réelles. Plusieurs variables peuvent expliquer les écarts entre les propriétés estimées et réelles. Les variations d'épaisseur du mort-terrain, la forme réelle du dépôt, la position de la ligne de vol par rapport au centre du corps sont des facteurs ayant un impact sur la qualité des prédictions.

Abstract

The MEGATEM system is used for acquisition of time-domain electromagnetic data. It is very useful for looking at volcanogenic massive sulphides (VMS) deposits because it has a great depth of penetration and a large footprint. The project “Valorization of MEGATEM Technology” studies MEGATEM possibilities to find VMS deposits in Abitibi.

Geology of VMS deposits is quite complex and can generate responses of various shapes on a MEGATEM profile. Detection of VMS deposits and estimation of their physical properties are quite difficult. Numerical modelling of MEGATEM anomalies was used to create a list of thin sheets models, representing VMS deposits. These models were used to study a method of detection of MEGATEM anomalies and to create a system of automatic classification of anomalies.

The method studied for detection of anomalies uses higher order statistics. A running variance is calculated on each flight line. This two-order cumulant detects variations of electromagnetic fields in space. We can isolate the anomalies by comparing the running variance to a noise threshold. Although the detector is effective to recognize certain anomalies, it is very permissive and many noise models are detected as well. We can improve the results of the detector by an analysis of the time decay and the wavelength of the anomalies.

Once the anomaly is detected and recognized as a massive sulphides deposit, we need to estimate its physical properties such as the dip, the dimensions, the depth and the conductance. Weighted multi-linear regression is used to find relations between attributes calculated on the $\partial b_x/\partial t$ and $\partial b_z/\partial t$ profiles and the properties of

the VMS deposit generating these anomalies.

This list of models allows the development of a two-levels system of automatic classification. First, the dip of the deposit is estimated. According to the dip value, we guide the algorithm toward the right class of models ($\theta = 90^\circ$, $\theta < 90^\circ$ or $\theta > 90^\circ$) to estimate the remaining parameters. By a stepwise selection, we find the attributes having a significative impact in estimating the properties. We find that $\log \frac{\partial b_{z1}/\partial t}{\partial b_{z2}/\partial t}$ has the greatest impact to estimate the dip of the sheets. Depth variations are mostly dependant on $|EE_1 - EE_2|$ for vertical dip and $|x_1(z) - x_2(z)|$ for other bodies. As expected, the time constant ($\log \tau$) explains most of the fluctuations in conductance. The wavelength of the total electromagnetic field $|EE_1 - EE_2|$ explains most of the variations of the thin sheets dimensions.

Results obtained on numerical tests are very encouraging. The dip is estimated with precision. Depth is well estimated, but can be sensitive to variations of other parameters. The estimated conductance is very well recovered and gives a good idea of the quality of the conductor. The dimensions of the body is the worst estimated property. The estimation of known VMS deposits allows to test the system of classification. Estimates are close to the real values. Among the variables explaining the discrepancies in the model, we underline the variations in overburden's parameters, the real shape of the deposits, and the position of the flight line in respect to the centre of the deposit.

Table des matières

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs	2
1.2 Méthodologie employée	3
1.3 Plan du mémoire	5
CHAPITRE 2 : THÉORIE DES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES TRANSITOIRES EN GÉOPHYSIQUE	6
2.1 Théorie de l'électromagnétisme	8
2.1.1 Équations de Maxwell	8
2.1.2 Équations d'onde et de diffusion	10
2.1.3 Vecteurs de polarisation	11

2.1.4	Potentiels de Schelkunoff	13
2.2	Méthodes TDEM en géophysique	15
2.2.1	Configurations possibles	21
2.2.2	Configuration MEGATEM	23
2.3	Application du MEGATEM à la recherche de gisements de sulfures massifs volcanogènes	25

CHAPITRE 3 : GÉOLOGIE ET MODÉLISATION TDEM DES GI- SEMENTS DE VMS 26

3.1	Géologie des dépôts de sulfures massifs volcanogènes	26
3.1.1	Mise en place des gisements VMS	26
3.1.2	Caractéristiques des principaux gisements	28
3.2	Modélisation des gisements de sulfures massifs volcanogènes	34
3.2.1	Méthodes de modélisation électromagnétique	36
3.2.2	Paramètres de modélisation	43
3.2.3	Outils de modélisation	45

CHAPITRE 4 : MODÈLES DE DÉTECTION DE SIGNAUX ET DE CLASSIFICATION DES ANOMALIES 48

4.1	Détection de signaux par statistiques d'ordre supérieur	48
4.1.1	Théorie de la détection de signal	49
4.1.2	Modèle de détection des anomalies MEGATEM	52
4.1.3	Tests de détection effectués sur des levés MEGATEM	54
4.1.4	Détection de dépôts de VMS connus	56
4.2	Classification automatique des anomalies MEGATEM par régression	57
4.2.1	Banque de modèles d'anomalies MEGATEM	57
4.2.2	Détermination des attributs sur les profils MEGATEM	59
4.2.3	Théorie de la régression multi-linéaire	61
4.2.4	Modèle final de régression multi-linéaire pondérée	68

CHAPITRE 5 : TESTS DU MODÈLE DE CLASSIFICATION AU- TOMATIQUE DES ANOMALIES 84

5.1	Tests sur modèles génériques de plaques minces	84
5.2	Tests pour déterminer les limitations du système de classification	85

5.3	Interprétation des tests numériques	87
5.3.1	Interprétation du pendage	87
5.3.2	Interprétation de la profondeur	87
5.3.3	Interprétation de la conductance	89
5.3.4	Interprétation de la taille	90
5.3.5	Tests de l'unicité des résultats	91
5.4	Tests sur données de terrain MEGATEM	93
CHAPITRE 6 : CONCLUSION		101
6.1	Discussion	101
6.1.1	Discussion de la détection des anomalies	101
6.1.2	Discussion de la classification des anomalies	102
6.1.3	Discussion du domaine d'application	104
6.2	Conclusion et recommandations	105
RÉFÉRENCES		107
ANNEXES		113

Liste des figures

2.1	Courant injecté, champs magnétiques primaire et secondaire horizontaux et leur dérivée	16
2.2	Flux de courant dans un conducteur sphérique à divers temps après la coupure du courant (d'après Nabighian (1991))	17
2.3	Représentation d'un système électromagnétique transitoire (d'après Nabighian (1991))	18
2.4	Système de filaments de courant équivalent après coupure du courant (d'après Nabighian (1979))	19
2.5	Filaments de courant équivalent pour un demi-espace conducteur (d'après Nabighian (1991))	20
2.6	Configurations des méthodes électromagnétiques transitoires aéroportées (d'après Nabighian (1991))	22
2.7	Le MEGATEM de Fugro Airborne Surveys	23
2.8	Schéma du MEGATEM	24
3.1	Étapes de formation d'un dépôt de sulfure massif volcanogène (d'après Simmons (1973))	28
3.2	Gisement de sulfure massif volcanogène typique en Abitibi (d'après Chartrand et Cattalani (1990))	29
3.3	a) Vue 3D du dépôt de ISO (d'après Telford et Becker (1979)) b) Vues de dessus et de face du dépôt de New Inco (d'après Telford et Becker (1979))	31
3.4	Vue de face de Gallen	33

3.5	a) Section verticale des lentilles L3 et L4 du dépôt d'Aldermac b) Section verticale de la lentille L8 du dépôt d'Aldermac (d'après Barrett <i>et al.</i> (1991))	34
3.6	Modèle de terrain général pour la formulation d'une solution TDEM numérique	38
3.7	Courant injecté et canaux de temps du MEGATEM pour une fréquence d'émission de 90Hz	44
4.1	Attributs calculés sur un levé MEGATEM	59
4.2	Histogrammes des attributs utilisés dans le système de régression	71
4.3	Schéma du système de classification des propriétés de dépôts de sulfures massifs de type plaque mince	72
5.1	Résultats du test d'unicité	93
5.2	Estimation des propriétés d'ISO, New Insco et Gallen	94
5.3	Estimation des propriétés d'autres gisements de sulfures massifs	98

Liste des tableaux

2.1	Propriétés du transmetteur du MEGATEM	24
4.1	Liste des modèles de plaques minces modélisés avec LeroiAir	58
4.2	Liste des propriétés à estimer (Variables Y de la régression)	69
4.3	Liste des attributs (Variables X de la régression)	70
4.4	Test d'ajout pour la propriété : pendage	73
4.5	Coefficients de la régression pour la propriété : pendage	73
4.6	Test d'ajout pour la propriété : profondeur	75
4.7	Coefficients de la régression pour la propriété : profondeur	76
4.8	Test d'ajout pour la propriété : conductance	78
4.9	Coefficients de la régression pour la propriété : conductance	79
4.10	Test d'ajout pour la propriété : taille	81
4.11	Coefficients de la régression pour la propriété : taille	82
5.1	Liste des modèles tests de plaques minces	85
5.2	Liste des modèles tests des limites du système de classification	86
5.3	Légende de la figure 5.2	95
5.4	Légende de la figure 5.3	97

Liste des annexes

ANNEXE A : TEST DE DÉTECTION DES ANOMALIES	113
A.1 Tests sur modèles numériques	114
A.2 Tests sur données MEGATEM	122
ANNEXE B : ANALYSE DES RÉGRESSIONS	133
B.1 Régression du pendage	134
B.2 Régression de la profondeur	137
B.3 Régression de la conductance	144
B.4 Régression de la taille	151
ANNEXE C : TESTS DU SYSTÈME DE CLASSIFICATION	158
C.1 Modèles tests du système de classification	159
C.2 Modèles tests des limites du système de classification	168
ANNEXE D : DISQUE : SCRIPTS MATLAB	174

Liste des sigles et abréviations

A	Vecteur de potentiel ; aire
α	Probabilité de détection
b	Coefficients de la régression
b_c	Coefficients de la régression du modèle complet
b_r	Coefficients de la régression du modèle réduit
b, B	Induction magnétique (T)
B_x	Composante horizontale de l'induction magnétique
B_y	Composante transversale de l'induction magnétique
B_z	Composante verticale de l'induction magnétique
<i>CSIRO</i>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
Cu	Cuivre
D_i	Influence d'une observation i
d, D	Courants de déplacement (C/m^2)
$\partial b_x / \partial t$	Dérivée de la composante horizontale du champ magnétique
$\partial b_y / \partial t$	Dérivée de la composante transversale du champ magnétique
$\partial b_z / \partial t$	Dérivée de la composante verticale du champ magnétique
e	Résidus ou erreurs de la régression
e_c	Résidus ou erreurs de la régression du modèle complet
e_r	Résidus ou erreurs de la régression du modèle réduit
e, E	Intensité du champ électrique (V/m)
E_e	Intensité du champ électrique de source électrique
E_m	Intensité du champ électrique de source magnétique
$E^{S,p}$	Intensité du champ électrique de la source ou primaire
$E^{I,s}$	Intensité du champ électrique induit ou secondaire

E_x	Composante horizontale de l'intensité du champ électrique
E_y	Composante transversale de l'intensité du champ électrique
E_z	Composante verticale de l'intensité du champ électrique
ϵ	Permittivité diélectrique (F/m)
EM	Électromagnétisme
f	Champ scalaire ou vectoriel inconnu ; erreurs pondérées
F	Statistique de Fisher
G	Fonction de Green
γ	Seuil de décision
H_0	Hypothèse nulle
H_1	Hypothèse alternative
h, H	Intensité du champ magnétique (A/m)
H_e	Intensité du champ magnétique de source électrique
H_m	Intensité du champ magnétique de source magnétique
$H^{S,p}$	Intensité du champ magnétique de la source ou primaire
$H^{I,s}$	Intensité du champ magnétique induit ou secondaire
H_x	Composante horizontale de l'intensité du champ magnétique
H_y	Composante transversale de l'intensité du champ magnétique
H_z	Composante verticale de l'intensité du champ magnétique
I	Intensité de courant électrique (A)
j, J	Densité de courant électrique (A/m^2)
$j, J^{S,p}$	Densité de courant de la source ou primaire
$J^{I,s}$	Densité de courant induit ou secondaire
J_e	Densité de courant électrique
J_m	Densité de courant magnétique
k	Nombre d'onde ; nombre de variables ajoutées du modèle réduit au modèle complet
L	Opérateur différentiel ; inductance ; critère de vraisemblance
M_{xy}	Couplage électromagnétique entre x et y
m, M	Polarisation magnétique
MWR	Méthode des résidus pondérés (Method of weighted residuals)
μ	Perméabilité magnétique (H/m)

μ_0	Perméabilité magnétique du vide
n	Nombre d'observations
ω	Fréquence angulaire
$p(x;H)$	Probabilité que x confirme l'hypothèse H
p	Nombre de variables dans la régression
P	Polarisation électrique
Q	Variables explicatives pondérées
r	Distance du point de mesure au point de référence (m)
r'	Distance de la source au point de référence (m)
r^2, R^2	Coefficient de corrélation
ρ	Densité de charges électriques
s	Terme source
SCE	Somme des carrés des erreurs
SCE_c	Somme des carrés des erreurs du modèle complet
SCE_r	Somme des carrés des erreurs du modèle réduit
SCT	Somme des carrés totale
SCT_m	Somme des carrés totale corrigée pour la moyenne
σ	Conductivité électrique (S/m) ; écart-type
σ_*	Conductivité électrique primaire
σ_a	Conductivité électrique anormale
σt	Conductance (S) (conductivité $\times$ épaisseur)
s_{xy}	Covariance entre les séries de données x et y
s^2	Variance
s_b^2	Variance des coefficients
t	Temps (s) ; paramètre de Student
$TDEM$	Électromagnétisme dans le domaine temporel
θ	Paramètre de temps ; pendage (°)
u_x	Vecteur unitaire dans la direction horizontale
u_y	Vecteur unitaire dans la direction transversale
u_z	Vecteur unitaire dans la direction verticale
V	Vecteur de potentiel
VMS	Sulfure massif volcanogène

w	Poids appliqués sur les variables de la régression
$\bar{x}$	Moyenne d'un échantillon
$\tilde{x}$	Médiane d'un échantillon
X	Variables explicatives de la régression (attributs)
X_c	Variables explicatives de la régression du modèle complet
X_r	Variables explicatives de la régression du modèle réduit
$\hat{y}$	Admittivité électrique
Y	Variables à expliquer (propriétés)
Y_c	Variables à expliquer du modèle complet
Y_r	Variables à expliquer du modèle réduit
Z	Variables à expliquer pondérées ; profondeur
$\hat{z}$	Impédance électrique
Zn	Zinc

Chapitre 1

Introduction

Les méthodes électromagnétiques (EM) en géophysique sont utilisées pour la recherche d'objets électriquement conducteurs dans le sous-sol terrestre. La propagation dans le sol d'un champ électromagnétique primaire provenant d'une source artificielle ou naturelle est contrôlée par la distribution de la résistivité du milieu. Lorsqu'un corps conducteur est présent, un champ électromagnétique secondaire est induit et peut être détecté par les appareils géophysiques. Les gisements de métaux, tels que les gisements de sulfures massifs volcanogènes, sont des cibles de choix pour les méthodes électromagnétiques car ils conduisent bien l'électricité.

La région de l'Abitibi dans le nord-ouest du Québec, regorge de dépôts de sulfures massifs mis en place suite aux grands épisodes de volcanisme qu'a subi la région pendant la période archéenne. Ces dépôts de sulfures massifs d'origine volcanique peuvent contenir de grandes quantités de cuivre, de nickel et autres métaux. Ils ont une grande valeur économique. Les gisements de sulfures massifs volcanogènes (VMS) peuvent générer un champ électromagnétique secondaire important lorsqu'ils sont soumis à un champ primaire. Plusieurs méthodes électromagnétiques en géophysique existent pour enregistrer les variations du champ électromagnétique causées par ces dépôts métalliques. Les méthodes aéroportées sont principalement utilisées lors d'une première approche de reconnaissance. Elles permettent de reconnaître les zones possédant un potentiel de minéralisation. Lorsque des signatures sur les levés semblent indiquer la présence de dépôts métalliques, des méthodes EM au sol ou en forage

peuvent être déployées pour permettre une meilleure caractérisation du milieu.

Le projet “Valorisation de la technologie MEGATEM” entrepris par l’Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) étudie les possibilités du système MEGATEM afin de détecter et de caractériser les dépôts de sulfures massifs volcanogènes en Abitibi. Le MEGATEM est un appareil permettant l’acquisition de données électromagnétiques dans le domaine temporel et est utilisé dans la phase initiale pour la reconnaissance de gisements potentiels. Dans le cadre de ce projet, quelques milliers de kilomètres de données ont été acquis en Abitibi, Québec. Trois sites tests ont été survolés de façon systématique, soit les sites de ISO/New Inco, Gallen et Aldermac. Ces zones de tests permettent de mieux caractériser l’appareil et les réponses électromagnétiques qui y sont associées.

Plusieurs acteurs font partie de ce projet entrepris par l’UQAT. Le MEGATEM est une marque enregistrée de la compagnie Fugro Airborne Surveys, mandatée pour effectuer les levés géophysiques. Les données sont acquises pour Noranda, division de la compagnie minière Falconbridge. L’UQAT coordonne le projet, étudie la géologie du terrain et effectue des recherches géophysiques sur le projet. L’École Polytechnique de Montréal est responsable du traitement géophysique des données. Ce mémoire traite d’un outil de détection d’anomalies MEGATEM, et se concentre davantage sur la description d’un système permettant la classification automatique de ces anomalies.

1.1 Objectifs

Deux objectifs principaux se dégagent du projet présenté. Premièrement, il y a la partie détection des anomalies. Un levé MEGATEM contient une quantité imposante de données, rendant l’interprétation peu conviviale. La méthode de détection d’anomalies MEGATEM se base sur une interprétation visuelle de la part du géophysicien. Celui-ci doit regarder les données attentivement et localiser les zones où le signal semble indiquer un champ électromagnétique anormal. Ce traitement visuel est long et pénible à effectuer dû à la quantité de données provenant d’un levé MEGATEM.

Il est important de détecter rapidement et efficacement les anomalies pouvant provenir d'un gisement de sulfures des anomalies causées par du bruit électromagnétique. Il ne s'agit pas simplement de détecter tout changement dans le champ EM. Il faut pouvoir séparer les sources anormales afin de restreindre le traitement subséquent aux dépôts de VMS. On veut éviter de traiter inutilement les anomalies causées par d'autres sources conductrices. Il faut également s'assurer qu'aucune anomalie représentant un dépôt de VMS n'est oubliée. Différentes méthodes existent pour accomplir cette détection ; les statistiques d'ordre supérieur (variance, cumulants...), les moyennes courantes et les ondelettes en sont quelques exemples. La méthode des statistiques d'ordre supérieur est ici privilégiée car son développement mathématique est bien connu, est relativement simple à mettre en place et donne d'excellents résultats.

Une fois l'anomalie détectée, elle doit être interprétée. Il faut déterminer les paramètres physiques du gisement causant cette anomalie. Quelles sont ses dimensions, sa profondeur, sa conductance, son pendage ? Les propriétés physiques du dépôt de VMS permettent d'évaluer le potentiel d'exploitation du dépôt. La forme et l'amplitude des réponses MEGATEM varient selon les propriétés physiques du VMS, compliquant l'interprétation d'un levé MEGATEM. Une méthode de classification automatique des anomalies, selon les propriétés physiques des dépôts de VMS, est développée dans le cadre de cette maîtrise et aide à l'interprétation. Cette méthode permet d'estimer avec précision les propriétés d'un dépôt de sulfures massifs volcanogènes selon des attributs calculés à partir d'un levé MEGATEM. Cette partie du projet représente l'objectif principal du projet dont il est question dans ce mémoire. Encore ici, une panoplie de méthodes existent afin d'accomplir cette tâche. La régression multi-linéaire, les réseaux de neurones et les ondelettes sont parmi les méthodes potentiellement applicables. La régression multi-linéaire a été utilisée.

1.2 Méthodologie employée

La première étape du projet consiste à trouver une méthode de détection des anomalies sur un levé MEGATEM. Le MEGATEM enregistre tout élément électriquement conducteur à proximité de la source d'ondes. Il faut séparer efficacement les anomalies

provenant de gisements de sulfures des autres anomalies considérées comme du bruit sur un levé. Utilisant le logiciel MATLAB, la méthode de détection utilisée pour ce projet calcule une variance courante sur chaque ligne de vol. À chaque position de mesure, on obtient une mesure de la variabilité de la réponse électromagnétique dans l'espace immédiat de ce point. Une augmentation de la variance est une bonne indication de la présence d'une anomalie. On repère l'anomalie et on regarde brièvement certaines caractéristiques de cette anomalie pour reconnaître les anomalies de type plaque mince. Celles-ci seront analysées plus en détails par le système de classification automatique des anomalies.

Une fois l'anomalie détectée et la source reconnue comme étant un gisement de sulfures massifs volcanogènes, il faut estimer les propriétés physiques de ce gisement. Voici brièvement la méthodologie employée afin de parvenir à cette fin.

Une étude des gisements de VMS connus en Abitibi est conduite afin de prendre connaissance des valeurs possibles des propriétés physiques de ces dépôts. Les dimensions, la profondeur, le pendage et la conductivité du corps sont les propriétés d'un gisement de VMS que l'on cherche à estimer. Des modèles numériques sont ensuite créés afin de représenter au mieux le modèle géologique de ces gisements. Le logiciel de modélisation doit générer avec précision les modèles géophysiques des dépôts de VMS. De nombreux modèles ont été créés avec l'algorithme LeroiAir et la configuration MEGATEM, permettant d'obtenir la signature MEGATEM de ces modèles.

La prochaine étape est de déterminer les attributs des levés modélisés jouant un rôle significatif dans l'estimation des paramètres des modèles. Une fois ces attributs déterminés et calculés pour tous les modèles, une régression multi-linéaire pondérée a été effectuée afin de trouver les relations linéaires reliant les attributs des levés et les propriétés physiques des gisements. Utilisant les relations de régression ainsi obtenues, un modèle final de classification automatique des anomalies MEGATEM a été développé. Les calculs de ces dernières étapes se font à l'aide du logiciel MATLAB. La qualité de la classification est tout d'abord testée sur des modèles génériques. D'autres modèles numériques sont aussi générés afin de tester les limites du modèle

de classification. Finalement, des données de terrain provenant de sites bien connus ont été utilisées pour les derniers tests.

1.3 Plan du mémoire

Le présent mémoire est divisé en six chapitres incluant l'introduction. Le chapitre deux présente les bases théoriques des méthodes électromagnétiques en géophysique. La théorie de l'électromagnétisme y est brièvement exposée, avec un accent marqué sur les méthodes électromagnétiques dans le domaine temporel et le MEGATEM. Le troisième chapitre décrit la géologie de l'Abitibi et caractérise les gisements de sulfures massifs volcanogènes qu'on recherche avec le MEGATEM. Ce chapitre expose brièvement les bases des méthodes de modélisation en électromagnétisme. Le chapitre suivant décrit en détails les algorithmes des systèmes de détection et de classification automatique des anomalies. Le chapitre cinq décrit les tests effectués sur le système de classification, autant sur des modèles numériques que sur les cas réels de gisements de sulfures massifs. Finalement, le chapitre six rassemble l'important de l'information, fait une brève discussion sur les résultats et dresse les principales conclusions.

Chapitre 2

Théorie des méthodes électromagnétiques transitoires en géophysique

Les méthodes électromagnétiques en géophysique utilisent les propriétés de conductivité (ou de résistivité) du sous-sol afin d'en déduire la géologie. Les valeurs de résistivité électrique sont comprises sur plusieurs échelles de grandeur. Il est donc relativement aisé de déterminer les contrastes de résistivité à partir d'un levé électromagnétique. Les méthodes EM sont utilisées pour plusieurs types d'application ; la recherche de métal sur une plage, la détection d'intrusions d'eau saline près des côtes, la recherche de gisements de métaux ou des études théoriques sur la conduction du manteau terrestre.

Les méthodes géophysiques se servent de différentes configurations pour prendre des mesures de champs électromagnétiques. Toutes utilisent une source d'onde électromagnétique se propageant dans le sol. Cette source peut être de nature artificielle ou naturelle. Toutes les méthodes possèdent un ou des récepteurs permettant la mesure du champ électrique ou magnétique. La configuration de l'appareil, la fréquence d'émission, le type de source EM et le type de courant injecté sont des paramètres pouvant varier selon l'appareil utilisé. Plusieurs auteurs ont fait des études comparatives entre les différentes méthodes et les configurations existantes. Par

exemple, McCracken *et al.* (1986a) compare les résultats obtenus par les méthodes électromagnétiques dans le domaine des fréquences et dans le domaine du temps. Dans un article conjoint, McCracken *et al.* (1986b) étudie le bruit pouvant affecter la lecture d'un champ électromagnétique. Liu et Asten (1992) effectue une étude comparative entre les méthodes électromagnétiques au sol et aéroportées.

On parle de méthodes électriques si un courant électrique direct (fréquence nulle) est injecté dans le sol. Les méthodes électromagnétiques utilisent un courant variant dans le temps comme onde initiale et induisent un champ électromagnétique dans le sol selon les lois de Maxwell. Un courant électrique variable induit un champ magnétique lui aussi variable dans le temps. Cette variation du champ magnétique crée des courants électriques secondaires (courants de Foucault) dans les corps conducteurs, qui à leur tour induisent un champ magnétique secondaire. La définition de courants secondaires est bien expliquée dans Hanneson et West (1984). Flis *et al.* (1989) étudie la différence entre les courants de déplacement et les courants provenant de l'induction magnétique. Les différentes composantes des champs magnétiques primaire et secondaire sont recueillies par un ou des récepteurs et sont analysées par le géophysicien.

Il existe deux grandes classes de méthodes électromagnétiques, les méthodes fréquentielles et les méthodes transitoires ou temporelles. Les méthodes fréquentielles utilisent un champ primaire de type sinusoïdal. La lecture du champ est effectuée en présence du courant initial. Les champs primaire et secondaire sont donc enregistrés simultanément, ce dernier comptant pour une très faible proportion du champ primaire.

Une méthode efficace permettant d'isoler le champ secondaire induit est de travailler dans le domaine temporel. Un champ primaire est généré pendant un certain temps et est ensuite coupé pour une durée fixe. Les données sont recueillies pendant la coupure du courant initial, période appelée temps mort. Elles sont exemptes du champ primaire et permettent une plus grande précision sur les données enregistrées. À chaque position de mesure, des valeurs enregistrées à différentes périodes de temps

sont acquises et permettent d’analyser la variation du champ magnétique secondaire en fonction du temps.

Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel se fait à l’aide des transformées de Fourier. Pour l’écriture, une convention est utilisée pour indiquer si on travaille dans le domaine fréquentiel ou temporel. Les lettres minuscules sont utilisées lorsque les termes sont écrits dans le domaine du temps et les lettres majuscules sont employées pour le domaine fréquentiel.

Le MEGATEM fonctionne dans le domaine temporel. Avant de décrire les caractéristiques de l’appareil, les bases des méthodes électromagnétiques en géophysique sont exposées. Les différentes configurations des méthodes électromagnétiques dans le domaine temporel sont ensuite décrites, pour terminer le chapitre avec le MEGATEM et son application pour la recherche de gisements de sulfures massifs.

L’information de ce chapitre est en grande partie tirée des volumes *I* et *II* d’Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, soit Nabighian (1987) pour la théorie électromagnétique et Nabighian (1991) pour les méthodes électromagnétiques transitoires. Plusieurs auteurs ont étudié la propagation des ondes électromagnétiques dans le domaine temporel. Nabighian (1979) fut le premier à introduire le concept des ronds de fumée (“smoke rings”) pour décrire les ondes EM se propageant dans un demi-espace de conductivité homogène. Hoversten et Morrison (1982) et Wang (2002) ont étendu l’étude à des milieux stratifiés et des milieux anisotropes.

2.1 Théorie de l’électromagnétisme

2.1.1 Équations de Maxwell

La théorie de l’électromagnétisme se base sur les équations de Maxwell. Ce sont des équations différentielles du premier ordre, non-couplées, indiquant les relations

entre les différentes composantes des champs électromagnétiques.

$$\nabla \times \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} = \mathbf{j} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho \quad (2.4)$$

- $\mathbf{e}$ est le vecteur d'intensité du champ électrique en volt par mètre (V/m),
- $\mathbf{b}$ est le vecteur d'induction magnétique en Tesla (T) ou weber par mètre carré (Wb/m^2),
- $\mathbf{h}$ est le vecteur d'intensité du champ magnétique en ampère par mètre (A/m),
- $\mathbf{d}$ est le vecteur de déplacement diélectrique en coulomb par mètre carré (C/m^2),
- $\mathbf{j}$ est le vecteur de densité de courant électrique en ampère par mètre carré (A/m^2) et,
- ρ est la densité de charges électriques en coulomb par mètre cube (C/m^3).

L'équation (2.1) indique qu'une variation de champ magnétique dans le temps induit un champ électrique. L'équation (2.2) signifie qu'une densité de courant électrique, ainsi qu'une variation dans les déplacements diélectriques dans le temps, peuvent à leur tour engendrer un champ magnétique. Les équations (2.3) et (2.4) indiquent respectivement que la divergence d'un champ magnétique est nulle et que celle du vecteur de déplacement diélectrique est proportionnelle à la densité de charges électriques.

Trois équations constitutives établissent les relations entre le champ électromagnétique généré dans le sol et les propriétés de la roche environnante. La loi d'Ohm indique la relation entre la densité de courant électrique et l'intensité du champ électrique :

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e},$$

où σ représente la conductivité électrique du milieu. La deuxième relation établit le lien entre le vecteur déplacement et l'intensité du champ électrique :

$$\mathbf{d} = \epsilon \mathbf{e}.$$

ϵ est appelé la permittivité diélectrique du milieu. La troisième relation constitutive relie l'induction magnétique à l'intensité magnétique par l'entremise de μ , la perméabilité magnétique :

$$\mathbf{b} = \mu \mathbf{h}.$$

Chacun des trois paramètres (σ , ϵ et μ) est appliqué sous la forme d'un tenseur qui tient compte de la géologie du sous-sol. Plusieurs approximations sont utilisées sur ces tenseurs afin de simplifier le problème et permettre la résolution numérique des champs électromagnétiques dans différentes situations. Elles sont en général appliquées dans le domaine des fréquences, afin de tenir compte des variations en fréquences de certains de ces paramètres. Les milieux sont considérés linéaires, isotropes et homogènes, impliquant que les propriétés EM sont invariantes en fonction de la pression, de la température et du temps. La perméabilité magnétique des milieux naturels est très peu différente de la perméabilité de l'air et est considérée constante et égale à μ_0 .

2.1.2 Équations d'onde et de diffusion

La résolution du système d'équations différentielles de Maxwell nécessite plusieurs étapes. On calcule tout d'abord le rotationnel de ces équations et on y insère les relations constitutives. On se sert ensuite des propriétés de continuité des fonctions $\mathbf{e}$ et $\mathbf{h}$ et de leurs dérivées première et deuxième pour simplifier les équations. Les équations d'ondes sont obtenues en utilisant les propriétés de divergence des champs électrique et magnétique dans une région homogène ($\nabla \cdot \mathbf{e} = 0$ et $\nabla \cdot \mathbf{h} = 0$).

$$\nabla^2 \mathbf{e} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{e}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{h} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0. \quad (2.6)$$

Après transformées de Fourier, on obtient leurs équivalents dans le domaine fréquentiel :

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0, \quad (2.8)$$

où $k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega = -\hat{z}\hat{y}$ est le carré du nombre d'onde. Pour des fréquences d'émission plus petites que 10^5Hz , les courants de déplacement sont beaucoup moins importants que les courants de conduction ($\mu\epsilon\omega^2 \ll \mu\sigma\omega$) et peuvent être négligés. On obtient ainsi les équations de diffusion en électromagnétisme :

$$\nabla^2 \mathbf{e} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{h} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = 0, \quad (2.10)$$

où le nombre d'onde k devient $k = (-i\mu\sigma\omega)^{1/2}$. Les solutions de (2.9) et (2.10) peuvent s'exprimer ainsi :

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t}, \quad (2.12)$$

où

$$\alpha = \beta = \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2} \right)^{1/2}.$$

On remarque que les champs électromagnétiques varient de façon sinusoïdale en fonction de la profondeur et du temps, avec une composante d'atténuation exprimée par la seconde exponentielle complexe.

2.1.3 Vecteurs de polarisation

Les solutions obtenues jusqu'à présent sont valables pour les équations homogènes dans des régions où il n'y a pas de source de courant. L'introduction des vecteurs de polarisation et de potentiel permettent de compléter l'analyse à des régions contenant

des sources électromagnétiques. Les vecteurs de polarisation sont définis comme suit :

$$\mathbf{p} \equiv \mathbf{d} - \epsilon_0 \mathbf{e} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{m} \equiv \frac{1}{\mu_0} \mathbf{b} - \mathbf{h}. \quad (2.14)$$

Les vecteurs $\mathbf{p}$ et $\mathbf{m}$ sont composés d'une partie source et d'une partie induite, soit $\mathbf{p} = \mathbf{p}^S + \mathbf{p}^I$ et $\mathbf{m} = \mathbf{m}^S + \mathbf{m}^I$. S représente le terme source et I le terme du champ induit. En incluant les termes source et induit, on peut réécrire les deux premières équations de Maxwell :

$$\nabla \times \mathbf{e} + \mu \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{m}^S}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} - \epsilon \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{p}^S}{\partial t} = \mathbf{j}_e. \quad (2.16)$$

Les termes source électrique et source magnétique sont introduits dans le domaine des fréquences par les deux équations suivantes :

$$\mathbf{J}_e^S = i\omega \mathbf{P}^S \quad (2.17)$$

$$\mathbf{J}_m^S = i\mu_0 \omega \mathbf{M}^S. \quad (2.18)$$

On obtient les deux premières équations de Maxwell dans un milieu non-homogène dans le domaine des fréquences.

$$\nabla \times \mathbf{E} + \hat{z} \mathbf{H} = -\mathbf{J}_m^S \quad (2.19)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \hat{y} \mathbf{E} = -\mathbf{J}_e^S. \quad (2.20)$$

où $\hat{y} = \sigma + i\epsilon\omega$ représente l'admittivité électrique et $\hat{z} = i\mu\omega$ est l'impédance électrique.

2.1.4 Potentiels de Schelkunoff

Pour résoudre les équations de Maxwell dans un milieu non-homogène, il est utile de définir $\mathbf{E}$ et $\mathbf{H}$ par des termes de potentiel, appelés potentiels de Schelkunoff. Il est plus facile de résoudre le système en fonction des potentiels plutôt qu'en fonction des champs directement. On émet l'hypothèse que les champs électrique et magnétique sont une superposition de sources de types électrique et magnétique.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m + \mathbf{E}_e \quad (2.21)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m + \mathbf{H}_e. \quad (2.22)$$

On divise les deux premières équations de Maxwell selon le type de source présent et on résout les systèmes séparément en utilisant les vecteurs potentiels de Schelkunoff $\mathbf{F}$ et $\mathbf{A}$ définis par :

$$\mathbf{E}_m \equiv -\nabla \times \mathbf{F} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{H}_e \equiv \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2.24)$$

Des conditions doivent être imposées pour permettre la résolution du système d'équations. Des fonctions scalaires arbitraires sont utilisées pour imposer ces conditions. En supposant qu'un seul type de source est présent à la fois et que la source est définie par une seule composante verticale, on peut exprimer les composantes des champs électrique et magnétique selon les équations suivantes :

$$\begin{array}{cc}
TM_z & TE_z \\
\mathbf{E}_x = \frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial x \partial z} & \mathbf{E}_x = -\frac{\partial \mathbf{F}_z}{\partial y} \\
\mathbf{E}_y = \frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial y \partial z} & \mathbf{E}_y = \frac{\partial \mathbf{F}_z}{\partial x} \\
\mathbf{E}_z = \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \mathbf{A}_z & \mathbf{E}_z = 0
\end{array} \tag{2.25}$$

$$\begin{array}{cc}
TM_z & TE_z \\
\mathbf{H}_x = \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} & \mathbf{H}_x = \frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 \mathbf{F}_z}{\partial x \partial z} \\
\mathbf{H}_y = -\frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} & \mathbf{H}_y = \frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 \mathbf{F}_z}{\partial y \partial z} \\
\mathbf{H}_z = 0 & \mathbf{H}_z = \frac{1}{\hat{z}} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \mathbf{F}_z
\end{array} \tag{2.26}$$

Les équations de gauche régissent un système dont le champ magnétique vertical est nul ($\mathbf{H}_z = 0$). Cela correspond à un champ transverse magnétique en z (mode TM_z). Les équations de droite décrivent un système dont le champ électrique vertical est nul ($\mathbf{E}_z = 0$). Cela correspond à un champ transverse électrique en z (mode TE_z). Un champ électromagnétique arbitraire dans un espace homogène peut être exprimé comme la somme des modes TM_z et TE_z . Par exemple, le MEGATEM produit un champ magnétique vertical. Le champ électrique en z est donc nul, il fonctionne en mode TE_z .

La détermination des composantes du champ électromagnétique secondaire se fait en fonction de la géologie et des conditions aux frontières imposées. Par exemple,

pour un terrain stratifié, on sait que, d'après les lois de l'électromagnétisme, plusieurs conditions de continuité s'imposent aux interfaces. Quand les courants de déplacement peuvent être négligés, les conditions de continuité suivantes s'imposent :

- Composante normale de l'induction magnétique ($\mathbf{B}_{n_1} = \mathbf{B}_{n_2}$),
- Composante tangentielle de l'intensité du champ électrique ($\mathbf{E}_{t_1} = \mathbf{E}_{t_2}$),
- Composante tangentielle de l'intensité du champ magnétique ($\mathbf{H}_{t_1} = \mathbf{H}_{t_2}$) s'il n'y a pas de courant de surface,
- Composante normale de la densité de courant électrique ($\mathbf{J}_{n_1} = \mathbf{J}_{n_2}$).

La résolution numérique s'effectue par différentes techniques, dépendant de la géologie et du système utilisé. Elles seront abordées plus en détails dans le troisième chapitre. Chaque système a une solution qui lui est propre, dépendant des caractéristiques de la source, des dimensions du dispositif et de la géologie étudiée.

2.2 Méthodes TDEM en géophysique

Les méthodes électromagnétiques transitoires furent développées pour résoudre le problème de la séparation des champs secondaires en présence du champ primaire comme c'est le cas des méthodes fréquentielles.

Les méthodes aéroportées sont introduites dans les années 1950 avec l'INPUT, l'ancêtre du MEGATEM. Nelson et Morris (1969) fait une bonne description des paramètres techniques de l'INPUT. Plus tard, Best et Bonywell (1989) et Smith et Annan (1997) font un résumé des développements pratiques, des avancées technologiques et de l'interprétation des données aéroportées. Les méthodes aéroportées demandent une technologie particulière qui tient compte des effets de l'avion ou de l'hélicoptère sur les champs électromagnétiques. Plusieurs études se sont attardées à ces particularités. Annan *et al.* (1996) effectue une étude théorique de la limite résistive des méthodes aéroportées dans un terrain résistant. Smith (1998) et Smith (2001) étudient respectivement l'effet du temps d'émission de l'onde initiale sur un corps conducteur et les conséquences d'enlever le champ primaire pour l'estimation de la position des récepteurs sur le MEGATEM.

Au lieu d'émettre un courant alternatif, les méthodes transitoires utilisent un courant direct généré pendant un certain temps. Le courant est ensuite coupé pendant une période dite "temps mort". Les champs secondaires sont lus en l'absence du champ primaire, permettant de séparer plus facilement le champ secondaire du champ primaire. Plusieurs types d'ondes peuvent être injectés ; des ondes carrées, en échelon, demi-sinusoidales ou triangulaires. Le MEGATEM utilise une onde demi-sinusoidale. Les récepteurs peuvent être une boucle de courant ou des dipôles électriques. La figure (2.1) permet d'observer les formes du champ électromagnétique primaire et des champs secondaires pour un courant injecté de forme semi-sinusoidale.

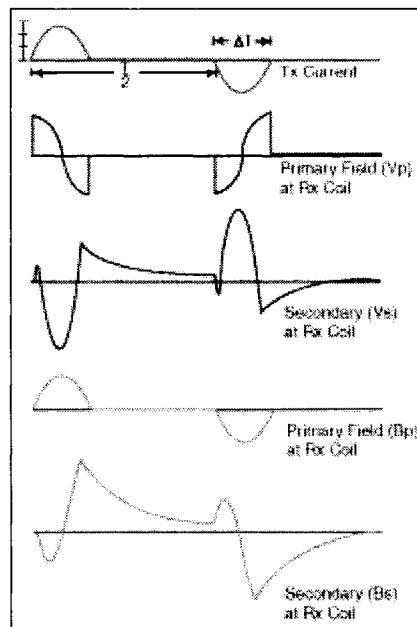


Figure 2.1: Courant injecté, champs magnétiques primaire et secondaire horizontaux et leur dérivée

Suivant les lois de Maxwell, la coupure du courant injecté crée une variation dans le champ magnétique primaire, qui engendre des courants de Foucault dans un corps conducteur. Un champ secondaire est créé et s'oppose à cette coupure de courant. Dans les premiers instants suivant la coupure, les courants restent à la surface du corps conducteur. On appelle cette période temps courts (early time). Aux temps intermédiaires, des pertes ohmiques font dissiper les courants de surface à l'intérieur du

corps conducteur avec une intensité décroissante. Une fois la dissipation des courants complétée, la distribution des courants induits reste plus ou moins constante. Seule l'amplitude du champ électromagnétique continue à décroître. C'est la période temps longs (late time). La figure (2.2) permet de visualiser les trois stades de la propagation du flux de courant primaire dans un conducteur confiné après la coupure du courant dans le transmetteur.

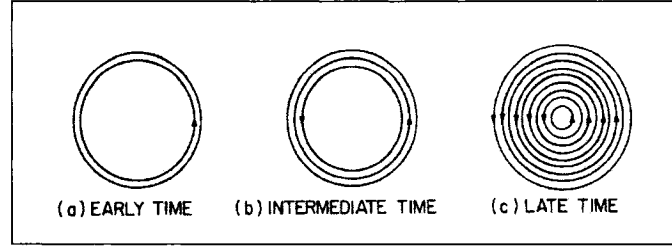


Figure 2.2: Flux de courant dans un conducteur sphérique à divers temps après la coupure du courant (d'après Nabighian (1991))

Pour un corps conducteur dans un milieu infiniment résistant, la relation entre le champ électrique secondaire et le courant primaire est fonction de la conductivité du corps et du couplage électromagnétique entre le corps et la boucle de courant. Le couplage représente le paramètre géométrique du problème. Il ne suffit pas que le corps soit hautement conducteur pour générer une forte réponse, il doit être aligné de façon à réagir au champ primaire. La relation peut être exprimée ainsi :

$$\mathbf{e}_s(t) = M_{02} \frac{\partial I}{\partial t} = I_0 \frac{M_{01} M_{12}}{L} \left[\delta(t) - \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \right] \quad t \geq 0, \quad (2.27)$$

où

- M_{02} est le terme de couplage entre le transmetteur et le récepteur,
- M_{01} est le terme de couplage entre le transmetteur et le conducteur,
- M_{12} est le terme de couplage entre le conducteur et le récepteur,
- I_0 est le courant initial émis au transmetteur et,
- L est l'inductance du conducteur, soit sa facilité à générer un courant secondaire induit.

Les paramètres sont expliqués dans la figure (2.3).

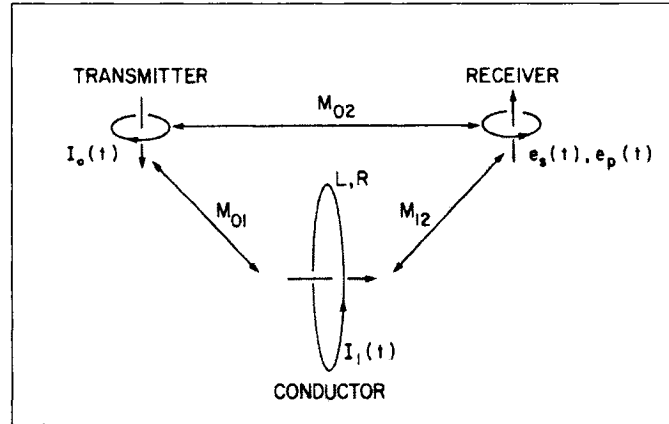


Figure 2.3: Représentation d'un système électromagnétique transitoire (d'après Nabighian (1991))

Aux temps courts, puisque les courants restent à la surface du corps conducteur, la distribution des courants n'est pas fonction de sa conductivité. Elle varie en fonction de la taille et de la forme du conducteur et de l'intensité du courant injecté. Aux temps longs, la conductivité du corps est grandement responsable de la distribution, de l'amplitude et de la décroissance du champ électromagnétique. Le paramètre de temps permet de déterminer le début de la période temps longs. Ce paramètre est fonction de la perméabilité magnétique, de la conductivité du milieu, et des dimensions de la boucle émettrice. La relation de décroissance du champ électromagnétique en fonction du temps et du milieu est simplifiée pendant la période temps long. On considère l'approximation temps long valide lorsque $a\theta \ll 1$ où a est la taille de la boucle émettrice et $\theta = (\frac{\mu\sigma}{4t})^{1/2}$, le paramètre de temps.

Le champ électromagnétique aux temps longs décroît de façon proportionnelle à la résistivité du terrain. Plus le terrain est résistant, plus le champ initial est élevé et la décroissance rapide. Si le terrain est conducteur, la réponse initiale est de moindre amplitude mais sa décroissance est plus lente. La réponse est donc perçue sur une plus grande période de temps.

Dans un milieu de conductivité homogène, la diffusion du courant induit est similaire à des ronds de fumée. Le concept des ronds de fumée ("smoke rings") est introduit pour la première fois par Nabighian (1979) pour un terrain homogène. Lorsque

le courant est coupé dans la boucle émettrice, on imagine un système de filaments de courant induit se propageant dans le sol avec une vitesse dépendant de la conductivité du milieu. La figure (2.4) montre le concept de ronds de fumée imaginé par Nabighian.

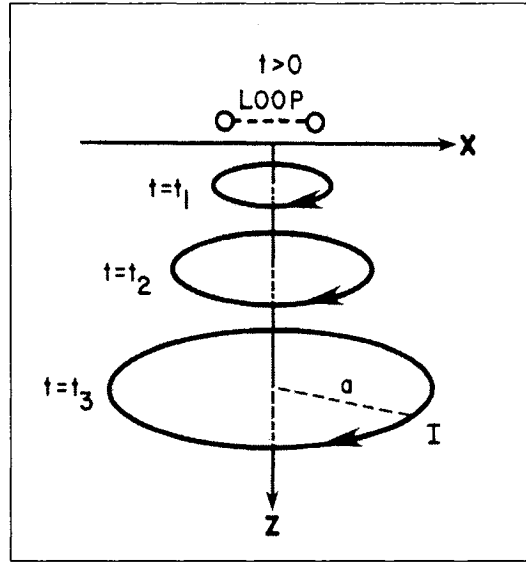


Figure 2.4: Système de filaments de courant équivalent après coupure du courant (d'après Nabighian (1979))

La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dépend du milieu dans lequel elle se propage. Pour chaque milieu géologique, la décroissance d'un champ électromagnétique transitoire tend vers une valeur asymptotique. Ainsi, pour un milieu de conductivité uniforme, les décroissances des dérivées des champs magnétiques horizontal et vertical peuvent s'exprimer ainsi :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{b}_x}{\partial t} &\cong O\left(\frac{1}{t^3}\right) \\ \frac{\partial \mathbf{b}_z}{\partial t} &\cong O\left(\frac{1}{t^{2.5}}\right).\end{aligned}\tag{2.28}$$

La figure (2.5) schématise la propagation des filaments de courant dans un demi-espace conducteur.

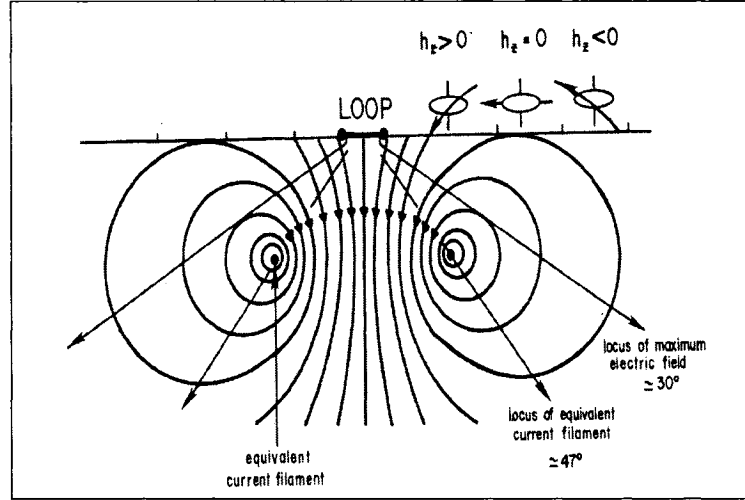


Figure 2.5: Filaments de courant équivalent pour un demi-espace conducteur (d'après Nabighian (1991))

La solution se complique lorsqu'un corps bi ou tri-dimensionnel se trouve dans le sol. Dépendant de la forme et taille du corps et de la composante du champ calculée, la relation de décroissance varie. Pour une plaque mince, on peut exprimer la vitesse de décroissance du champ par sa constante de temps. De façon générale, la constante de temps peut être exprimée par la relation suivante :

$$\tau = K\sigma\mu A \quad (2.29)$$

où K est un coefficient numérique et A est une constante proportionnelle à la section effective du conducteur. La méthode graphique est une façon simple et commune de déterminer la constante de temps d'un corps conducteur. En utilisant l'expression temps longs pour un corps de dimensions finies comme point de départ :

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau}, \quad (2.30)$$

on calcule le logarithme des deux côtés de l'équation et on isole la constante de temps τ . On affiche ensuite les points sur un graphique semi-logarithmique. Ceux-ci devraient former une droite dont la pente représente la constante de temps du corps conducteur. En prenant les valeurs du champ à des temps t_1 et t_2 , la constante de

temps peut s'exprimer ainsi :

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(A_1(t) / A_2(t))}. \quad (2.31)$$

Une faible constante de temps indique une décroissance rapide du champ électromagnétique, soit la présence d'un corps peu conducteur. Une forte constante de temps est associée à des corps très conducteurs, comme par exemple des gisements de sulfures massifs.

L'interprétation des données électromagnétiques transitoires s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, il importe de localiser les anomalies sur les différents profils ou cartes de résistivité (ou de conductivité). On détermine les paramètres géométriques des corps tels que les dimensions, la profondeur et le pendage. On étudie ensuite la qualité du conducteur à l'aide de sa constante de temps. Plusieurs configurations peuvent être utilisées pour prendre des mesures transitoires. Voici un bref résumé des principales configurations et des principaux systèmes aéroportés.

2.2.1 Configurations possibles

Un facteur commun à toutes les configurations est l'utilisation d'une boucle émettrice comme source de courant. Les paramètres pouvant varier sont la forme de l'onde initiale, les récepteurs, la séparation transmetteur - récepteur et la fréquence d'émission. La configuration à utiliser dépend des caractéristiques des cibles recherchées. Certaines configurations permettent d'injecter un courant plus élevé, induisant la propagation d'un champ électromagnétique à de plus grandes profondeurs.

La configuration boucle simple utilise la même boucle pour émettre le courant et pour enregistrer le champ secondaire. Une variante de la boucle simple est la configuration à boucles coïncidentes, qui utilise deux boucles côte-à-côte afin d'éviter certains effets parasites. La configuration à boucle centrale utilise un dipôle multi-composantes placé au milieu de la boucle émettrice comme récepteur. La position centrale du dipôle permet des simplifications facilitant l'interprétation des mesures. La configuration à boucle fixe demande le déploiement d'une boucle de grandes dimensions (centaines

de mètres de longueur). On déplace un récepteur le long de profils perpendiculaires à la boucle pour prendre les mesures. Cette configuration permet une profondeur de pénétration très intéressante car un moment dipolaire élevé peut être atteint. La méthode des boucles séparées utilise deux boucles de mêmes dimensions séparées horizontalement d'un espacement gardé constant lors de la prise de mesures.

Les méthodes aéroportées utilisent pour la plupart une configuration dérivée de la configuration des boucles séparées. La figure (2.6) dresse la liste de cinq configurations employées par des systèmes électromagnétiques aéroportés.

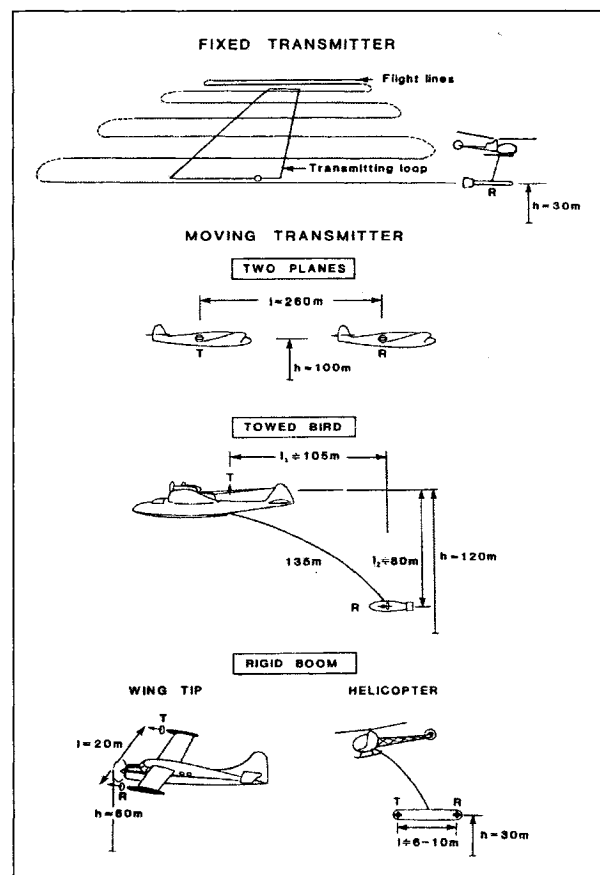


Figure 2.6: Configurations des méthodes électromagnétiques transitoires aéroportées (d'après Nabighian (1991))

L'utilisation d'un transmetteur fixe est rare en pratique, celui-ci étant généralement accroché autour de l'appareil. Le récepteur peut se trouver sur l'appareil, sur un autre

appareil ou est accroché dans un réceptacle appelé oiseau. L'appareil peut être un avion ou un hélicoptère. L'hélicoptère permet une meilleure résolution spatiale car il vole plus près du sol. L'utilisation d'un oiseau comme réceptacle pour le récepteur crée une asymétrie dans les données dépendant de la direction de vol. Cette asymétrie est pratique pour la détermination du pendage et autres propriétés des corps conducteurs, mais complique l'interprétation des données.

2.2.2 Configuration MEGATEM



Figure 2.7: Le MEGATEM de Fugro Airborne Surveys

L'appareillage du MEGATEM est monté sur un avion DeHavilland Dash-7 et est opéré par Fugro Airborne Surveys. Le transmetteur est une boucle à axe vertical accrochée aux ailes, au nez et à la queue de l'avion. L'aire de la boucle est de $406m^2$ et comporte quatre tours pour une fréquence d'émission de $30Hz$ et cinq pour une fréquence d'émission de $90Hz$. La hauteur de vol usuelle du MEGATEM est de $120m$. Le récepteur est situé dans un oiseau accroché $130m$ derrière et $50m$ sous le milieu de la boucle de courant. La figure (2.8) schématise la géométrie du système.

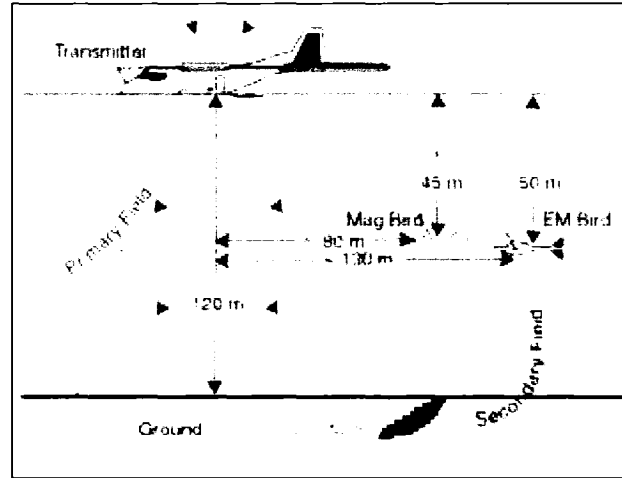


Figure 2.8: Schéma du MEGATEM

Le récepteur est une bobine électrique multi-composantes permettant de lire les forces électromagnétiques induites dans les trois directions, soit $\partial b_x/\partial t$, $\partial b_y/\partial t$ et $\partial b_z/\partial t$. Les lectures sont prises à vingt canaux de temps, cinq pendant la période d'émission et quinze pendant la période temps mort. Le tableau (2.1) dresse la liste des principales caractéristiques du transmetteur du MEGATEM.

TAB. 2.1: Propriétés du transmetteur du MEGATEM

Fréquences de base	90 Hz	30 Hz
Temps d'émission	2.189 ms	4.023 ms
Temps mort	3.366 ms	12.543 ms
Courant injecté	800 A	1290 A
Moment dipolaire	$1.625 \times 10^8 \text{ Am}^2$	$2.095 \times 10^8 \text{ Am}^2$

Les données finales obtenues du MEGATEM sont présentées dans un fichier contenant les valeurs des champs et de leurs dérivées dans les trois directions principales, aux vingt canaux de temps, pour toutes les positions de mesure. Comme spécifié plus haut, deux méthodes de traitement sont possibles. On peut analyser la variation du champ électromagnétique en fonction de la position sur un canal de temps fixé ou analyser la décroissance du champ à une position précise. Les deux méthodes d'analyse sont importantes pour l'étude des gisements de sulfures massifs. Les attributs qui sont dépendant de la position donnent une idée des propriétés géométriques du dépôt tandis que la décroissance donne une idée de la qualité du conducteur, et donc de la teneur en métaux du dépôt.

2.3 Application du MEGATEM à la recherche de gisements de sulfures massifs volcanogènes

Le MEGATEM possède une bonne pénétration verticale et une grande empreinte au sol. Ces deux propriétés font de lui un excellent appareil pour la reconnaissance électromagnétique de gisements de sulfures massifs.

Annan et Lockwood (1991) présente les données acquises au-dessus du dépôt de sulfures massifs de Freddie Well dans l'ouest de l'Australie, qui est considéré comme une cible difficile due à la présence d'un important couvert de mort-terrain conducteur. Lowe *et al.* (1999) compare différentes techniques géophysiques, dont le GEOTEM l'ancêtre du MEGATEM, pour la caractérisation du dépôt de Voisey's Bay au Canada. Dans une étude de plusieurs techniques géophysiques pour la découverte du dépôt d'Emily Ann et l'extension du dépôt de Maggie Hays en Australie occidentale, Peters et Buck (2000) explique l'utilité des données acquises selon les méthodes électromagnétiques transitoires et aéroportées. Wolfgram et Golden (2001) présente les données acquises au-dessus de trois sites d'essai de dépôts de sulfures massifs ; soit les dépôt d'Harmony et de Maggie Hays North en Australie occidentale et de Kabanga en Tanzanie. Le GEOTEM fut aussi employé à d'autres fins que la recherche de gisements de sulfures. Christiansen et Christensen (2003) présente une étude hydrogéologique effectuée au Danemark. Les données obtenues par le GEOTEM ont servi à construire des cartes de résistivité permettant d'avoir une meilleure connaissances des ressources en eaux souterraines du pays.

Le projet intitulé "Valorisation de la technologie MEGATEM" décrit dans Cheng *et al.* (2005a) et Cheng *et al.* (2005b) fait une étude des possibilités du MEGATEM au-dessus de trois dépôts de sulfures connus et documentés en Abitibi, dans le nord-ouest du Québec. L'étude porte sur le traitement numérique des données brutes recueillies par le MEGATEM et sur les méthodes d'interprétation des données traitées. Le projet décrit dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de ce projet de recherche et traite de la partie interprétation des données recueillies par le MEGATEM au-dessus des gisements de sulfures massifs en Abitibi.

Chapitre 3

Géologie et modélisation TDEM des gisements de VMS

Afin de prendre conscience de l'importance d'un système de détection et de classification automatique des anomalies, il faut bien connaître les caractéristiques des dépôts de sulfures massifs volcanogènes. Ce chapitre explique tout d'abord la mise en place de ces gisements dans le contexte géologique de l'Abitibi. Les principaux gisements de type VMS en Abitibi sont ensuite décrits afin d'exposer leurs caractéristiques physiques (forme, dimensions, profondeur, conductance...). Une bonne connaissance des propriétés de ces gisements permet d'établir les limites physiques des modèles numériques à développer. Une fois la géologie décrite, la section sur la modélisation met en relief les efforts effectués afin de représenter numériquement les gisements de type VSM avec les outils disponibles.

3.1 Géologie des dépôts de sulfures massifs volcanogènes

3.1.1 Mise en place des gisements VMS

La région de l'Abitibi est communément appelée ceinture de roches vertes de l'Abitibi. La ceinture abitibienne est composée de roches volcaniques et sédimentaires datant de 2.7 milliards d'années. On y retrouve des intrusions de gabbro, tonalite,

granodiorite et syénite. De rapides changements de faciès et des variations sur les épaisseurs des unités géologiques sont observés (Gibson et Watkinson (1990)). Plusieurs phases de déformation régionale et de métamorphisme ont ensuite affecté la région.

La formation de la stratigraphie de l'Abitibi est bien décrite dans Lulin (1990). Une plaine sous-marine de lave mafique et ultramafique se forme par plusieurs épisodes d'activités volcaniques intenses pendant la période archéenne. Ces séquences de lave sont interrompues par des intercalations d'argilites sulfureuses, vu comme des conducteurs formationnels sur des levés électromagnétiques. L'érosion de ces complexes volcaniques a contribué à la formation des couches sédimentaires. Selon Chartrand et Cattalani (1990), les gisements de sulfures massifs se forment dans des environnements volcaniques océaniques par décharge de solutions hydrothermales métallifères sur la base océanique.

Les solutions hydrothermales ont circulé dans la cheminée d'altération du dépôt pour former une concentration de sulfures massifs. La mise en place de ces dépôts a été possible suite à la génération de pyroclastiques rhyolitiques. Ces dépôts sont fréquemment associés à des dômes de lave felsique, des brèches volcano-clastiques, des failles synvolcaniques ou des intrusions sous-volcaniques caractérisant les environnements sous-marins près des cheminées de ces anciens volcans.

Les intrusions de sulfures massifs en Abitibi sont regroupées en différents complexes volcaniques. À l'intérieur de chaque complexe, les dépôts se retrouvent dans une stratigraphie favorable, appelée "horizon marqueur". La présence de cet horizon marqueur représente un contrôle d'origine stratigraphique aidant à la détection des gisements de type VMS. Il existe plusieurs niveaux d'horizons marqueurs dans lesquels des dépôts de sulfures massifs ont été localisés en Abitibi. Ces niveaux représentent des pauses entre les épisodes volcaniques, permettant aux fluides hydrothermaux d'effectuer une altération chimique des roches volcaniques.

Une fois les dépôts mis en place, la plupart d'entre eux ont été déformés par un

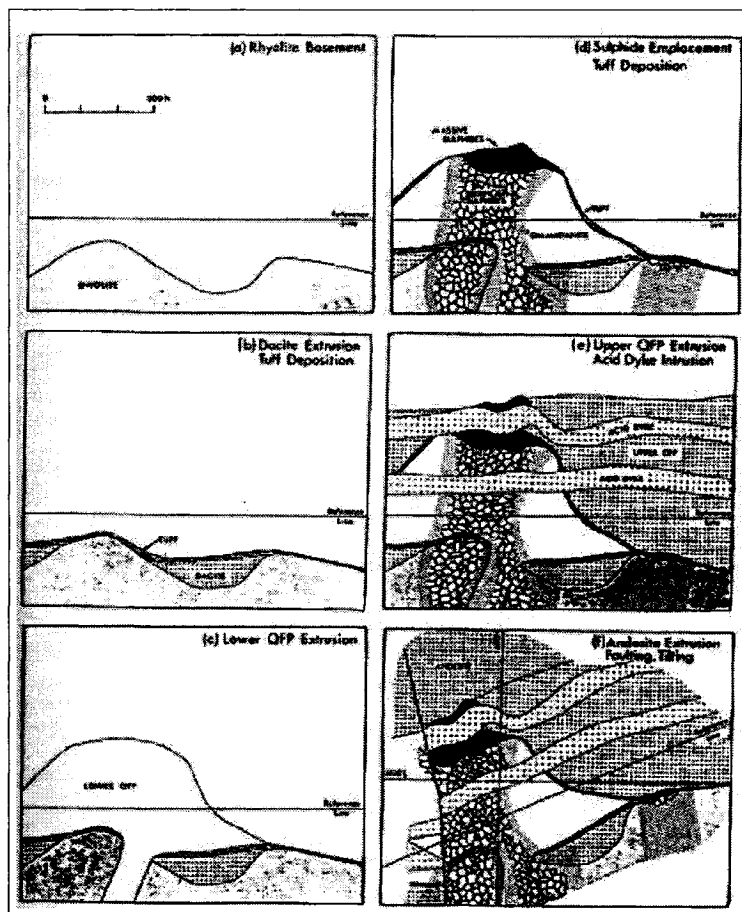


Figure 3.1: Étapes de formation d'un dépôt de sulfure massif volcanogène (d'après Simmons (1973))

ou plusieurs épisodes de métamorphisme et recristallisation à un niveau de faciès "schiste vert". Plusieurs de ces dépôts ont subi l'effet de failles durant des périodes de déformation qui compliquent l'interprétation géologique. Les gisements que l'on retrouve aujourd'hui n'ont plus la même forme que lors de leur déposition. La présence de failles et autres événements de déformation représentent le deuxième contrôle aidant à la localisation des dépôts de VMS, soit le contrôle d'origine structurale.

3.1.2 Caractéristiques des principaux gisements

Un dépôt de sulfures massifs idéal est formé de deux composantes principales, une lentille de sulfures massifs et une zone minéralisée, aussi appelée cheminée d'altération.

Une solution hydrothermale a circulé dans la cheminée d'altération pour former le dépôt. Les principaux minéraux sulfureux retrouvés dans un gisement de type VMS sont la pyrite, la chalcoppyrite, la pyrrhotite et la sphalérite. La magnétite est le minéral métallique non-sulfureux le plus commun de ces dépôts. Les principaux métaux recherchés dans ces types de gisement sont le cuivre et le zinc mais il est aussi possible de trouver des quantités non-négligeables de métaux précieux tels que l'or natif, l'argent et une variété de tellures. La figure (3.2) représente un gisement VMS typique.

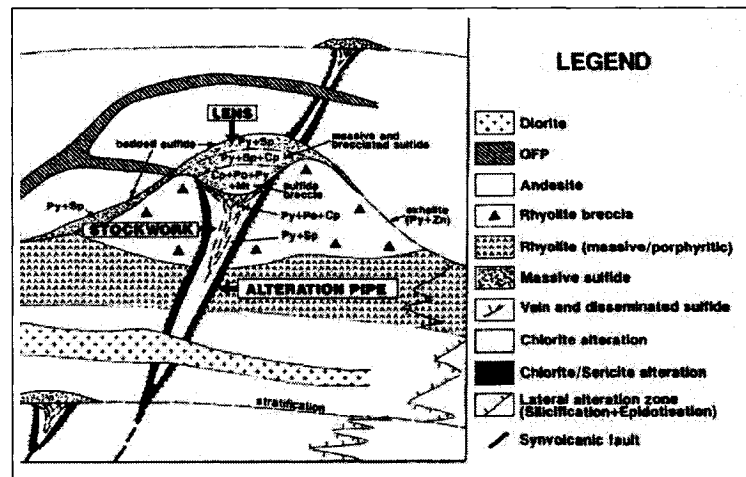


Figure 3.2: Gisement de sulfure massif volcanogène typique en Abitibi (d'après Chartrand et Cattalani (1990))

La lentille de sulfures repose de manière discordante au-dessus de la cheminée d'altération. Un gisement peut être composé d'une ou plusieurs lentilles et zones minéralisées. Dépendant du niveau de métamorphisme que les lentilles ont subi, leur forme peut varier considérablement. Elles se retrouvent sous forme de dôme ou de plaque mince, en passant par la forme du canal et du prisme tabulaire. D'autres sont tellement déformées que leur forme originale ne peut plus être déterminée. Les lentilles contiennent les sulfures massifs et forment la partie la plus intéressante du dépôt à cause de la teneur élevée de ces minéraux en métaux d'intérêt. Cette importante densité de métaux est détectée par les méthodes électromagnétiques à cause de la conductivité électrique élevée des sulfures. Une zonation verticale est observée dans les lentilles de sulfure, le ratio Cu/Zn diminuant vers le sommet de la lentille.

La cheminée d'altération se trouve sous la lentille de sulfures massifs. Cette zone possède un diamètre de plusieurs dizaines de mètres et peut s'enfoncer jusqu'à des centaines de mètres dans le socle rocheux. La plupart des gisements ont un contact franc avec les couches supérieures et un contact inférieur graduel. La zone d'altération hydrothermale, formée par la réaction entre l'eau de mer réchauffée et le contact de la roche-mère, est presque toujours présente dans les dépôts de type VMS au Québec. La teneur en métaux peut y être assez importante pour être exploitable. Les dimensions imposantes de la cheminée d'altération par rapport à la lentille de sulfures massifs font que l'exploration des dépôts de VMS s'effectue habituellement par la détection de ces cheminées. Une zonation latérale des teneurs en métaux et du ratio Cu/Zn est observée dans les cheminées d'altération. Le contact latéral des gisements de type VMS est de nature économique car les limites latérales d'exploration dépendent des teneurs économiquement viables des métaux exploités.

La variabilité de ces paramètres fait en sorte que leur détection au moyen des méthodes électromagnétiques comme le MEGATEM est complexe car leurs signatures électromagnétiques sont diverses. À des buts de recherches scientifiques et afin de parfaire les méthodes d'interprétation reliées au MEGATEM, des données détaillées furent obtenues au-dessus de certains dépôts dont la géologie et les propriétés physiques sont connues et documentées. Les gisements de ISO, New Inco, Gallen et Aldermac, tous situés aux alentours de Rouyn-Noranda, furent sélectionnés pour ce projet.

3.1.2.1 Gisements ISO - New Inco

L'information présentée pour les dépôts de ISO et de New Inco provient des articles de Telford et Becker (1979) et de Cheng *et al.* (2005a) qui est en cours de publication. Les deux gisements se trouvent à une trentaine de kilomètres au nord-ouest de Rouyn-Noranda, le dépôt d'ISO étant situé à un kilomètre et demi à l'ouest de celui de New Inco. Les méthodes électromagnétiques en géophysique sont à l'origine des découvertes de ces deux gisements; l'INPUT (l'ancêtre du MEGATEM) pour ISO et le DIGHEM (méthode électromagnétique hélicoptérée) pour New Inco.

Le dépôt de ISO est un corps tabulaire composé de plusieurs couches riches en cuivre et en zinc. On y trouve 5.8 millions de tonnes (5.8 MT) d'un corps pyritique contenant de la chalcopryrite, de la sphalérite et de la galène. Les teneurs calculées sont de 1.1% de cuivre et de 2.72% de zinc. Il possède une extension latérale de 550 mètres et une extension suivant le pendage de 300 mètres, et pouvant atteindre jusqu'à 800 mètres. Son épaisseur varie de quelques mètres à une trentaine de mètres. Le corps de ISO est penté vers le sud à un angle de 50° et se trouve directement sous une mince couche de mort-terrain (12-15m). La conductance estimée varie selon la méthode utilisée pour la mesurer mais se situe entre 15 et 30 Siemens (S).

Le dépôt de New Inco est plus petit que ISO comme en font foi son extension latérale de 120 mètres et son extension de 180 mètres suivant le pendage. L'épaisseur du corps tabulaire varie entre 5 et 38 mètres et le corps se trouve lui aussi directement sous la couche de mort-terrain. Son pendage est d'environ 50° . Contrairement à ISO, une cheminée d'altération s'étend sous la zone minéralisée, d'un diamètre similaire à la lentille. Une teneur en cuivre de 2.5% et des traces de zinc sont observées pour ce dépôt de 1.0 MT. La conductance observée varie de 3 à 80 Siemens avec une moyenne de 30 Siemens.

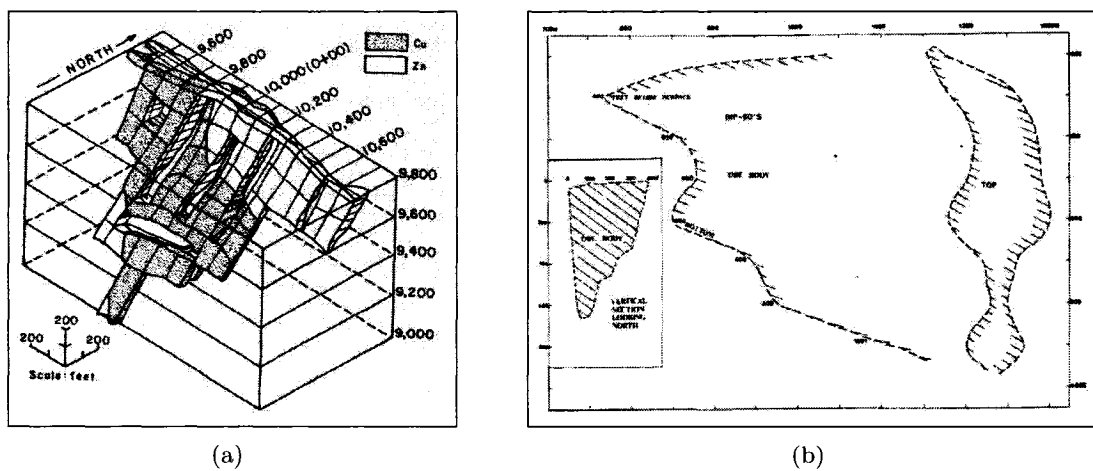


Figure 3.3: a) Vue 3D du dépôt de ISO (d'après Telford et Becker (1979)) b) Vues de dessus et de face du dépôt de New Inco (d'après Telford et Becker (1979))

La variabilité de la mesure de conductance peut être expliquée par les différentes empreintes au sol des techniques utilisées. Certaines méthodes englobent plus de matériel dans leur mesure tandis que d'autres offrent une lecture plus ponctuelle. Une méthode possédant une large empreinte au sol donnera une conductance plus faible car une surface plus large est enregistrée. Un instrument avec une plus petite empreinte permet de concentrer la mesure dans une région plus précise. Il est donc tout à fait logique d'observer une variation sur les conductances dépendant de la méthode électromagnétique utilisée pour enregistrer les données.

3.1.2.2 Gisement Gallen

La majorité de l'information sur Gallen provient de Watkinson *et al.* (1990). Le gisement de Gallen est situé à huit kilomètres (8 km) au nord-est de Rouyn-Noranda. Il s'agit d'un dépôt de plus de huit millions de tonnes (8 MT) composé principalement de pyrite enrichie en zinc. On y trouve aussi de la sphalérite, de la chalcoppyrite et de la galène. Une teneur moyenne de 3.36% de zinc et 0.08% de cuivre y est enregistrée.

Le dépôt de Gallen est composé de deux lentilles et d'une cheminée d'altération plus ou moins bien définie. La première lentille est située directement sous le mort-terrain. Elle possède une extension latérale de 275 mètres, une épaisseur de 150 mètres et une extension verticale de plus de 150 mètres. La conductivité des échantillons analysés varie de 2 à 5 Siemens par mètre (S/m). Le dépôt de Gallen fut exploité au début des années 1980. Bien qu'une quantité importante de minéraux ait été extraite, la réponse MEGATEM est toujours très forte, provenant des sulfures non-économiques en bordure de la lentille principale. La deuxième lentille possède la forme d'une plaque mince et se trouve à une profondeur de 275 à 335 mètres. Elle est de petites dimensions (60 x 30m²) et n'est pas exploitable économiquement. Elle ne peut pas être détectée par le MEGATEM due à sa trop grande profondeur et ses dimensions trop petites.

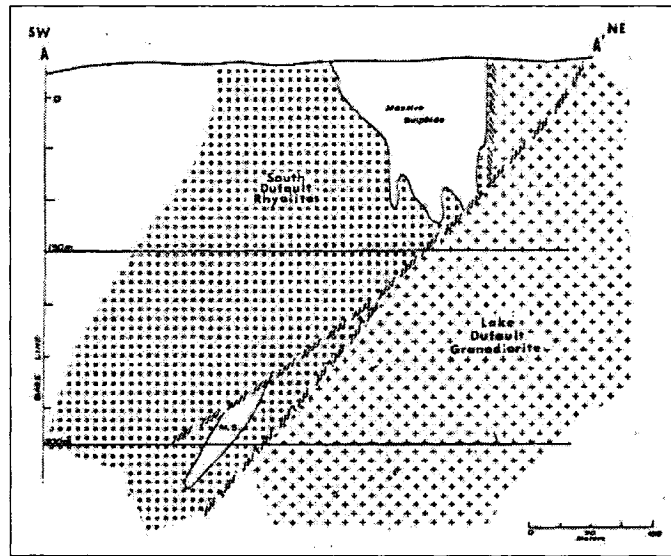


Figure 3.4: Vue de face de Gallen

3.1.2.3 Gisement Aldermac

L'information sur le dépôt d'Aldermac provient de Barrett *et al.* (1991) et de communications personnelles avec Michel Allard, de Noranda Inc. Le dépôt est situé dans la municipalité de Beauchastel, 16 kilomètres à l'ouest de Rouyn-Noranda.

Le gisement est composé de plusieurs lentilles séparées de quelques mètres. Les lentilles les plus productives sont les lentilles No.3, No.4 et, plus récemment découverte, la lentille No.8. La lentille No.4 est située directement sous la lentille No.3. Les deux corps ont les mêmes teneurs et minéralogie. On y retrouve 1.87 MT de minerai avec une teneur en cuivre de 1.47% et peu de zinc. Ces deux lentilles forment le gisement originel et sont composées de pyrite massive avec de la pyrrhotite, chalcoppyrite, sphalérite et un peu de magnétite. Les deux lentilles ont un pendage sub-vertical. Le corps No.3, de forme tabulaire et de direction d'élongation est-ouest, a une surface en plan de 80 x 9 m² et une profondeur allant de 10 à 150 mètres. La lentille No.4 possède une forme plus prismatique. Sa vue en plan s'étend sur une surface de 94m x 57m à une profondeur de 84 à 427 mètres. Une zone d'altération de sulfures disséminés se trouve sous la lentille de sulfure massif. La lentille No.8 a une forme plus irrégulière (90m x 105m x 18m) et possède un pendage variable vers le nord. La

profondeur de ce corps est d'environ 225 mètres. Les lentilles principales composant le gisement d'Aldermac ont déjà été exploitées, de sorte que seules les plus petites lentilles, situées profondément dans le socle archéen, restent en place.

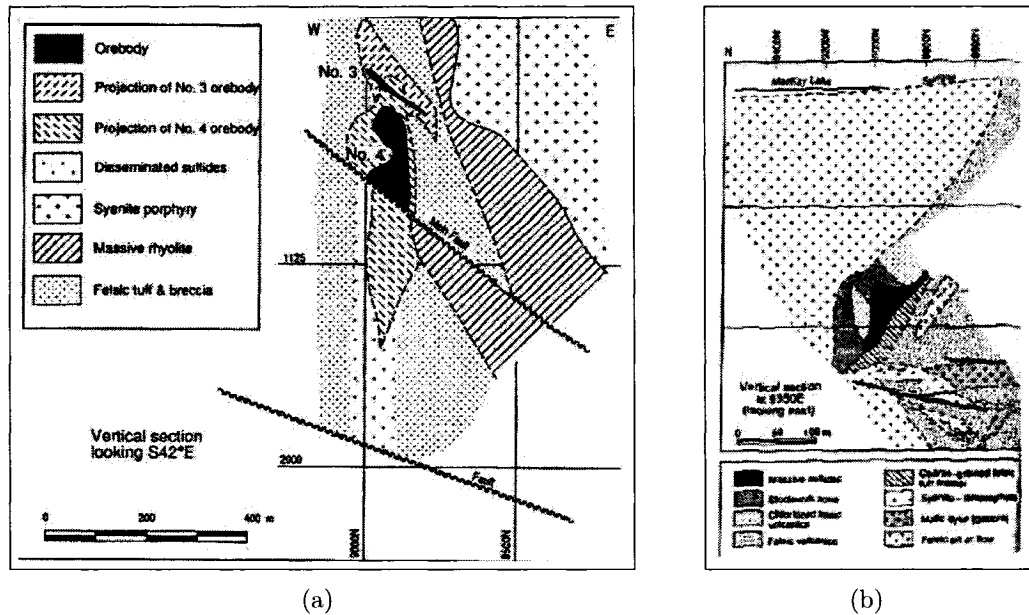


Figure 3.5: a) Section verticale des lentilles L3 et L4 du dépôt d'Aldermac b) Section verticale de la lentille L8 du dépôt d'Aldermac (d'après Barrett *et al.* (1991))

3.2 Modélisation des gisements de sulfures massifs volcanogènes

L'objectif de la modélisation numérique est de représenter la réponse de structures géologiques à un niveau de complexité approprié pour l'équipement utilisé. Les méthodes numériques en électromagnétisme introduites par Becker (1969) permettaient de résoudre des cas simples tels que des boucles de courant d'un matériel conducteur et la décroissance d'un champ électromagnétique d'un demi-espace homogène. Depuis, les méthodes numériques se sont développées et il est maintenant possible de modéliser des terrains de plus en plus réalistes. La description des méthodes de modélisation électromagnétique est tirée en grande partie du document préparé

par le “Electromagnetic Modelling Group” du “Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation” (CSIRO) de Sydney (Raiche (2004)).

Différents types de modèles géologiques peuvent être traités. Il peut s’agir d’un ou plusieurs objets dans un environnement infiniment résistant (air), d’un terrain stratifié (unidimensionnel), d’une plaque mince dans un terrain stratifié, d’un modèle à deux dimensions et demi ($2\frac{1}{2}$ D : un modèle à 2 dimensions avec une source tri-dimensionnelle), ou d’un modèle tri-dimensionnel. Un type de terrain fréquemment utilisé est le terrain 2 couches, où un mort-terrain se situe au-dessus d’un socle rocheux. La modélisation de ce type de terrain est présentée dans Bartel et Becker (1986). Les modèles 3-D complets sont rarement utilisés dû à la complexité de mise en place, du temps d’exécution et de la précision des réponses obtenues. Wannamaker *et al.* (1984) est un des premiers à introduire la résolution des modèles 3-D par les méthodes intégrales.

Plusieurs facteurs géologiques ont un effet sur les réponses modélisées. Parmi ceux-ci, on note la topographie, le mort-terrain, l’anisotropie, les frontières ou contrastes entre les lithologies. Différents effets électromagnétiques doivent aussi être pris en compte lors de la modélisation. Les variations de conductivité, la perméabilité magnétique, les effets diélectriques, la conductivité complexe, le couplage entre les courants inductifs et galvaniques et la chargeabilité sont des propriétés électromagnétiques des roches affectant les levés géophysiques. Dépendant du niveau de précision souhaité, on peut décider de modéliser ou de négliger ces facteurs.

Un modèle géophysique doit avoir un niveau approprié de complexité ; assez complexe pour tenir compte de tous les effets importants, et assez simple pour obtenir des réponses dans des délais raisonnables. Le principe de parcimonie est de mise dans la construction d’un modèle numérique ; il faut choisir le modèle le plus simple sans tomber dans les approximations trop grossières.

La complexité de la nature et des interactions des ondes électromagnétiques dans le domaine temporel rend la modélisation compliquée. Raiche (1987) traite de la

modélisation de la boucle générant le courant primaire et des complexités que cela peut engendrer pour les différents temps de mesure d'un levé TDEM.

Il est pratiquement impossible, sauf pour de rares cas géologiques, de définir exactement les variations des champs électromagnétiques en tous points de l'espace et pour tous les intervalles de temps souhaités. Dans ces cas précis, les méthodes analytiques permettent de résoudre directement les équations de l'électromagnétisme. Elles sont applicables pour des cas simplistes comme une sphère conductrice ou une plaque mince dans un milieu infiniment résistant. Elles sont utilisées comme point de comparaison pour les différents codes de modélisation. Il faut avoir recours à des méthodes plus complètes afin d'obtenir l'approximation la plus valable possible du champ d'ondes électromagnétiques sur des terrains plus réalistes.

3.2.1 Méthodes de modélisation électromagnétique

Plusieurs méthodes existent pour modéliser les champs électromagnétiques. Chacune de ces méthodes possède ses avantages, ses inconvénients et ses limites d'application. Il y a les méthodes analytiques, à équations différentielles, aux différences finies, aux éléments finis et les méthodes hybrides. La résolution directe des équations de l'électromagnétisme correspond aux méthodes analytiques qui sont présentées au chapitre précédent.

Les équations de Maxwell peuvent se résoudre dans le domaine du temps ou dans le domaine des fréquences. La résolution de ces systèmes par incrément de temps ("time-stepping") permet de résoudre les équations à des pas de temps successifs. Ces méthodes sont pratiques mais peuvent engendrer des problèmes d'instabilité numérique. Une faible erreur se produisant aux premiers temps de calcul peut se répercuter sur tout le processus. De plus, certains phénomènes physiques varient selon la fréquence et ne peuvent donc pas être modélisés par ces méthodes. Il est plus courant de résoudre les équations dans le domaine des fréquences et utiliser les transformées de Fourier pour obtenir les champs électromagnétiques dans le domaine du temps.

Deux types de solutions peuvent être employés pour la modélisation électromagnétique ; les solutions directes ou les solutions itératives. Les solutions directes permettent une solution immédiate de la matrice d'inconnues. Il s'agit d'une méthode stable, très rapide avec plusieurs points de mesures mais très coûteuse en temps de calcul pour de larges matrices (corps complexes ou modèles tri-dimensionnels). Les méthodes itératives sont moins stables et plus sensibles aux problèmes mal conditionnés. Elles sont particulièrement efficaces avec peu de points de mesure et sont plus rapides que les méthodes directes pour résoudre les larges matrices.

3.2.1.1 Développement mathématiques des méthodes numériques en électromagnétisme

Quoique les équations de base soient les mêmes, le traitement mathématique varie selon le terrain à modéliser. On présente tout d'abord les développements communs à toutes les méthodes. On présentera ensuite la résolution de quelques cas de terrain typiques. L'information contenue dans cette section est tirée principalement du cinquième chapitre de Nabighian (1987) écrit par Gerald W. Hohmann.

La modélisation électromagnétique d'un terrain quelconque a pour point de départ les équations de Maxwell non-homogènes énoncées au chapitre deux. Pour les méthodes transitoires, on veut obtenir la réponse électromagnétique du terrain à modéliser en tous points d'un levé pour tous les canaux de temps de l'appareil. La source électromagnétique peut être représentée par un courant électrique induit $\mathbf{j}_p$ ou un moment magnétique $\mathbf{m}_p$ créé par un dipôle magnétique.

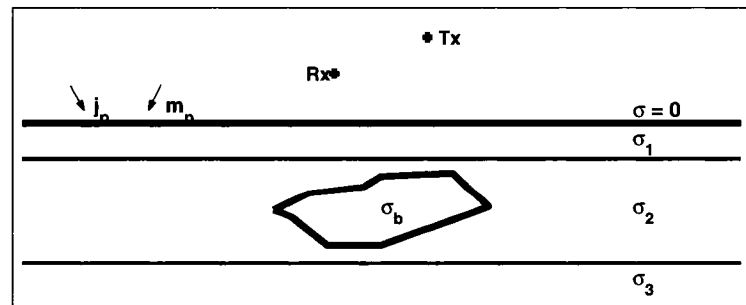


Figure 3.6: Modèle de terrain général pour la formulation d'une solution TDEM numérique

L'objectif de la modélisation est de résoudre les équations de Maxwell non-homogènes, en passant par les équations de diffusion déjà présentées au chapitre précédent, pour un terrain précis et une configuration spécifique. Il est avantageux de résoudre séparément les champs électrique et magnétique, en fonction de la solution recherchée. Pour simplifier davantage les calculs, il est commun de séparer le champ primaire du champ secondaire. Le champ primaire est la réponse "normale" du sol (demi-espace, terrain stratifié) en l'absence de corps de conductivité anormale. La réponse électromagnétique du corps de conductivité anormale correspond à la réponse du champ secondaire. La distribution du champ primaire est plus simple à calculer que la solution des champs secondaires et permet l'utilisation d'une technique de modélisation plus efficace. Les techniques de modélisation appropriées sont utilisées pour chacun des types de champs à calculer.

On définit σ_* comme la conductivité normale d'un terrain stratifié en l'absence d'hétérogénéité. On appelle $\sigma_a = \sigma - \sigma_*$ la conductivité anormale. La plupart des méthodes de résolution résolvent le système d'équations différentielles dans le domaine des fréquences. On définit ainsi un nombre d'onde pour la conductivité totale

$$k^2 = -i\omega\mu_0\sigma$$

et un nombre d'onde pour la conductivité anormale

$$k_a^2 = -i\omega\mu_0\sigma_a \quad .$$

Pour la formulation d'un système d'équations intégrales, il faut remplacer la cible conductrice par une densité de courants équivalents $\mathbf{J}_s$. On traite ensuite cette densité de courants $\mathbf{J}_s$ comme source de courant et on résoud le système d'équations de Maxwell pour les champs secondaires. Dans un espace complet, on peut résoudre ce système d'équations en utilisant les vecteurs et scalaires de potentiel de Lorentz. Le champ électrique secondaire peut être écrit de la façon suivante :

$$\mathbf{E}_s = -i\omega\mu_0\mathbf{A}_s - \nabla V_s \tag{3.1}$$

où $\mathbf{A}_s$ et $\mathbf{V}_s$ sont calculés par les intégrales suivantes :

$$\mathbf{A}_s(r) = \int_v \mathbf{J}_s(r') \mathbf{G}(r, r') dv' \quad (3.2)$$

$$\mathbf{V}_s(r) = -\frac{1}{\sigma_*} \int_v \nabla \cdot \mathbf{J}_s(r') \mathbf{G}(r, r') dv' \quad (3.3)$$

On définit $\mathbf{G}$ par la fonction de Green électromagnétique suivante, pour un espace complet :

$$\mathbf{G}(r, r') = \frac{e^{-ik_*|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (3.4)$$

En ajoutant le champ primaire à l'expression du champ secondaire ainsi déterminé, on obtient l'équation intégrale de Fredholm pour le champ électrique total.

$$\mathbf{E}(r) = \mathbf{E}_p(r) + \int_v \mathbf{G}(r, r') \cdot \sigma_a(r') \mathbf{E}(r') dv' \quad (3.5)$$

La fonction de Green est un opérateur exprimant les relations géométriques en tous points r de l'espace en fonction d'une source de position connue r' . Cet opérateur varie selon le terrain d'étude et des termes doivent être ajoutés afin de résoudre les nombreux types de terrains modélisables. L'opérateur de Green prend compte des frontières géologiques existantes et permet la résolution des équations des champs électromagnétiques.

Toutes les méthodes numériques permettant la modélisation électromagnétique fonctionnent selon la méthode d'inversion des résidus pondérés ("method of weighted residuals MWR"). La relation générale est décrite comme suit :

$$Lf = s \quad (3.6)$$

où L est un opérateur différentiel ou intégral, f est un champ scalaire ou vectoriel inconnu et s est le terme source. Le champ à déterminer f peut être approximé par une sommation de N termes d'une fonction préalablement établie. Dépendant du terrain présent et de la précision recherchée, cette fonction peut être linéaire, quadratique ou

exponentielle.

$$f(x) \approx \hat{f}(x) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(x) \quad (3.7)$$

En réintégrant cette sommation dans l'équation d'inversion, on obtient la relation suivante :

$$\sum_{n=1}^N a_n L f_n + e = s \quad (3.8)$$

Le terme e représente les résidus engendrés par l'utilisation d'une sommation tronquée à la place de la fonction complète. L'objectif de la méthode des résidus pondérés est de sélectionner les coefficients a_n permettant de forcer les résidus à zéro. La résolution de deux terrains sera étudiée ; soit les modèles à $2\frac{1}{2}$ dimensions et les modèles tri-dimensionnels.

Modèle $2\frac{1}{2}$ dimensions : géologie 2D, source 3D

Le modèle à $2\frac{1}{2}$ dimensions est très utile en électromagnétisme car il permet des simplifications qui réduisent les temps de calcul sans trop affecter la précision des résultats. La source est modélisée comme une boucle dans les trois dimensions tandis que la géologie est supposée constante dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol (direction y). Selon Nabighian (1987), la fonction de potentiel utilisée pour dériver les équations différentielles exprimant les champs électrique et magnétique secondaires peut s'exprimer comme suit :

$$\nabla \hat{V} = \frac{\partial \hat{V}}{\partial x} \mathbf{u}_x + i k_y \hat{V} \mathbf{u}_y + \frac{\partial \hat{V}}{\partial z} \mathbf{u}_z. \quad (3.9)$$

Plusieurs méthodes existent afin de solutionner les équations de diffusion pour un modèle à $2\frac{1}{2}$ dimensions, autant par les méthodes intégrales que les méthodes à différences finies. Bien que les modèles à deux dimensions et demi soient très utiles afin d'obtenir une première approximation de la solution, il faut utiliser les modèles tri-dimensionnels afin d'obtenir les réponses électromagnétiques pour des corps de dimensions finies.

Modèle 3 dimensions : géologie et source 3D

Les premières méthodes permettant la résolution des problèmes 3D utilisaient des

intégrales de volume. Formulées par Raiche (1974), Hohmann (1975) et Weidelt (1975), elles ont connu plus de succès que les méthodes à différences finies car elles ne nécessitent le calcul des champs électriques que dans la région de conductivité anormale plutôt que dans tout le domaine d'étude. Cependant, les méthodes intégrales ne permettent pas de résoudre les problèmes là où la géologie est trop complexe. Les méthodes à différences finies se sont développées pour combler cette lacune.

Dans les méthodes intégrales, seul le corps de conductivité anormale est divisé en N cellules de dimensions fixées dont le courant secondaire est supposé constant. L'équation intégrale est approximée par la sommation :

$$E(r) = E_p(r) + \sum_{n=1}^N \int_{v_n} \tilde{G}(r, r') dv' \cdot J_s^n \quad (3.10)$$

$\tilde{G}$ représente le tenseur de Green et E_p est le champ primaire, tous deux définis précédemment. L'intégration sur le tenseur de Green peut être calculé numériquement ou analytiquement sur les volumes ou surfaces de toutes les cellules, dépendant du niveau de complexité du problème. Par exemple, Wannamaker *et al.* (1984) remplace les hétérogénéités par des distributions de courant équivalent afin de résoudre les équations pour des vecteurs de courant dans chaque cellule. Il faut noter que les cellules peuvent prendre différentes formes. Bien que les modèles initiaux supposaient des cellules cubiques, Wannamaker *et al.* (1984) utilise des cellules prismatiques afin de trouver les solutions pour un corps allongé.

Une simplification fréquemment utilisée pour résoudre les cas tri-dimensionnels par équations intégrales est la simplification de type plaque mince. On suppose que l'épaisseur du prisme est infinitésimale et qu'aucun courant ne peut circuler dans cette direction. L'approximation plaque mince permet de résoudre les modèles de tous contrastes de résistivité. Lajoie et West (1976) est le premier à utiliser cette approximation pour calculer les réponses fréquentielles d'une plaque mince dans un demi-espace de différentes résistivités. Le problème du contraste de conductivité entre l'hétérogénéité et le sol est étudié en détails dans l'article de Walker et West (1991). Il propose une paire d'équations différentielles couplées pour exprimer la distribution

des champs secondaires dans une plaque mince.

La solution d'une plaque mince dans un milieu stratifié est de grande importance pour le projet décrit dans ce mémoire. Le système de classification automatique est développé à l'aide d'une banque de données obtenue par la modélisation de plaques minces de différentes propriétés.

Les méthodes à différences finies et à éléments finis permettent de résoudre tous les cas de terrain possibles. Elles nécessitent la discrétisation de toute la surface (pour un cas 2D) ou du volume (cas 3D). La continuité entre les cellules adjacentes est assurée par les dérivées des équations à résoudre. La méthode des différences finies approxime les dérivées des équations par des différences finies entre les cellules. Cette approximation est justifiable pour de petites distances si l'on juge que de faibles changements de conductivité surviennent entre des cellules adjacentes. On obtient un système d'équations exprimant les valeurs de conductivité en tous points d'une grille rectangulaire. Voici l'expression de ce système d'équations à résoudre pour un cas bi-dimensionnel. Le cas tri-dimensionnel est de même nature, une variable en plus.

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + \frac{d^2 E}{dz^2} + k^2 E = S \quad (3.11)$$

La résolution de ce système doit se faire en appliquant les différences finies suivantes en tous points $x(i)$, $z(k)$.

$$\frac{E_{i+1,k} - 2E_{i,k} + E_{i-1,k}}{2h_i^2} + \frac{E_{i,k+1} - 2E_{i,k} + E_{i,k-1}}{2h_k^2} + k^2 E_{i,k} = S_{i,k} \quad (3.12)$$

Des conditions aux frontières doivent être appliquées aux limites du domaine d'étude. Celui-ci est généralement étendu de façon à ce que les dérivées soient nulles entre deux cellules adjacentes. Les méthodes à différences finies sont faciles à comprendre car elles se basent sur des mathématiques relativement simples. Le plus grand désavantage est qu'elles sont restreintes à une grille rectangulaire qui ne permet pas de solutionner les géologies les plus complexes. Le programme TEMDDD décrit par Arnason (1999) permet le calcul des champs électromagnétiques transitoires par différences finies.

Les méthodes par éléments finis offrent une plus grande flexibilité que la grille rectangulaire des différences finies. Les éléments finis permettent de décrire le champ électromagnétique à l'intérieur d'une cellule j en utilisant une fonction définie pour chaque composante. Cette fonction peut être linéaire, quadratique ou même exponentiellement décroissante aux frontières du domaine.

$$E_k = \sum_{i=1}^{nodes} N_i e_{i,k} \quad (3.13)$$

E_k est le champ vectoriel dans l'élément k , N_i est la fonction associée au noeud i et $e_{i,k}$ est le champ vectoriel au noeud i de l'élément k .

Un choix fut effectué au début de ce projet de développer le système de classification automatique des anomalies en restreignant les corps étudiés à des plaques minces. Ce choix est justifié car cela a permis de sauver en temps de modélisation tout en obtenant une banque d'anomalies exhaustive pour développer un système fonctionnel. Une fois développées sur des plaques minces, on peut tenter d'appliquer les équations de régression permettant la classification sur des prismes à épaisseur finie qui seront modélisés par un code d'éléments finis.

3.2.2 Paramètres de modélisation

Comme dans toutes modélisations, plusieurs paramètres doivent être entrés afin de modéliser les réponses souhaitées. Pour la modélisation électromagnétique transitoire, il faut entrer les paramètres concernant le courant initial dans le transmetteur, la fréquence d'émission, l'appareil servant à prendre les mesures, la géométrie et les composantes des récepteurs, les positions de mesure, les temps d'écoute, la lithologie ainsi que l'hétérogénéité.

Onde initiale

L'onde initiale émise par le MEGATEM est de forme demi-sinusoïdale, suivie d'un temps mort pendant lequel les données sont prises à des canaux de temps précis. Le modèle de classification est développé pour une fréquence d'émission de $90Hz$, bien

que le MEGATEM permette aussi la prise de données à une fréquence de $30Hz$. Les paramètres de l'onde sont décrits dans le tableau (2.1). Vingt (20) canaux de temps dont cinq (5) pendant l'émission de courant sont utilisés pour recueillir l'information. La figure (3.7) présente le courant initial émis par le MEGATEM et les positions des canaux de temps pour la fréquence d'émission de $90Hz$.

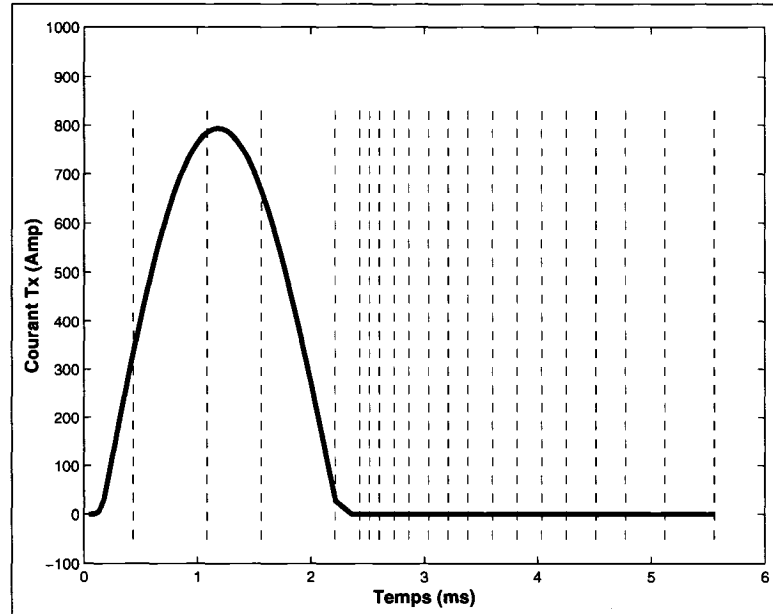


Figure 3.7: Courant injecté et canaux de temps du MEGATEM pour une fréquence d'émission de $90Hz$

Transmetteur

La boucle du MEGATEM est composée de cinq (5) tours d'une boucle carrée de $406m^2$ d'aire. À cause de l'angle de vol de l'appareil, la boucle n'est pas parfaitement horizontale et un angle de 6° doit être pris en compte pour ne pas fausser les données. Avec un courant maximal injecté de huit cents Ampères ($800A$), un moment dipolaire de $1.625 \times 10^6 Am^2$ est produit.

Récepteurs

Trois bobines électromagnétiques servent de récepteurs pour le MEGATEM et permettent de recueillir les dérivées des champs magnétiques dans les trois directions principales. db_x/dt est pris dans la ligne de vol de l'appareil, db_y/dt est perpendiculaire à la ligne de vol et db_z/dt est positif vers le bas. Les récepteurs sont situés dans

une coquille, appelée l’oiseau, qui est traînée par un câble 130m derrière et 50m sous l’avion. Les données du MEGATEM sont traitées en nanoTesla par seconde (nT/s).

Lithologie

En Abitibi, un mort-terrain plus ou moins conducteur est présent au-dessus d’un socle rocheux très résistant. Le mort-terrain, bien que d’épaisseur et de résistivité variables, fut modélisé comme une couche de 20m d’épaisseur et de $20\Omega m$ de résistivité. Le mort-terrain est situé au-dessus d’un socle résistant de $10000\Omega m$.

Lignes de vol

Quatre lignes de vol sont modélisées, séparées de 150m, afin de pouvoir analyser la décroissance latérale d’une plaque dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol. Les lignes de vol doivent être assez longues pour voir toutes les variations des champs électromagnétiques. Les lignes de vol sont volées perpendiculairement à la direction d’élongation du corps conducteur. Après différents tests sur différents types de plaques, des lignes de vol de 3000m avec des points de mesures à tous les 20m furent jugées acceptables tant au niveau du temps de calcul que de la précision des résultats.

Hétérogénéités

Les propriétés des corps doivent être entrées dans le logiciel de modélisation afin d’obtenir les réponses électromagnétiques reliées à ce corps précis. Pour une plaque mince, sa position, sa direction d’élongation, son pendage, sa conductance (conductivité multipliée par l’épaisseur) et sa profondeur doivent être déterminés par l’usager. Plusieurs logiciels permettent à l’usager de déterminer lui-même la discrétisation à utiliser pour obtenir des données de qualité. Pour un prisme, les paramètres sont sensiblement les mêmes que pour la plaque mince, à la différence qu’il faut déterminer l’épaisseur et la conductivité du corps.

3.2.3 Outils de modélisation

Une fois la liste des modèles et des paramètres de modélisation établie, il fallait sélectionner un logiciel permettant d’obtenir une réponse fiable dans des délais raisonnables. Le logiciel doit posséder les algorithmes permettant de calculer la réponse

électromagnétique dans le domaine temporel pour les caractéristiques du MEGA-TEM. La grande majorité des modèles à calculer étaient des plaques minces. Seuls quelques prismes devaient être modélisés, afin de tester le système de classification. Quelques logiciels s'offraient à nous pour ce projet.

PLATE

Le logiciel "PLATE", développé par l'Université de Toronto, utilise les méthodes à équations intégrales pour obtenir les réponses inductives d'une plaque mince dans un environnement infiniment résistant (air). C'est un logiciel simple à utiliser donnant des réponses précises dans un très bref délai. Bien que le logiciel ne contienne pas beaucoup d'options, il fut largement employé afin d'obtenir une première approximation des modèles de type plaque mince.

EMIGMA

"EMIGMA", produit par "PetRos Eikon Inc", est un deuxième logiciel permettant le calcul des réponses électromagnétiques dans le domaine du temps pour les méthodes aéroportées. Le logiciel calcule tout d'abord les réponses dans le domaine des fréquences et l'utilisateur utilise ensuite un algorithme inclus avec le logiciel pour transformer les données dans le domaine du temps.

Deux algorithmes ont été testés; l'algorithme "VHPLATE" permettant le calcul de plaques minces dans un environnement stratifié et l'algorithme "ILN" pour la modélisation de prismes dans un terrain en couches. Les deux algorithmes utilisent la méthode des équations intégrales afin de calculer les réponses dans le domaine fréquentiel. Le développement théorique derrière "VHPLATE" est décrit dans Walker (1995). Le développement mathématique du second algorithme, "ILN" pour "Inductive Localized Non-Linear Approximator", est expliqué en détails dans Groom et Alvarez (2002).

L'algorithme "VHPLATE" est passablement lent pour obtenir les réponses, qui divergent des réponses des autres logiciels pour certains cas précis. De plus, bien que l'algorithme "ILN" semblait prometteur, les réponses obtenues sont extrêmement sen-

sibles à la discrétisation employée pour la cible de conductivité anormale. Ainsi, la modélisation avec le logiciel EMIGMA fut interrompue.

CSIRO

CSIRO propose quatre algorithmes permettant la modélisation de différentes classes de modèles géologiques. “LeroiAir” permet la modélisation de plaques minces dans un environnement à deux strates. “ArjunAir” permet le traitement de modèles complexes à deux dimensions et demi. Deux autres algorithmes (“MarcoAir” et “LokiAir”) permettent aussi le traitement aéroporté d’autres cas de terrain. “MarcoAir” traite par équations intégrales les modèles de prismes dans des environnements à faibles contrastes de conductivité. “LokiAir” utilise les éléments finis pour résoudre tous les cas de terrain possibles (3D).

“LeroiAir” utilise la méthode des équations intégrales et les approximations pour les plaques minces. Il permet d’obtenir les réponses pour tous les contrastes possibles de conductivité. Le temps d’exécution est rapide pour la plupart des modèles et dépend de la discrétisation que l’utilisateur souhaite. “ArjunAir” fut utilisé pour modéliser des prismes avec une épaisseur finie et une extension perpendiculaire infinie. Cet algorithme fonctionne selon la méthode des éléments finis et permet de modéliser tous les terrains bi-dimensionnels possibles. Les réponses sont calculées avec précision aux noeuds de la grille et des fonctions quadratiques sont utilisées afin d’interpoler les réponses entre les noeuds. L’utilisation d’ “ArjunAir” au détriment de “LokiAir” est due à la rapidité de calcul pour des modèles 2D comparativement aux modèles 3D.

Chapitre 4

Modèles de détection de signaux et de classification des anomalies

Un levé MEGATEM génère une imposante quantité de données à interpréter, dans lesquelles il faut pouvoir reconnaître et classer les anomalies. Une méthode de détection des anomalies par les statistiques d'ordre supérieur a été étudiée et est présentée dans la première section de ce chapitre. Cette méthode permet de reconnaître les anomalies présentant un intérêt économique tout en isolant d'autres considérées comme du bruit sur un levé MEGATEM.

Une fois l'anomalie détectée et sa cause reconnue comme un dépôt de sulfures massifs, il faut déterminer les propriétés physiques du dépôt. Une méthode de classification automatique d'anomalies de type plaque mince est développée par régression multi-linéaire. La théorie de la régression et le modèle de classification des anomalies sont présentés dans la deuxième partie de ce chapitre.

4.1 Détection de signaux par statistiques d'ordre supérieur

L'objectif premier de la détection de signal est de décider si un signal est présent sur une série de données ou si les données sont composées uniquement de bruit. La détection de signaux est une branche des mathématiques utile dans divers champs

d'étude. Par exemple, Yonelinas *et al.* (1996) utilise une méthode de détection se basant sur le seuillage pour la conceptualisation de la mémoire humaine. Se rapprochant du domaine de la géophysique, Konstantaras *et al.* (2004) utilise les réseaux de neurones pour la reconnaissance des précurseurs électriques des tremblements de terre. Benavides et Everett (2005) présente trois méthodes de détection de signaux électromagnétiques ; les transformées de Fourier, les transformées par ondelettes et les variogrammes. La détection de signaux électromagnétiques aéroportés par un filtrage comparatif ("matched filtering") est étudiée par Hunter (2004).

Plusieurs techniques de détection peuvent être utilisées, dépendant des données à traiter et du niveau de complexité à atteindre. L'utilisation des statistiques d'ordre supérieur est une méthode simple à mettre en oeuvre qui offre de bons résultats pour la reconnaissance de signaux électromagnétiques.

4.1.1 Théorie de la détection de signal

Avant d'expliquer la théorie de la détection par analyse statistique, on présente tout d'abord quelques notions de statistiques élémentaires qui seront utiles pour le reste de l'analyse. Ces notions sont obtenues de Marcotte (2000) et de Ostle *et al.* (1996). La théorie de la détection provient essentiellement de Kay (1998).

4.1.1.1 Notions élémentaires de statistiques

Ces notions de statistiques permettent de jeter les bases mathématiques utiles pour la détection de signal et la régression multi-linéaire abordée plus loin dans le chapitre. On définit les calculs des valeurs centrales et de dispersion d'une distribution. Ainsi pour une série de données quelconque, la moyenne et la médiane sont souvent utilisées comme mesure de la valeur centrale d'une distribution. La moyenne, ou espérance mathématique d'un échantillon, est exprimée ainsi :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)}{n}. \quad (4.1)$$

La médiane correspond à la valeur dont la moitié des données lui sont supérieures et l'autre moitié inférieures. Elle est plus robuste que la moyenne face aux valeurs

extrêmes d'une distribution.

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_i, & \text{où } i = \frac{n+1}{2} \text{ si } n \text{ est impair,} \\ \frac{x_i + x_{i+1}}{2}, & \text{où } i = \frac{n}{2} \text{ si } n \text{ est pair.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Il est important d'avoir une estimation de la dispersion des données autour de la valeur centrale d'une distribution. La variance et l'écart-type représentent des mesures de dispersion des données autour de la moyenne. On exprime la variance comme

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (4.3)$$

La racine carrée de la variance correspond à l'écart-type

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (4.4)$$

La covariance est une statistique permettant d'établir la force du lien entre deux séries de données x et y . On la définit comme la moyenne de la somme des produits des déviations à la moyenne de chacune des séries de données.

$$s_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (4.5)$$

La valeur de la covariance étant dépendante des unités de mesure des données, on peut normaliser cette information pour permettre les comparaisons. La corrélation entre deux variables est une mesure normalisée de la covariance permettant une meilleure estimation du lien linéaire. Utilisant les équations 4.3 et 4.5, elle est exprimée par le coefficient de corrélation

$$r^2 = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}. \quad (4.6)$$

4.1.1.2 Théorie de la détection du signal par statistiques d'ordre supérieur

La théorie de la détection se base sur les tests d'hypothèse afin d'évaluer l'habilité d'un détecteur à déterminer la fonction de densité de probabilité des données. Deux hypothèses sont émises, une hypothèse nulle où seul le bruit est présent sur le levé et

une hypothèse alternative où du bruit et le signal sont tous deux présents sur le levé. Mathématiquement, on exprime les tests d'hypothèse par un critère de vraisemblance, où le ratio de la probabilité de l'hypothèse alternative sur la probabilité de l'hypothèse nulle doit être plus élevé qu'un seuil déterminé. On définit les hypothèses nulle et alternative suivantes :

$$\begin{aligned} H_0 &= x[0] = w[0] \\ H_1 &= x[0] = s[0] + w[0], \end{aligned}$$

où $x[0]$ est la valeur observée, $w[0]$ est la valeur du bruit et $s[0]$ est le signal à la position 0.

Le théorème de Neyman-Pearson exprime le critère de vraisemblance, qui permet de décider si les données observées contiennent un signal à détecter. Ce critère de vraisemblance est exprimé par le rapport des probabilités suivant :

$$L(x) = \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \gamma. \quad (4.7)$$

où γ est le seuil de décision à déterminer selon les données traitées. Il faut pouvoir détecter un signal lorsque celui-ci est présent et ne rien détecter lorsque les données ne sont composées que de bruit. Cela semble logique mais deux types d'erreurs peuvent survenir lors d'une analyse de détection. Le critère de vraisemblance peut indiquer la présence d'un signal alors que les données ne sont composées que de bruit ; on parle de fausse alarme ("FA"). On peut aussi décider que les observations ne sont composées que de bruit alors qu'un signal est réellement présent ; on parle alors de cible ratée.

Le seuil de décision est déterminé selon la fonction de densité de probabilité des données et selon la probabilité de détection désirée dans l'analyse (α). Il faut minimiser les probabilités d'erreur lors de la détection. Ainsi, on peut établir le seuil de décision en exprimant la probabilité de fausse alarme pour une probabilité de détection déterminée avec la formule suivante :

$$P_{FA} = \int_{x: L(x) > \gamma} p(x; H_0) dx = \alpha. \quad (4.8)$$

Si le signal à détecter est de nature aléatoire et possède une structure de covariance connue, le seuil de décision est établi selon un détecteur d'énergie se basant sur la variance des données. On décide de l'hypothèse H_1 (signal plus bruit) lorsque la relation (4.9) est vérifiée pour chaque observation n sur une fenêtre de N données :

$$T(x)_n = \sum_{i=n-N/2}^{i=n+N/2} x^2[i] > \gamma'. \quad (4.9)$$

Le détecteur d'énergie est un estimateur de la variance des données, calculé sur toutes les fenêtres de points d'un levé. La comparaison du détecteur au seuil reconnaît que la variance sous H_0 est s^2 , et augmente à $s_s^2 + s^2$ sous H_1 .

La méthode appliquée pour détecter les anomalies sur les levés MEGATEM se base sur les concepts de décision pour un processus aléatoire. La méthode est adaptée pour tenir compte des caractéristiques des données MEGATEM.

4.1.2 Modèle de détection des anomalies MEGATEM

Le système de détection étudié s'appuie sur les fondements mathématiques que l'on vient d'énoncer. Le script MATLAB *VMSdetect.m* présenté dans le disque d'accompagnement est utilisé pour faire la détection d'anomalies sur un levé MEGATEM.

Le modèle permet de traiter les données provenant de différentes sources. Il ne traite cependant qu'une ligne de vol à la fois. Les données de $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ des canaux temps mort sélectionnés par l'utilisateur sont gardées pour l'analyse.

Sur chaque canal de temps, une variance courante sur un nombre de points déterminé est calculée sur la ligne de vol des levés $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$. La longueur de l'intervalle de la médiane courante est choisie par l'utilisateur. Pour les tests effectués, 20 points ont été employés pour le calcul de la variance. En tenant compte d'une séparation entre les points de 15 mètres pour les données réelles et de 20 mètres pour les données modélisées, les variances courantes sont donc calculées sur des intervalles respectifs de 300 et 400 mètres. Une variance et un écart-type globaux sont aussi

calculés pour chaque ligne de vol.

La variation de la variance courante sert de détecteur d'énergie des anomalies sur les levés MEGATEM. Le seuil de détection utilisé est fonction du bruit estimé par Fugro sur les levés MEGATEM acquis en Abitibi en 2003 et de l'écart-type global d'une ligne de vol. On garde en mémoire les positions où la variance courante est simultanément plus élevée que le bruit MEGATEM et que l'écart-type global de la ligne de vol pour chaque canal de temps.

Il ne suffit pas d'obtenir des variances courantes plus élevées qu'un certain niveau de bruit pour assumer la présence d'un dépôt de sulfures massifs. Les gisements de VMS ayant habituellement une certaine conductivité, une anomalie doit être détectable sur un certain nombre de canaux de temps. Par essais et erreurs, on trouve qu'une anomalie doit être détectable simultanément sur $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ sur au moins trois canaux de temps pour qu'il s'agisse d'une anomalie digne d'intérêt.

Le reste de l'analyse doit se faire visuellement par le géophysicien. Plusieurs types d'anomalies peuvent être retenus par le système de détection. Il faut être en mesure de reconnaître les plaques minces des autres anomalies afin de les analyser par le système de classification automatique. La longueur d'onde des anomalies sur $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ peut donner de l'information additionnelle sur la source de l'anomalie. La constante de temps peut aussi être analysée et comparée à la constante de temps calculée à d'autres positions sur le levé. La constante de temps d'une plaque mince donne une droite sur un graphique semi-logarithmique de $\partial b_z / \partial t$ en fonction du temps. On peut donc juger de la source de l'anomalie selon le type de décroissance du champ magnétique secondaire ainsi que sa valeur.

Le système ainsi étudié permet de reconnaître une anomalie par le calcul d'un cumulant d'ordre deux (variance courante) sur un nombre limité de points de mesure. Ce système reconnaît certains types d'anomalies en gardant seulement les anomalies observées sur plusieurs canaux de temps sur $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$. Il ne permet cependant pas de séparer tous les types d'anomalies visibles et une étude plus approfondie des

anomalies générées sur un levé MEGATEM devrait permettre de compléter l'étude et ainsi améliorer les résultats obtenus par le détecteur d'énergie.

4.1.3 Tests de détection effectués sur des levés MEGATEM

Différents types de modèles ont été utilisés pour tester le système de détection des anomalies MEGATEM. Des modèles de plaque mince sont utilisés pour étudier les limites de détectabilité du système (profondeur, conductance extrême). Des modèles de prisme ont aussi été testés, pour voir les limites du système pour séparer les corps de type plaque mince et tri-dimensionnels. Quelques modèles représentant des variations des paramètres du mort-terrain ont aussi été utilisés. Le système a ensuite été employé pour détecter les dépôts de sulfures massifs sur des véritables levés MEGATEM.

L'annexe A présente les résultats des tests de détection effectués sur les modèles numériques et sur les données de terrain MEGATEM. Pour tous les modèles, les résultats sont tous présentés selon le même format. Les graphiques du haut présentent les courbes de $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ et la détection sur chacun de ces levés. Les courbes à traits fins représentent la détection sur chacun des canaux de temps. Une valeur de 1.00 est donnée lorsqu'une anomalie est détectée. Le trait gras présente les cas où une détection est observée sur au moins 3 canaux de temps. Le graphique du bas présente encore les levés $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ et la détection conjointe sur les deux levés. Une valeur de 1.25 est donnée lorsqu'une anomalie est détectée sur au moins trois canaux de temps simultanément sur chacun des levés.

Les figures (1) à (3) de l'annexe A montrent le potentiel de détection sur des plaques de différentes dimensions. Les plaques de petites dimensions ($100 \times 50m^2$) ne sont détectables qu'à de faibles profondeurs. On voit qu'une profondeur de 75 mètres est la limite de détectabilité pour les petites plaques possédant une conductivité élevée. Les grandes plaques ($500 \times 250m^2$) se voient jusqu'à environ 250 mètres de profondeur, dépendant de la conductance et du pendage de la plaque. Ces figures permettent d'observer le problème inhérent aux méthodes électromagnétiques, soit que les corps de conductivité trop élevée ne sont pas bien détectables car l'amplitude de la dérivée du champ magnétique n'est pas élevée. Ils sont donc difficilement iden-

tifiables sur un levé MEGATEM.

Les prismes sont aussi détectés par une variation de la variance courante. Le pouvoir de détection est cependant moins élevé lorsque les prismes possèdent une certaine épaisseur. Les variations de la dérivée des champs magnétiques sont moins brusques, générant une moins grande variabilité sur la variance courante. Une variance courante calculée sur un moins grand intervalle permettrait de mieux séparer les prismes, dont les variations sont habituellement moins brusques. La longueur d'onde des anomalies peut aussi servir d'indicateur de la source de l'anomalie.

Certains modèles de bruit sont ensuite présentés. Des modèles de larges plaques minces de très faible conductance sont utilisées pour représenter des horizons conducteurs de graphite. Le système ne détecte pas ces corps car leur conductance est trop faible.

Les variations de propriétés du mort-terrain causent des problèmes dans l'interprétation de données MEGATEM car leurs réponses peuvent être semblables aux réponses des plaques minces. Les trois premières anomalies de la Figure 7 de l'annexe A représentent des variations dans l'épaisseur du mort-terrain. Les variations sont reconnues par le système de détection. Mais les formes particulières des anomalies permettent de reconnaître que la source de ces anomalies n'est pas un corps de type plaque mince. Les deux dernières anomalies, représentant des variations de la conductivité du mort-terrain, possèdent toutefois des formes semblables aux plaques minces et sont détectées par une augmentation de la variance courante. Selon le type de fluctuations dans les propriétés du mort-terrain, il peut donc être possible de distinguer l'impact du mort-terrain d'une réponse provenant d'un dépôt de VMS.

Une analyse de la décroissance pourrait permettre de mieux reconnaître la source de ces anomalies (Nabighian (1991)). Par exemple, la décroissance des courants de Foucault est de nature exponentielle inverse pour des corps confinés comme des plaques minces et des prismes de dimensions finies. La décroissance suit une loi de puissance inverse pour des demi-espaces homogènes, des terrains stratifiés et des

plaques minces de dimensions infinies. L'amplitude de la décroissance varie aussi en fonction de la géologie présente.

4.1.4 Détection de dépôts de VMS connus

L'algorithme de détection d'anomalies a été testé sur quelques lignes de vol du MEGATEM. Les levés au-dessus de ISO, New-InSCO, Gallen et Aldermac sont tout d'abord étudiés. Les réponses MEGATEM de quatre autres dépôts de sulfures massifs fournies par Noranda ont aussi été étudiées. Les résultats de la détection de ces corps sont présentés à l'annexe A.

Le corps d'ISO est facilement visible à l'oeil nu sur les lignes MEGATEM situées directement au-dessus du corps. Il est aussi facilement détecté par les fluctuations d'une variance courante. Les lignes de vol au-dessus de New-InSCO montrent deux anomalies côte-à-côte. Les deux anomalies sont bien détectées, bien que les données de terrain confirment que seule la plus petite correspond au gisement de New InSCO. Deux anomalies sont aussi détectées sur le levé au-dessus de Gallen, une seule correspondant au gisement. Le site d'Aldermac est plus complexe car il est composé de plusieurs lentilles dont les plus importantes ont été exploitées. Des lignes électriques à haute tension sont aussi présentes et sont détectées sur les levés MEGATEM. Ceci peut expliquer pourquoi de nombreuses anomalies sont détectées sur le levé.

Les quatre autres corps sont aussi bien détectés. Deux petites anomalies sont détectées pour le corps #1 au lieu d'une seule. Ceci s'explique par l'étendue de l'anomalie et les variations lentes des réponses électromagnétiques dans l'espace. Les corps #2, 3 et 4 sont très bien détectés.

La méthode des statistiques d'ordre supérieur utilisée pour la détection d'anomalies MEGATEM donne des résultats encourageants. Tous les corps dont les paramètres sont compris dans les limites d'exploitation du MEGATEM sont détectés avec suffisamment de précision. Il reste toutefois des ajustements à faire pour rendre le système plus efficace. On tombe souvent dans le type d'erreur #1, soit les fausses alarmes. Bien des anomalies correspondant à du bruit sont détectées alors qu'elles devraient

être rejetées. L'étude de la décroissance du champ électromagnétique et de la longueur d'onde des anomalies pourrait permettre d'améliorer les résultats de la détection.

4.2 Classification automatique des anomalies MEGATEM par régression

La classification automatique d'anomalies est étudiée depuis plusieurs années dans plusieurs domaines de recherche. Plusieurs méthodes ont été développées. On cite par exemple les réseaux de neurones, les ondelettes et la régression. Palacky (1976) et Papp et Baxter (2002) étudient respectivement la reconnaissance de forme de la décroissance et la décomposition en facteurs pour la classification de signaux électromagnétiques transitoires. Dans Ogilvy (1986) et Ogilvy (1987), l'auteur établit des relations entre les attributs d'un levé électromagnétique transitoire et les paramètres d'une plaque mince conductrice. Les ondelettes ont été utilisées par Vallée *et al.* (2004) pour estimer la profondeur et le type de modèle à partir de données magnétiques. La régression multi-linéaire fut utilisée par Marroquin (1997) sur des signaux électromagnétiques à très basse fréquence, et plus tard par Malo-Lalande (2003) pour estimer les propriétés de corps conducteurs sur des données TDEM avec la configuration boucle simple.

4.2.1 Banque de modèles d'anomalies MEGATEM

La première étape de cette classification est de dresser la liste des gisements de sulfures massifs afin d'obtenir toutes les possibilités de réponses MEGATEM que l'on peut obtenir. Il fut possible d'obtenir une liste des dépôts de sulfures connus en Abitibi ainsi que leurs caractéristiques physiques. Des discussions avec Stéphane Faure de l'Université de Québec à Montréal - CONSOREM et avec Michel Allard de Noranda ont grandement aidé à la recherche d'information sur les dépôts de sulfures massifs en Abitibi. Cette étude permet ainsi de déterminer les limites inférieures et supérieures des propriétés physiques des gisements à modéliser.

L'étude de ces gisements a permis de constater qu'un nombre important de dépôts possède la forme d'une plaque mince, un corps plus facilement modélisable que les

corps tri-dimensionnels. L'étude fut restreinte aux corps d'épaisseur très faible afin de sauver sur le temps de calcul et d'assurer la fiabilité des réponses. Les caractéristiques physiques des plaques furent établies selon la liste des dépôts de sulfures massifs en Abitibi. Le tableau (4.1) donne la liste de ces paramètres, pour un total de 2100 modèles générés avec l'algorithme "LeroiAir".

TAB. 4.1: Liste des modèles de plaques minces modélisés avec LeroiAir

Longueur (m) (strike extent)	Extension (m) (dip extent)	Profondeur (m) (depth)	Conductance (S)	Pendage (°) (dip)
50	50	21	1	30
150	150	50	3	45
300	300	100	10	60
600		200	30	90
		300	100	120
				135
				150

Pour chaque modèle, les dérivées des champs magnétiques sont calculées dans les trois directions principales; $\partial b_x / \partial t$ dans la ligne de vol, $\partial b_y / \partial t$ perpendiculaire à la ligne de vol et $\partial b_z / \partial t$ dans la direction verticale. Les réponses sont obtenues sur les vingt canaux de temps du MEGATEM, bien que seulement les canaux localisés dans le temps mort (canaux 6 à 20) sont utilisés pour les analyses. Même si les données sont calculées sur quatre lignes de vol pour chaque corps, seule la ligne de vol située directement au milieu du corps est utilisée. Cela permet de simplifier le calcul des attributs. Bien qu'un mort-terrain conducteur et un socle résistant soient inclus dans les modèles, on ne garde que l'effet de la plaque mince pour le calcul des anomalies. Une médiane calculée sur chaque ligne de vol permet d'enlever le niveau de base calculé à chaque temps de mesure, et donc de réduire l'effet du mort-terrain.

Le système de classification des anomalies se base sur le calcul des attributs sur ces 2100 modèles génériques dont les propriétés physiques sont connues. Ces modèles servent à établir les relations existantes entre les attributs des levés et les propriétés physiques des corps qui ont créé ces anomalies. Ces relations servent ensuite à estimer les propriétés de gisements de sulfures massifs à partir de données acquises par le MEGATEM.

4.2.2 Détermination des attributs sur les profils MEGATEM

Une quantité importante de données est obtenue par la modélisation. Certaines caractéristiques des anomalies, appelées attributs, sont calculées sur les profils et rassemblent l'information significative contenue sur un levé MEGATEM.

L'étude de la forme et de l'amplitude des anomalies permet de dresser une liste d'attributs intéressants à calculer sur les modèles. Ces attributs doivent offrir une variabilité suffisante pour agir comme base de classification. Les données sont analysées de deux façons ; par la variation des champs magnétiques en fonction de la distance pour un temps donné ou par la décroissance dans le temps du champ magnétique à une position fixe. Une douzaine d'attributs sont calculés pour chaque modèle générique et sont présentés à la figure (4.1).

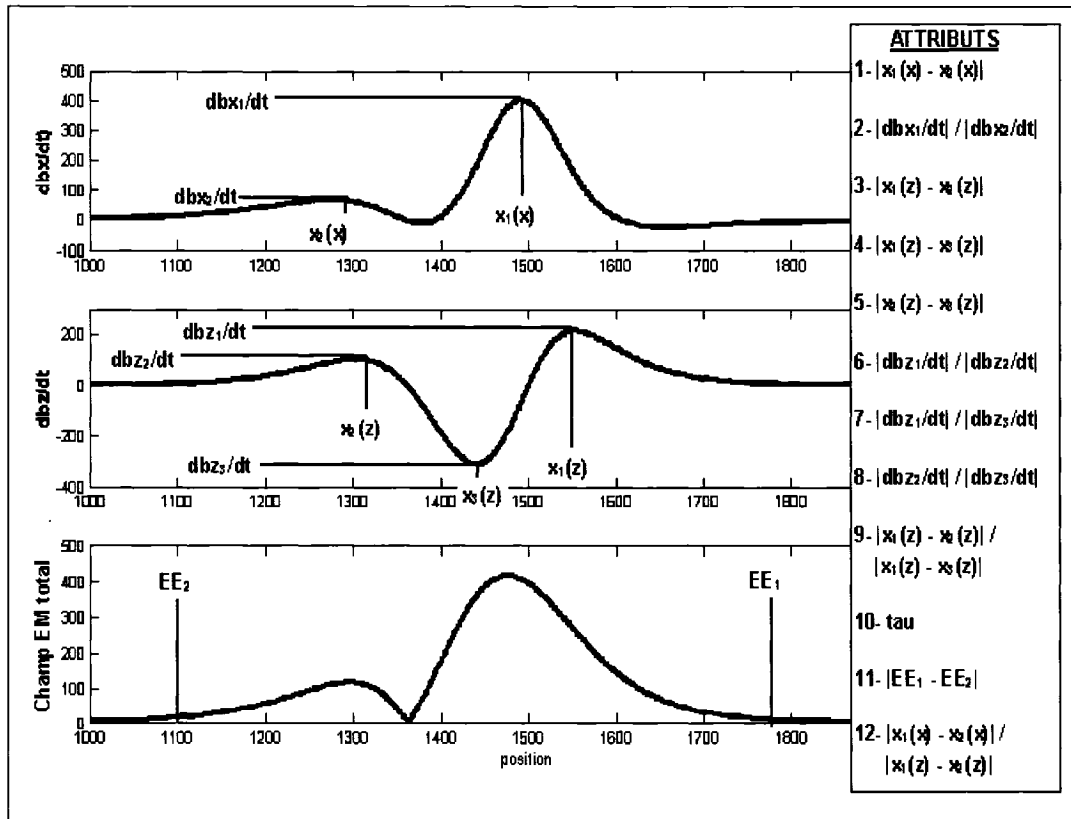


Figure 4.1: Attributs calculés sur un levé MEGATEM

La plupart des attributs représentent des distances entre deux sommets d'un

levé, ou des rapports entre ces sommets. Les deux sommets positifs servent pour le calcul des deux attributs sur le levé $\partial b_x/\partial t$ tandis que les trois sommets du levé $\partial b_z/\partial t$ permettent le calcul de sept autres attributs. La longueur d'onde du champ électromagnétique total et le rapport de deux distances pic à pic sur les levés $\partial b_x/\partial t$ et $\partial b_z/\partial t$ permettent le calcul d'un dixième et onzième attributs. La constante de temps de la plaque $\partial b_z/\partial t$ représente le dernier attribut calculé.

Le calcul des attributs se fait si les réponses de $\partial b_x/\partial t$ et $\partial b_z/\partial t$ sont plus importantes que le niveau de bruit pour au moins un canal de temps. Le niveau de bruit est évalué par "Fugro Airborne Surveys" pour les levés effectués en Abitibi dans le cadre de ce projet de recherche. Sur les 2100 modèles initiaux dont les réponses sont calculées, seuls 1077 d'entre eux ont servi dans le modèle de régression. Les plaques de petites dimensions, de forte profondeur et de faible conductance sont sous-représentées dans le modèle de régression.

Des scripts MATLAB sont utilisés afin de calculer les attributs des modèles génériques. Le faible niveau de bruit sur les levés génériques et l'homogénéité dans les formats des fichiers de données permettent l'utilisation de programmes numériques pour le calcul des attributs. Les scripts principaux sont présentés dans le disque d'accompagnement et sont décrits dans les prochains paragraphes.

PicaPicX.m - PicaPicZ.m

Ces scripts localisent les sommets sur les levés $\partial b_x/\partial t$ et $\partial b_z/\partial t$ et calculent les distances et les rapports possibles entre les sommets. Ils utilisent les changements de signe de la dérivée première des données pour détecter les sommets. Une médiane de chaque attribut est calculée sur tous les canaux de temps utilisés pour garder une seule valeur par modèle. Les canaux de temps utilisés dans le calcul des attributs sont tous ceux dont l'amplitude de la réponse dépasse le niveau de bruit du MEGATEM pour chaque canal spécifique. Pour réduire les effets de mort-terrain et éviter les effets EM aux temps courts pour des corps très conducteurs, on ajoute un facteur pour garder les canaux temps longs seulement.

TAU.m

Le script *TAU.m* permet d'estimer la constante de temps de l'anomalie à la position où $\partial b_z / \partial t$ est à son maximum sur le canal #8. Le canal #8 est choisi car c'est un canal temps court où les réponses MEGATEM sont de forte amplitude et faiblement bruitées. Le canal #8 permet d'observer les réponses de corps de toutes conductivités. La constante de temps est estimée par régression linéaire du logarithme de la dérivée du champ magnétique en fonction du temps sur les canaux temps longs.

CalculEE.m

Ce script permet d'évaluer la longueur d'onde du champ électromagnétique total. Le champ EM total est défini comme $\sqrt{(\partial b_x / \partial t)^2 + (\partial b_z / \partial t)^2}$. On note ensuite par EE_1 et EE_2 les positions limites où le champ EM total dépasse un niveau de bruit. La distance entre ces deux points correspond à la longueur d'onde du champ EM total.

Un système de pondération est établi afin de tenir compte de la qualité des données sur les modèles génériques. Certains modèles génèrent des réponses plus fiables et des poids plus importants leur sont assignés pour les régressions. Les poids sont estimés selon le nombre de canaux utilisés pour le calcul des attributs, l'amplitude des réponses et la variabilité des réponses d'un modèle sur les différents canaux.

4.2.3 Théorie de la régression multi-linéaire

Une fois les attributs calculés sur tous les modèles possédant une réponse au-dessus du niveau de bruit, les relations entre les attributs et les propriétés des plaques minces doivent être estimées. La régression est un outil puissant permettant de déterminer les relations linéaires entre une ou plusieurs variables. La description faite dans ce chapitre de la corrélation et de la régression s'inspire en grande partie de Marcotte (2000).

4.2.3.1 Corrélation entre deux variables

La corrélation entre deux variables est une indication de la force du lien entre ces variables. L'étude des diagrammes binaires est la façon la plus simple d'observer la corrélation entre deux variables. La régression travaillant avec les liens linéaires

seulement, il faut rechercher une façon de quantifier ce lien entre les variables. Cette mesure du lien linéaire entre deux variables s'appelle le coefficient de corrélation. On le définit comme le rapport entre la covariance des variables et le produit de leur variances respectives.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.10)$$

Le coefficient de corrélation tend vers l'unité si le lien linéaire est très fort et vers zéro s'il est inexistant. Il faut noter qu'un coefficient de corrélation près de zéro n'indique pas une absence de relation, mais bien une absence de relation linéaire. On peut utiliser des transformations sur les variables afin de linéariser les relations et ainsi permettre l'utilisation de la régression linéaire classique.

4.2.3.2 Équations de régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple détermine les relations linéaires existant entre plusieurs variables explicatives (variables X) et une variable à expliquer (variable Y). L'équation linéaire suivante, sous forme matricielle, permet de relier les p variables explicatives X à la variable à expliquer Y , pour un nombre n d'observations.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{np} \end{bmatrix}_{n \times p} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix}_{p \times 1} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (4.11)$$

Plus simplement, on utilisera la notation suivante pour la suite des développements mathématiques :

$$Y = Xb + e. \quad (4.12)$$

On cherche à estimer les p coefficients b de façon à minimiser les erreurs e . L'espérance mathématique des erreurs est nulle ($E(e) = 0$), leur variance égale à σ^2 et la distribution suit une loi normale ($e \approx N(0, I\sigma^2)$). Plus précisément, l'objectif est de minimiser la somme des carrés des erreurs :

$$SCE = e'e = (Y - Xb)'(Y - Xb). \quad (4.13)$$

Il s'agit d'un problème d'optimisation où il faut trouver le minimum d'une fonction (SCE). Le minimum d'une fonction est obtenu en calculant la dérivée de cette fonction et en l'égalant à zéro. Dans ce cas-ci, on calcule toutes les dérivées partielles de la somme des carrés des erreurs par rapport aux coefficients. On exprime tout d'abord la somme des carrés des erreurs sous sa forme étendue

$$SCE = Y'Y - Y'Xb - b'X'Y + b'X'Xb, \quad (4.14)$$

et on calcule la dérivée de cette équation, que l'on force à zéro

$$\frac{\partial SCE}{\partial b} = -2X'Y + 2X'Xb = 0. \quad (4.15)$$

On obtient finalement un système de $p + 1$ équations à $p + 1$ inconnues appelées équations normales de la régression.

$$b = (X'X)^{-1} X'Y. \quad (4.16)$$

Le coefficient de corrélation multiple permet de quantifier la force du lien linéaire entre les différentes variables du modèle. Il indique la proportion des variations qui est expliquée par l'équation de régression. On l'exprime en termes de somme des carrés des erreurs et de somme des carrés totaux corrigés pour la moyenne.

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT_m}. \quad (4.17)$$

Les coefficients b ainsi déterminés représentent la meilleure relation linéaire entre un groupe de variables X et une variable à expliquer Y . Si d'autres relations sont suspectées, on peut appliquer des transformations sur les variables X et Y . Le logarithme ou la racine carrée d'une variable sont fréquemment utilisés.

4.2.3.3 Régression multi-linéaire pondérée

Lorsque des observations sont moins sûres que d'autres dans une analyse de régression, on peut utiliser un système de pondération afin de donner plus d'importance aux données les plus fiables. On dit que la variance des observations n'est pas égale ni homogène. Le modèle de régression s'ajustera mieux autour des obser-

vations avec les poids les plus forts. L'idée générale est de transformer les variables Y en des variables Z dont la variable est égale et homogène. Le développement de la régression multi-linéaire pondérée est présenté dans Draper et Smith (1981).

Comme déjà cité, le modèle en considération peut être exprimé par :

$$Y = Xb + e \quad \text{où} \quad E(e) = 0, \quad \text{var}(e) = V\sigma^2 \quad \text{et} \quad e \approx N(0, V\sigma^2). \quad (4.18)$$

La matrice V d'une régression linéaire classique est de forme diagonale, avec les mêmes éléments sur la diagonale. V n'est pas diagonale si les observations sont corrélées entre elles et est diagonale avec des éléments différents sur la diagonale si les observations ont des variances qui ne sont pas constantes. Il est possible de former une matrice non-singulière et symétrique P tel que

$$P'P = P^2 = V.$$

Avec l'ajout de cette matrice P , on peut écrire :

$$f = P^{-1}e \quad \text{où} \quad E(f) = 0, \quad \text{var}(f) = I\sigma^2 \quad \text{et} \quad f \approx N(0, I\sigma^2). \quad (4.19)$$

En pré-multipliant le termes par P^{-1} , il est possible de réécrire l'équation de régression :

$$P^{-1}Y = P^{-1}Xb + P^{-1}e \quad \text{ou} \quad Z = Qb + f. \quad (4.20)$$

On reprend le développement de la régression pour minimiser la somme des carrés des erreurs du système d'équations pondérées. On obtient la solution suivante :

$$b = (X'V^{-1}X)^{-1} X'V^{-1}Y. \quad (4.21)$$

Pour le cas où les observations ne possèdent pas la même variance, l'application de la régression multi-linéaire pondérée est relativement simple. Il suffit simplement de multiplier les variables X et Y par la racine carrée d'une matrice de pondération w qui exprime la variabilité de la variance en terme de poids. Le reste de l'analyse demeure inchangé, en tenant compte que les tests statistiques ne sont plus effectués

sur la variable initiale mais sur les variables transformées.

$$\begin{aligned}\tilde{X} &= \sqrt{w}X \\ \tilde{Y} &= \sqrt{w}Y\end{aligned}\tag{4.22}$$

4.2.3.4 Ajout de variables

Puisque plusieurs variables explicatives (attributs) sont calculées, il faut pouvoir déterminer quelles variables apportent une contribution significative au modèle de régression. Une étude de régression sur les douze attributs des levés MEGATEM donnera un coefficient de la régression pour chacun de ces attributs, peu importe l'importance de ce coefficient sur l'estimation de la propriété. Le test d'ajout permet de déterminer l'importance relative de chacune des variables explicatives. Il s'agit d'un processus de sélection des variables explicatives à garder dans le modèle de régression.

L'ajout de variables compare un modèle complet à un modèle réduit, et juge si la variable ajoutée apporte de l'information significative sur la régression. On définit les modèles réduit et complet comme :

$$\begin{aligned}Y_r &= X_r b_r + e_r \\ Y_c &= X_c b_c + e_c\end{aligned}\tag{4.23}$$

où les sommes des carrés des erreurs équivalent :

$$\begin{aligned}SCE_r &= Y_r' (I - X_r (X_r' X_r)^{-1} X_r') Y_r \\ SCE_c &= Y_c' (I - X_c (X_c' X_c)^{-1} X_c') Y_c.\end{aligned}\tag{4.24}$$

Statistiquement, on observe que la différence entre les sommes des carrés des erreurs suit une loi du χ^2 dont le nombre de degrés de liberté est égal au nombre de variables ajoutées du modèle réduit au modèle complet. On apprend aussi que la somme des carrés des erreurs suit aussi une loi du χ^2 dont le nombre de degrés de liberté est $n - p - 1$, où n est le nombre d'observations et p le nombre de variables dans le modèle complet. Le rapport entre deux lois du χ^2 doit suivre une loi de Fisher.

On obtient le test statistique de Fisher suivant :

$$\frac{(SCE_r - SCE_c) / k}{SCE_c / (n - p - 1)} \cong F_{k, (n-p-1)} \quad (4.25)$$

où k est le nombre de variables ajoutées au modèle réduit.

Il faut sélectionner un sous-ensemble de variables de façon à ne pas perdre d'information utile dans la régression. Parmi les méthodes de sélection existantes, on note la sélection avant, l'élimination arrière et la sélection pas-à-pas.

La sélection avant débute le processus avec aucune variable dans la régression. À chaque itération, on introduit la variable apportant la plus forte croissance du coefficient de corrélation et on arrête lorsque l'augmentation du R^2 n'est plus significative.

L'élimination arrière fonctionne à l'inverse de la sélection avant. On démarre avec toutes les variables dans le modèle de régression. On enlève la variable donnant la plus faible diminution du R^2 et on arrête lorsque la diminution du coefficient de corrélation devient significative.

La méthode de sélection pas-à-pas applique en alternance une itération de sélection avant et une itération d'élimination arrière. On arrête lorsqu'on ne peut plus ajouter ni enlever de variables. La méthode de sélection pas-à-pas est employée dans ce projet afin de sélectionner les attributs significatifs pour estimer les propriétés des dépôts de sulfures massifs.

4.2.3.5 Validation du modèle de régression

Il existe deux classes de méthodes pour la validation d'un modèle de régression. La première classe utilise des tests statistiques afin de comparer les résultats avec des valeurs théoriques de distributions connues. La deuxième méthode est plus informelle et se veut une étude visuelle et qualitative de graphiques et des résidus (ou erreurs) de la régression.

La valeur du coefficient de corrélation multiple est la première statistique à regarder. Plus celui-ci est élevé, meilleure est la régression. On observe aussi sa fluctuation avec l'ajout des variables et les transformations effectuées sur les variables X .

Le test d'ajout permet d'analyser le rapport entre la différence des sommes des carrés des erreurs des modèles réduit et complet et la somme des carrés des erreurs du modèle complet. On compare ce rapport à la valeur obtenue dans la distribution de Fisher selon les paramètres du test d'ajout. Si la valeur obtenue par le test d'ajout est supérieure à la valeur lue dans la table de Fisher, alors l'ajout de la ou des variables est significatif.

L'intervalle de confiance des coefficients b de la régression indique l'impact d'une variable sur le résultat final. L'intervalle de confiance nous indique la probabilité de retrouver un coefficient dans un intervalle de valeurs. Il est exprimé ainsi :

$$b \pm t\sqrt{s_b^2}$$

où s_b^2 est la variance des coefficients et t est le paramètre de Student, soit un paramètre de distribution de données selon le nombre d'observations et le niveau de confiance souhaité. On peut normaliser les coefficients pour permettre des comparaisons entre eux. Un coefficient dont l'intervalle de confiance comprend la valeur zéro n'est pas significatif puisqu'une valeur nulle peut être incluse dans le modèle. Un coefficient normalisé trop faible en comparaison des autres coefficients ajoute peu d'information et peut être écarté du modèle final.

L'influence d'une observation D_i est une statistique qui permet d'analyser l'impact de chacune des observations. On enlève successivement chaque observation et on refait la régression avec les observations restantes. Si les coefficients changent considérablement, on peut suspecter que l'observation enlevée possède un poids qui est anormal et qu'elle influence trop le modèle de régression. Les observations ayant une trop forte influence peuvent être exclues du modèle de régression. Une valeur d'influence supérieure à 1 (parfois même à 0.5 dans certains cas) est jugée influente pour un modèle de régression multi-linéaire classique. Aucune référence ne fut trouvée pour

l'analyse de l'influence des observations pour une régression multi-linéaire pondérée. Suite à une analyse visuelle des valeurs d'influence des observations, un plateau variable fixé à trois écart-types des valeurs de D_i fut utilisé pour la détection des données trop influentes.

L'analyse graphique et l'analyse des résidus de la régression est une partie importante de la validation du modèle de régression. Avant même d'effectuer la régression, il est important de regarder les diagrammes binaires entre les attributs et les variables à expliquer. Cela permet de détecter à priori certaines relations évidentes et certaines transformations pouvant être appliquées sur les variables.

L'étude des résidus est très importante car elle permet de détecter les faux pas de la régression. Les graphiques des résidus de la régression en fonction de chacune des variables X sont tracés pour faire l'analyse des résidus. Ces graphiques permettent de juger de la normalité et de l'homogénéité des résidus. Les histogrammes des résidus permettent le même traitement. Les tendances particulières doivent être détectées, autant sur les graphiques des variables X qui sont utilisées dans le modèle de régression que sur les variables non-utilisées.

4.2.4 Modèle final de régression multi-linéaire pondérée

La régression multi-linéaire pondérée est utilisée dans ce projet afin de déterminer les relations entre les attributs des levés MEGATEM et les propriétés des plaques minces ayant générées ces levés. Une fois les relations estimées, le système final de classification est testé sur d'autres modèles numériques et sur des données de terrain acquises par le MEGATEM.

4.2.4.1 Variables X et Y de la régression

Les attributs des levés MEGATEM correspondent aux variables explicatives X et les propriétés des plaques minces aux variables à expliquer Y de la régression. Des transformations sont appliquées sur certains attributs afin d'obtenir une distribution normale des données, et ainsi améliorer les régressions. Certains attributs sont exclus du système de régression car ils ajoutent peu d'information supplémentaire. Ainsi, sur

le levé $\partial b_z / \partial t$, trois sommets sont utilisés pour le calcul des distances entre sommets. Une seule mesure de distance entre sommets est utilisée pour la régression, soit celle entre les pics les plus éloignés.

Les propriétés utilisées pour construire les modèles MEGATEM sont la longueur de la plaque, l'extension dans la direction du pendage, la profondeur, le pendage et la conductance. Des transformations sont aussi appliquées sur les propriétés afin d'améliorer les résultats des régressions.

Puisque le système de classification n'utilise qu'une ligne de vol, il est difficile d'estimer avec précision la longueur et l'extension selon le pendage des plaques. L'estimation de la longueur est très dépendante de l'empreinte au sol du MEGATEM et l'extension suivant le pendage dépend beaucoup de la profondeur d'investigation de l'appareil. Pour améliorer les estimations, on multiplie ces deux propriétés ensemble et on trouve la relation linéaire entre les attributs et l'aire de la plaque mince. On obtient ainsi une estimation de la taille minimale de la plaque ayant engendré les réponses électromagnétiques. Les tableaux (4.2) et (4.3) résument les propriétés à estimer et la liste des attributs.

TAB. 4.2: Liste des propriétés à estimer (Variables Y de la régression)

Propriétés initiales	Propriétés transformées
Longueur (m)	$\log Taille$
Extension selon le pendage (m)	
Pendage (°)	Pendage (°)
Profondeur (m)	Profondeur (m)
Conductance σt (S)	$\log \sigma t$

TAB. 4.3: Liste des attributs (Variables X de la régression)

1- $ x_1(x) - x_2(x) $
2- $\log(dbx_1/dt / dbx_2/dt)$
3- $ x_1(z) - x_2(z) $
4- $\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$
5- $\log(dbz_1/dt / dbz_3/dt)$
6- $\log(dbz_2/dt / dbz_3/dt)$
7- $\log(x_1(z) - x_2(z) /$ $ x_1(x) - x_2(x))$
8- $\log(\tau)$
9- $ EE_1 - EE_2 $
10- $\log(x_1(x) - x_2(x) /$ $ x_1(z) - x_2(z))$

4.2.4.2 Modèle de classification multi-couches

L'analyse des distributions des attributs calculés sur les modèles génériques permet de constater que plusieurs de ces attributs ont des distributions multi-modales. Bien que la régression soit assez tolérante face à l'hypothèse de normalité des variables explicatives, la présence de distributions multi-modales peut suggérer une séparation à priori des modèles selon des classes précises. Les histogrammes de la figure (4.2) présentent les distributions des dix attributs utilisés dans la régression pour tous les modèles.

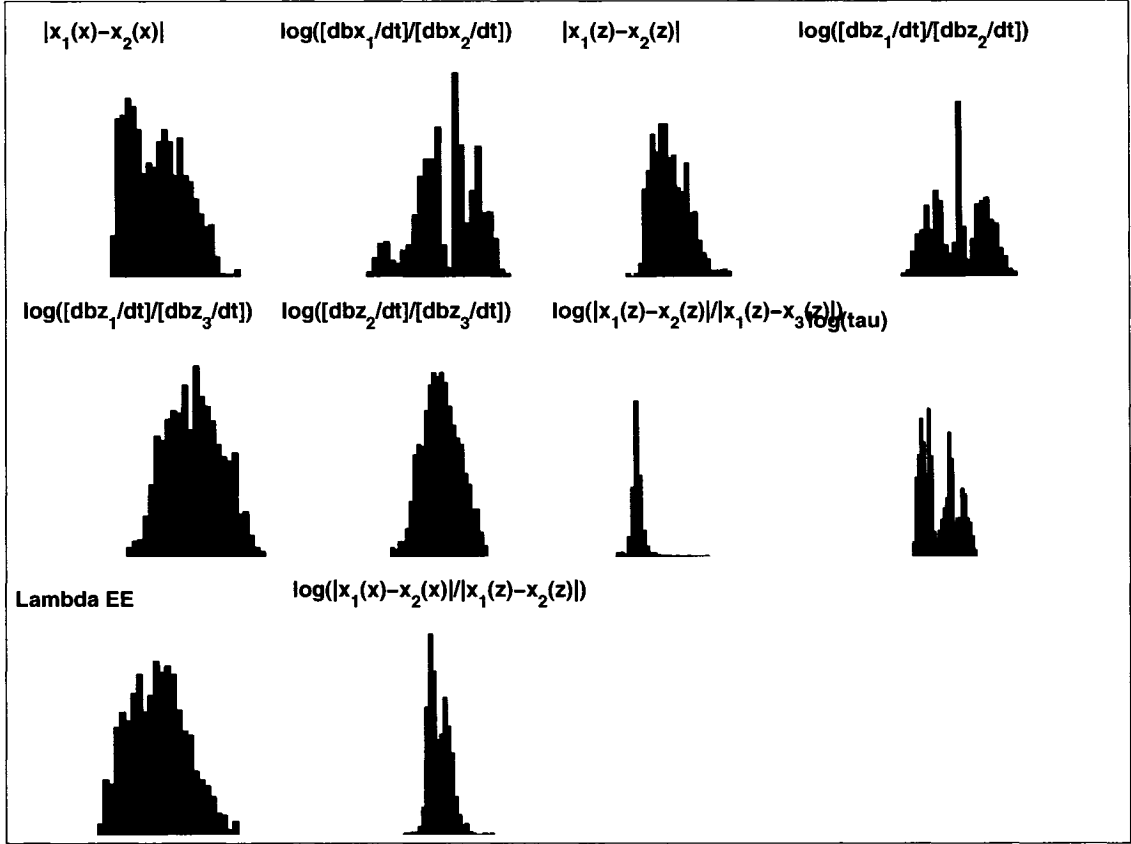


Figure 4.2: Histogrammes des attributs utilisés dans le système de régression

Une analyse rapide de la valeur des attributs en fonction des propriétés des modèles propose de séparer les modèles selon trois grandes classes; avec pendage vertical ($\theta = 90^\circ$), pendage de moins de 90° et pendage de plus de 90° . La classification des anomalies s'effectue en deux étapes. Une première régression permet d'estimer le pendage de tous les modèles. Une fois le pendage déterminé, on redirige les informations vers la classe de modèles appropriée. Une relation de régression est déterminée pour chaque propriété dans chaque classe de modèles. Le schéma de la figure (4.3) présente les étapes de classification des anomalies.

À chaque étape du système de classification, les coefficients de la régression doivent être déterminés. Une régression pas-à-pas est tout d'abord effectuée afin d'analyser l'impact de chaque variable sur la propriété à estimer. On effectue ensuite une régression multi-linéaire pondérée avec les variables significatives pour déterminer les

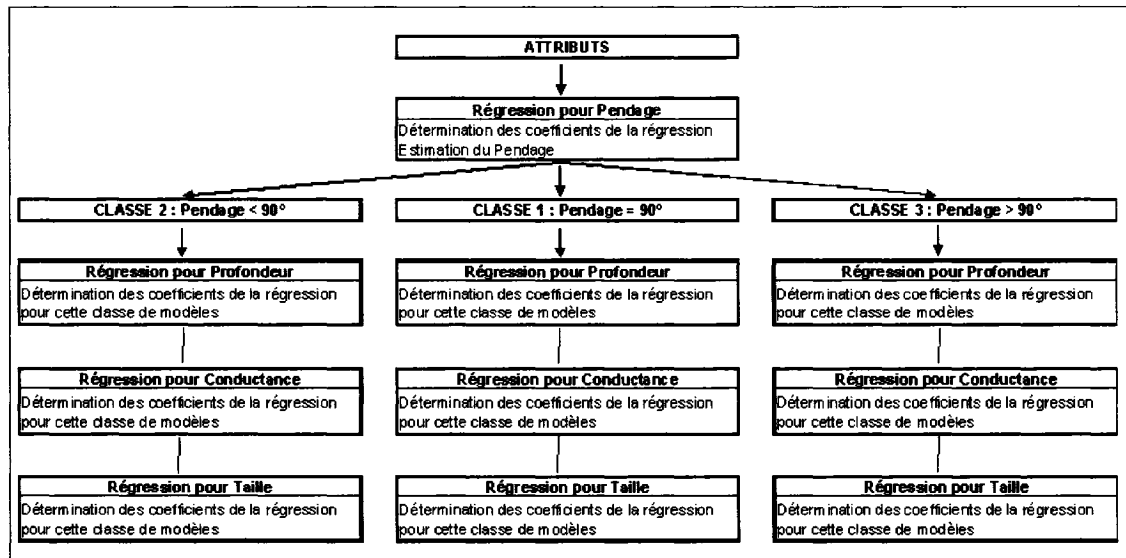


Figure 4.3: Schéma du système de classification des propriétés de dépôts de sulfures massifs de type plaque mince

coefficients de la régression. Les résultats des régressions sont validés par la statistique de Fisher, les intervalles de confiance sur les coefficients, l'influence des observations et l'étude des résidus. Bien que la validation des régressions comprenne des tests bien précis, ce n'est pas parce qu'une variable est significative statistiquement qu'elle doit être incluse à tout prix dans le modèle. L'utilisateur doit se servir de son intuition pour sélectionner les variables (Leiphart et Hart (2001)).

Dans les paragraphes suivants, on présente les variables significatives et leurs coefficients respectifs pour chaque régression. On obtient ainsi les équations de régression pour chaque propriété. L'annexe B présente les graphiques menant à la validation des résultats des différentes régressions.

4.2.4.3 Régression du pendage

La détermination de la relation entre les attributs et le pendage est effectuée en prenant les réponses MEGATEM de tous les modèles numériques. Le tableau (4.4) donne les variables retenues par la régression pas-à-pas.

TAB. 4.4: Test d'ajout pour la propriété : pendage

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	0,823	3,932E+05	5006,4
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	0,841	3,257E+05	123,7
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	0,855	2,979E+05	100,0

On y observe l'évolution du coefficient de corrélation, la diminution de la somme des carrés des erreurs (SCE) ainsi que le coefficient calculé de Fisher en fonction de l'ajout des variables. La comparaison du coefficient de Fisher avec une valeur théorique permet d'évaluer le caractère significatif de l'ajout de chacune des variables.

On remarque que la variable $\log \frac{|dbz_1/dt|}{|dbz_2/dt|}$ prise séparément, présente la plus grande corrélation avec le pendage. À elle seule, elle permet d'expliquer plus de 80% des fluctuations et possède un coefficient de Fisher très élevé. Une relation semblable avait déjà été découverte par Palacky et West (1973) pour l'estimation du pendage d'une plaque mince à partir de données MEGATEM.

Les trois variables de ce tableau sont utilisées pour trouver les coefficients de la régression. Le tableau (4.5) présente les intervalles de confiance calculés sur les coefficients. Les coefficients normalisés par la variance des attributs sont aussi présentés.

TAB. 4.5: Coefficients de la régression pour la propriété : pendage

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s^2_b)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s^2_b)^{(1/2)}$	
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	12,29	12,66	13,04	33,47
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	35,07	39,06	44,85	8,35
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	-43,66	-37,25	-30,85	-4,74
b ₀	108,9	113,9	119,0	NaN

Ces coefficients de la régression permettent d'écrire l'équation de régression pour

le pendage et servent de points de comparaison permettant de juger de l'importance relative de chaque coefficients. En tenant compte du poids des attributs, on obtient un coefficient de corrélation final $R^2 = 0.87$.

$$\begin{aligned} \theta = & 113.9 + 12.66 \log \frac{|\partial b z_1 / \partial t|}{|\partial b z_2 / \partial t|} + 39.06 \log \frac{|x_1(x) - x_2(x)|}{|x_1(z) - x_2(z)|} \\ & - 37.25 \log \frac{|x_1(z) - x_2(z)|}{|x_1(z) - x_3(z)|} \end{aligned} \quad (4.26)$$

En pratique, on jugera qu'une plaque est verticale (type classe 1) lorsque le pendage estimé est compris entre 85° et 95° . La classe 2 comprend les plaques dont le pendage est moins de 85° et la classe 3 inclut les corps dont le pendage est plus de 95° .

4.2.4.4 Régression de la profondeur

Trois régressions distinctes sont effectuées pour estimer la profondeur, dépendant du pendage des modèles. Le tableau (4.6) montre les variables significatives obtenues pour l'estimation de la profondeur pour les trois classes de modèles.

Quatre ou cinq attributs sont nécessaires pour obtenir une relation de régression suffisamment précise. On remarque que, bien que les mêmes attributs soient présents dans les trois classes de modèles, leur importance relative varie considérablement d'une classe à une autre. Ceci est dû aux différences marquées dans les formes des anomalies dépendant du pendage, jouant ainsi sur les valeurs des attributs calculés sur les levés. Les coefficients de la régression sont présentés dans le tableau (4.7).

Les coefficients de corrélation des régressions finales pondérées varient en fonction de la classe des modèles. Le coefficient de la classe 1 est de 0.93 ; il est de 0.89 pour la classe 2 et de 0.82 pour la classe 3.

TAB. 4.6: Test d'ajout pour la propriété : profondeur

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ EE_1 - EE_2 $	0,710	1,250E+05	10,0
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,738	1,128E+05	14,8
$ x_1(x) - x_2(x) $	0,829	7,376E+04	72,6
$\log(\tau)$	0,883	5,060E+04	62,3
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	0,915	3,668E+04	51,2

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,615	7,721E+05	732,5
$ x_1(x) - x_2(x) $	0,728	5,456E+05	190,2
$\log(\tau)$	0,794	4,120E+05	148,2
$ EE_1 - EE_2 $	0,867	2,663E+05	249,6
$\log(dbz_2/dt / dbz_3/dt)$	0,879	2,433E+05	42,9

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,611	8,054E+05	734,4
$\log(\tau)$	0,702	6,167E+05	142,6
$ EE_1 - EE_2 $	0,800	4,136E+05	228,4
$\log(dbz_2/dt / dbz_3/dt)$	0,842	3,265E+05	123,7

TAB. 4.7: Coefficients de la régression pour la propriété : profondeur

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
$ EE_1 - EE_2 $	-0,081	-0,073	-0,064	-20,06
$ x_1(z) - x_2(z) $	2,463	2,686	2,909	204,99
$ x_1(x) - x_2(x) $	18,42	21,59	24,77	-201,61
log(tau)	-1,963	-1,743	-1,523	18,63
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	252,4	336,9	421,4	43,46
b_0	-178,5	-155,7	-132,9	NaN

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,865	0,913	0,960	90,17
$ x_1(x) - x_2(x) $	22,88	25,08	27,27	-31,37
log(tau)	-0,079	-0,073	-0,066	20,71
$ EE_1 - EE_2 $	-0,224	-0,187	-0,149	-21,08
$\log(dbz_2/dt / dbz_3/dt)$	-8,269	-6,555	-4,840	-8,73
b_0	-92,29	-83,22	-74,15	NaN

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,519	0,546	0,573	46,97
log(tau)	35,17	37,82	40,47	32,67
$ EE_1 - EE_2 $	-0,092	-0,085	-0,776	-24,64
$\log(dbz_2/dt / dbz_3/dt)$	12,93	14,84	16,76	20,32
b_0	-37,63	-23,60	-9,57	NaN

Voici les équations de régression finales estimées pour les trois classes de modèles.

Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

$$\begin{aligned} Z_1 = & -155.7 - 0.073|EE_1 - EE_2| + 2.686|x_1(z) - x_2(z)| + 21.59|x_1(x) - x_2(x)| \\ & - 1.743 \log \tau + 336.9 \log \frac{|x_1(x) - x_2(x)|}{|x_1(z) - x_2(z)|} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

$$\begin{aligned} Z_2 = & -83.22 + 0.913|x_1(z) - x_2(z)| + 25.08|x_1(x) - x_2(x)| - 0.073 \log \tau \\ & - 0.187|EE_1 - EE_2| - 6.555 \log \frac{|\partial b_{z_2}/\partial t|}{|\partial b_{z_3}/\partial t|} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

$$\begin{aligned} Z_3 = & -23.60 + 0.546|x_1(z) - x_2(z)| + 37.82 \log \tau - 0.085|EE_1 - EE_2| \\ & + 14.84 \log \frac{|\partial b_{z_2}/\partial t|}{|\partial b_{z_3}/\partial t|} \end{aligned} \quad (4.29)$$

4.2.4.5 Régression de la conductance

Le tableau (4.8) présente les résultats des régressions pas-à-pas obtenus pour les trois classes de modèles. Seules les statistiques des attributs significatifs sont présentées.

Les résultats obtenus ne sont pas surprenants. La constante de temps ($\log \tau$) est l'attribut le plus important pour estimer la conductance des corps électromagnétiques. Elle est d'une importance capitale pour tous les modèles. Les autres variables sont nécessaires pour ajuster finement les estimations, une fois l'impact de la constante de temps enlevé. Une transformation est appliquée sur la conductance. On effectue les régressions sur les logarithmes de la conductance et non sur la valeur de la conductance directement. Les coefficients de la régression de la conductance sont présentés dans le tableau (4.9).

TAB. 4.8: Test d'ajout pour la propriété : conductance

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
log(tau)	0,688	9,590E+01	301,4
x ₁ (x) - x ₂ (x)	0,872	3,927E+01	196,1
EE ₁ - EE ₂	0,921	2,410E+01	85,0

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
log(tau)	0,687	3,377E+02	1006,2
EE ₁ - EE ₂	0,786	2,311E+02	210,8
log(x ₁ (z) - x ₂ (z) / x ₁ (z) - x ₃ (z))	0,843	1,692E+02	167,1
x ₁ (x) - x ₂ (x)	0,876	1,343E+02	118,1

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
log(tau)	0,689	3,396E+02	1005,6
log(dbz ₂ /dt / dbz ₃ /dt)	0,776	2,449E+02	175,1
EE ₁ - EE ₂	0,821	1,952E+02	115,2
log(x ₁ (z) - x ₂ (z) / x ₁ (z) - x ₃ (z))	0,859	1,543E+02	119,5

TAB. 4.9: Coefficients de la régression pour la propriété : conductance

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
log(tau)	1,214	1,283	1m3517	1,11
$ x_1(x) - x_2(x) $	0,0045	-0,0039	-0,0033	-0,45
$ EE_1 - EE_2 $	-0,0017	-0,0015	-0,0013	-0,42
b_0	6,361	6,553	6,746	NaN

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
log(tau)	1,285	1,335	1,385	1,13
$ EE_1 - EE_2 $	-0,0017	-0,0015	-0,0014	-0,44
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	-3,153	-2,794	-2,434	-0,41
$ x_1(x) - x_2(x) $	-0,0028	-0,0024	-0,0020	-0,28
b_0	7,846	8,146	8,447	NaN

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b^2)^{(1/2)}$	
log(tau)	1,452	1,502	1,553	1,30
$ EE_1 - EE_2 $	-0,0019	-0,0017	-0,0016	-0,50
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	3,395	3,788	4,181	0,45
b_0	2,0552	2,3822	2,7092	NaN

Après avoir effectué les régressions pondérées avec les attributs significatifs, on obtient des coefficients de corrélation assez élevés de 0.96, 0.92 et 0.91 pour les trois classes respectives. Les équations de régression du logarithme de la conductance sont les suivantes.

Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

$$\begin{aligned} \log \sigma t_1 = & 6.553 + 1.283 \log \tau - 0.0039 |x_1(x) - x_2(x)| \\ & - 0.0015 |EE_1 - EE_2| \end{aligned} \quad (4.30)$$

Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

$$\begin{aligned} \log \sigma t_2 = & 8.146 + 1.335 \log \tau - 0.0015 |EE_1 - EE_2| - 2.794 \log \frac{|x_1(z) - x_2(z)|}{|x_1(z) - x_3(z)|} \\ & - 0.0024 |x_1(x) - x_2(x)| \end{aligned} \quad (4.31)$$

Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

$$\begin{aligned} \log \sigma t_3 = & 2.382 + 1.502 \log \tau - 0.0017 |EE_1 - EE_2| \\ & + 3.788 \log \frac{|x_1(z) - x_2(z)|}{|x_1(z) - x_3(z)|} \end{aligned} \quad (4.32)$$

4.2.4.6 Régression de la taille

Les régressions sont appliquées sur le logarithme de la taille de la plaque mince. Les résultats des régressions pas-à-pas pour les trois classes de modèles sont présentés dans les tableaux (4.10) et (4.11).

On remarque que la longueur d'onde du champ EM total ($|EE_1 - EE_2|$) est l'attribut le plus important pour l'estimation de la taille des plaques minces et ce, pour toutes les classes de modèles. Seule la valeur du coefficient varie d'une classe à l'autre.

TAB. 4.10: Test d'ajout pour la propriété : taille

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ EE_1 - EE_2 $	0,751	4,038E+01	426,2
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	0,839	2,619E+01	75,8
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	0,873	2,066E+01	37,2

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ EE_1 - EE_2 $	0,597	1,798E+02	671,9
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,738	1,168E+02	243,5
$\log(dbx_1/dt / dbx_2/dt)$	0,790	9,365E+01	111,6
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	0,812	8,406E+01	51,4

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	R ²	SCE	Fisher
$ EE_1 - EE_2 $	0,482	2,126E+02	426,4
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,722	1,143E+02	393,2
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	0,743	1,054E+02	38,7
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	0,770	9,424E+01	53,7

TAB. 4.11: Coefficients de la régression pour la propriété : taille

a) Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b)^{(1/2)}$	
$ EE_1 - EE_2 $	0,0033	0,0035	0,0037	0,96
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	-20,25	-16,58	-12,91	-0,31
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	-1,079	-0,841	-0,603	-0,18
b_0	8,136	8,333	8,531	NaN

b) Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b)^{(1/2)}$	
$ EE_1 - EE_2 $	0,0029	0,0030	0,0032	0,88
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,0031	0,0035	0,0038	0,31
$\log(dbx_1/dt / dbx_2/dt)$	-0,168	-0,138	-0,107	-0,18
$\log(x_1(x) - x_2(x) / x_1(z) - x_2(z))$	-4,832	-3,977	-3,121	-0,30
b_0	6,865	7,042	7,219	NaN

c) Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

Variables X	Intervalles de confiance sur b			b * std(x)
	$b - t^*(s_b)^{(1/2)}$	b	$b + t^*(s_b)^{(1/2)}$	
$ EE_1 - EE_2 $	0,0025	0,0026	0,0028	0,77
$ x_1(z) - x_2(z) $	0,0036	0,0041	0,0046	0,35
$\log(dbz_1/dt / dbz_2/dt)$	0,122	0,149	0,176	0,22
$\log(x_1(z) - x_2(z) / x_1(z) - x_3(z))$	-2,017	-1,625	-1,233	-0,19
b_0	7,559	7,977	8,395	NaN

Les coefficients de corrélation finaux sont assez élevés pour les trois classes de données, et ce même si les graphiques montrant les résultats ne semblent pas indiquer une bonne relation. Ils sont calculés respectivement à 0.97, 0.94 et 0.94 pour les classes 1, 2 et 3. L'utilisation de poids et du logarithme peut expliquer ce phénomène. Les équations de régression finales sont les suivantes.

Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$

$$\begin{aligned} \log Taille_1 = & 8.333 + 0.0035|EE_1 - EE_2| - 16.58 \log \frac{|x_1(x) - x_2(x)|}{|x_1(z) - x_2(z)|} \\ & - 0.841 \log \frac{|\partial bz_1/\partial t|}{|\partial bz_2/\partial t|} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Classe 2 : $\theta < 85^\circ$

$$\begin{aligned} \log Taille_2 = & 7.042 + 0.0030|EE_1 - EE_2| + 0.0035|x_1(z) - x_2(z)| \\ & - 0.138 \log \frac{|\partial bx_1/\partial t|}{|\partial bx_2/\partial t|} - 3.977 \log \frac{|x_1(x) - x_2(x)|}{|x_1(z) - x_2(z)|} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Classe 3 : $\theta > 95^\circ$

$$\begin{aligned} \log Taille_3 = & 7.977 + 0.0026|EE_1 - EE_2| + 0.0041|x_1(z) - x_2(z)| \\ & + 0.149 \log \frac{|\partial bz_1/\partial t|}{|\partial bz_2/\partial t|} - 1.625 \log \frac{|x_1(z) - x_2(z)|}{|x_1(z) - x_3(z)|} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Le système de classification développé permet l'estimation des caractéristiques physiques d'une plaque mince à partir de données MEGATEM. Plusieurs tests ont été effectués sur différents modèles pour vérifier la fiabilité du système et pour déterminer les limites d'applicabilité du système de classification. Ces tests sont présentés au chapitre suivant.

Chapitre 5

Tests du modèle de classification automatique des anomalies

Les relations déterminées par régression multi-linéaire pondérée sont utilisées pour déterminer les propriétés des dépôts de sulfures massifs sur un levé MEGATEM. La classification des anomalies s'effectue à l'aide du script MATLAB *ClassPara.m* présenté dans le disque d'accompagnement de ce document.

Tous les résultats sont présentés à l'Annexe C. Les graphiques montrent les valeurs prédites par les équations de régression et les valeurs réelles des corps ayant causé ces anomalies. Les valeurs réelles sont les paramètres d'entrée des modèles numériques ou les propriétés estimées par la géologie pour les cas de terrain. Un intervalle de confiance de 95% est calculé pour chaque estimation. Cet intervalle a une signification statistique seulement. Un intervalle de confiance autour d'un estimé qui n'inclut pas la valeur réelle n'indique pas nécessairement que l'estimation est mauvaise. Il faut tenir compte que certains modèles sont plus difficiles à estimer que d'autres et que du bruit sur les données peut déranger les estimations.

5.1 Tests sur modèles génériques de plaques minces

Ce premier groupe de modèles sert à valider les équations de la régression. Ces modèles permettent aussi de vérifier la sensibilité des estimations finales par rapport

à la valeur des propriétés initiales. Les tests sont effectués en variant un paramètre à la fois, en gardant les autres constants pour voir l'impact que ce paramètre peut avoir sur l'estimation des autres paramètres. Les propriétés physiques de tous ces modèles sont comprises à l'intérieur des limites des modèles utilisés pour établir le modèle de régression. Le tableau (5.1) présente toutes les configurations possibles des paramètres des modèles tests présentés.

TAB. 5.1: Liste des modèles tests de plaques minces

Longueur	Extension → pendage	Taille (m ²)	Conductance (S)	Profondeur (m)	Pendage (°)
500	250	125000	5	25	50
			25	75	70
			50	150	90
				250	110
					130
200	100	20000	5	25	50
			25	75	70
			50	150	90
					110
					130
100	50	5000	5	25	50
			25	75	70
			50		90
					110
					130

5.2 Tests pour déterminer les limitations du système de classification

Les modèles présentés dans cette section servent à tester le système de classification pour des modèles de plaques minces possédant des propriétés dépassant les limites des modèles utilisés pour établir les équations de régression. Les équations de régression sont applicables à l'intérieur des limites des variables explicatives. L'extrapolation des équations en dehors de ces limites peut générer des réponses possédant une plus grande variabilité puisque la régression n'avait pas comme objectif initial de minimiser les erreurs sur ces variables. Puisque certains dépôts de sulfures massifs peuvent posséder des caractéristiques différentes des paramètres initiaux, il était intéressant de pousser plus loin l'interprétation.

Les gammes du pendage (30° à 150°), de profondeur et des dimensions modélisés initialement étant assez complètes, seules des cas de conductance extrêmes ont été

testés. D'autres tests permettent de vérifier la qualité des estimations lorsque les paramètres initiaux de la modélisation ne sont pas respectés. Par exemple, que donne la régression si les corps ont une épaisseur finie? Que valent les estimations si les données sont obtenues avec une fréquence d'émission de 30Hz au lieu du 90Hz utilisé pour la modélisation des modèles initiaux? Des lignes de vol excentrées ont aussi été testées, afin d'analyser l'empreinte au sol du MEGATEM et les variations des estimations si les données ne sont pas acquises directement au milieu du corps conducteur. Le tableau (5.2) présente la configuration des modèles utilisés pour tester les limites du système de classification automatique des anomalies.

TAB. 5.2: Liste des modèles tests des limites du système de classification

a) Limites de la conductance

Longueur	Extension -> pendage	Taille (m ²)	Conductance (S)	Profondeur (m)	Pendage (°)
400	300	120000	100	100	60
			120		90
			175		120
			250		

b) Prismes

Longueur	Extension -> pendage	Taille (m ²)	Épaisseur (m)	Conductance (S)	Profondeur (m)	Pendage (°)
500	250	125000	5	5	25	90
			20	60	150	
			50	125		
			100			

c) Fréquence d'émission : 30Hz

Longueur	Extension -> pendage	Taille (m ²)	Conductance (S)	Profondeur (m)	Pendage (°)
500	250	125000	5	25	45
			125	250	90
					135
100	50	5000	5	25	45
			50		90
			125		135

d) Lignes de vol non-centrées

Longueur	Extension -> pendage	Taille (m ²)	Conductance (S)	Profondeur (m)	Pendage (°)
500	250	125000	5	25	60
			50	150	90
			125	250	120
200	100	20000	5	25	60
			50	75	90
			125		120

5.3 Interprétation des tests numériques

5.3.1 Interprétation du pendage

Sur tous les modèles testés, on remarque que le pendage est toujours bien estimé à plus ou moins 5° du pendage réel. Seuls les modèles de plaques minces possédant une faible extension verticale ne permettent pas d'estimer le pendage avec une aussi grande précision. L'estimation reste toutefois fiable. L'estimation semble moins précise pour des corps de grandes dimensions et peu profonds. On observe un problème d'échelle causé par le fait d'analyser un corps qui est trop près de la prise de mesure. On ne voit donc pas bien la plaque dans son ensemble et on manque d'information pour assurer une meilleure estimation du pendage. Celui-ci reste toutefois en-dehors de 5° du pendage initial.

L'estimation du pendage pour des corps possédant une épaisseur finie ne semble pas donner d'aussi bons résultats. Il faut toutefois noter que l'analyse n'est pas exhaustive car seuls des prismes verticaux ont été modélisés. On remarque tout de même que plus l'épaisseur du prisme grandit, plus l'estimation s'éloigne de la valeur initiale. L'estimation est un peu meilleure pour des prismes profonds car la géométrie du problème fait en sorte qu'on se rapproche des conditions d'utilisation de l'approximation plaque mince.

L'estimation du pendage reste fiable si une fréquence d'émission différente est utilisée pour la prise de données. La relation trouvée entre les attributs et le pendage semble être indépendante de la fréquence d'émission du système. On ne peut en dire autant du pendage estimé si la ligne de vol est excentrée par rapport au centre de la plaque. Plus la ligne de vol s'éloigne du milieu du corps, plus l'estimation se dégrade. Les valeurs estimées du pendage semblent se verticaliser lorsque les estimations sont faites sur des lignes de vol excentrées.

5.3.2 Interprétation de la profondeur

L'estimation de la profondeur de la plaque mince est relativement précise. Statistiquement, on note une plus grande variabilité sur les estimés par rapport aux

estimés du pendage. Cependant, géologiquement parlant, une erreur d'interprétation de 25 mètres peut être acceptable dans la plupart des cas. On note toutefois que le système a tendance à sous-estimer les profondeurs lorsque la plaque se trouve à de grandes profondeurs. La profondeur limite où la précision est encore excellente semble être fonction des dimensions de la plaque. Plus la plaque est de grandes dimensions, plus l'estimation est fiable sur de grandes profondeurs. Il serait intéressant de faire le lien entre les dimensions et la profondeur estimée pour voir si une corrélation existe entre les deux variables. Les équations de régression semblent atteindre une limite lorsque la conductance augmente. La profondeur est sur-estimée pour des plaques de conductance extrême, ce qui n'est pas observé sur les modèles initiaux ayant servi à la construction du modèle de classification. On voit bien les limites d'application de la régression, où les conditions initiales doivent être respectées pour assurer la fiabilité des résultats.

L'estimé de la profondeur sur des prismes est moins précis que pour des plaques minces. Les faibles profondeurs sont sur-estimées et les fortes profondeurs sont sous-estimées. La précision sur la profondeur estimée des prismes ne semble pas dépendre de l'épaisseur des prismes car tous les cas étudiés semblent générer le même type de réponse.

L'utilisation d'une plus faible fréquence d'émission change un peu les données. On observe une plus grande variabilité sur les profondeurs estimées pour les plaques près de la surface. L'estimation des corps profonds est cependant plus précise que les estimations obtenues avec une fréquence d'émission de 90Hz , et ce jusqu'à une profondeur de 250 mètres. On note que la constante de temps est impliquée dans l'estimation de la profondeur des plaques minces, et ce pour les trois classes de modèles. Il semble donc logique que la fréquence d'émission ait un impact sur la qualité des estimations de la profondeur. L'utilisation d'une fréquence d'émission plus basse permet de minimiser les effets du mort-terrain, les canaux de temps étant tous situés à des temps plus longs. On peut donc atteindre des profondeurs d'investigation plus élevées avec une fréquence de 30Hz plutôt que 90Hz . L'utilisation conjointe des données acquises au 30Hz et au 90Hz permettrait une estimation fiable pour toutes les profondeurs

déTECTABLES par le MEGATEM. Cette procédure est toutefois difficilement réalisable du point de vue organisation du plan de vol du MEGATEM.

La position de la ligne de vol semble avoir un impact sur la qualité des estimés de la profondeur. Plus on s'éloigne du centre de la plaque, plus l'estimé est grand par rapport à la valeur réelle de la profondeur. Une hypothèse pouvant expliquer cette observation est que le système estime la distance entre le point de mesure et le centre du corps conducteur. Il tient donc compte de la séparation horizontale de la ligne de vol. L'utilisation de plusieurs lignes de vol conjointes pourrait permettre d'obtenir un estimé plus précis de la profondeur.

5.3.3 Interprétation de la conductance

Pour les modèles de plaques minces respectant les conditions d'utilisation du système de classification, la conductance est bien estimée. La taille de la plaque semble avoir un faible effet sur la qualité des estimés car les conductances estimées pour les petites plaques sont légèrement sous-estimées. On remarque que la variabilité de l'estimé augmente avec la conductance du corps. Ceci est dû à l'utilisation du logarithme de la conductance pour bâtir les équations de régression. Même lorsque les conductances initiales dépassent les limites utilisées pour bâtir les équations de régression, l'estimation reste acceptable. L'estimation d'un corps fortement conducteur donne un ordre de grandeur de la qualité du conducteur, mais ne donne pas une valeur aussi précise que les estimés obtenus pour les corps moyennement conducteurs.

L'estimation se dégrade lorsque le corps conducteur ne respecte pas les conditions de plaques minces. L'estimation reste valable pour les corps tri-dimensionnels de faible conductance mais se dégrade lorsque la conductance est trop forte. Les équations de régression sont obtenues pour le calcul de la conductance. Pour une plaque mince, une hypothèse est faite que tous les courants se déplacent dans un même plan. Cette hypothèse n'est plus valable pour les corps tri-dimensionnels. Les courants peuvent se déplacer dans plusieurs directions. La relation simplifiée pour les plaques minces ne peut donc pas s'appliquer sur des prismes d'épaisseur finie.

La fréquence d'utilisation affecte également la valeur des estimés. La conductance des corps très conducteurs est sur-estimée par l'équation de régression. L'estimé reste toutefois valide pour les corps faiblement conducteurs. Un changement dans la fréquence d'émission ne devrait pas affecter la valeur de la constante de temps. Cependant, puisque la position des canaux de temps où τ est calculé change avec la fréquence, les champs électromagnétiques sont affectés différemment par le mort-terrain, variant ainsi la valeur calculée de la constante de temps. Celle-ci jouant un rôle prépondérant dans les régressions, les valeurs estimées de la conductance sont donc logiquement affectées. Des changements dans les valeurs des coefficients de la régression pourraient permettre d'adapter facilement le modèle pour différentes fréquences d'émission. La relation entre la conductance et la constante de temps reste valide peu importe la fréquence d'émission, seule la valeur de décroissance, exprimée par les coefficients de régression, varie. La position de la ligne de vol par rapport au milieu de la plaque affecte peu l'estimation de la conductance.

5.3.4 Interprétation de la taille

L'estimation de la taille des plaques minces génère une plus grande variabilité que l'estimation des autres propriétés. Comme indiqué précédemment, la taille est le produit de la longueur et de l'extension suivant le pendage de la plaque mince. La précision des résultats est plus difficile à atteindre due aux effets inhérents au MEGATEM. Le MEGATEM génère une onde électromagnétique qui interagit avec le sous-sol. La zone contribuant à la réponse mesurée sur une surface est appelée empreinte au sol ("footprint"). Un corps conducteur de grandes dimensions peut ne pas être excité en totalité par le champ initial, avec comme résultat que seul une partie de ce corps pourra être étudiée. De plus, selon la résistivité de la roche environnante, les ondes émises par le MEGATEM ont une certaine profondeur d'investigation, évaluée à environ 300 mètres dans le socle archéen de l'Abitibi. Un corps possédant une grande étendue verticale ne pourra donc pas être perçu au complet par le MEGATEM. L'estimation des dimensions des plaques minces sera donc affectée. Il faudra être attentif à l'estimation des autres paramètres pour mieux juger de la précision de l'estimation des dimensions du corps conducteur.

Les estimations des dimensions des grandes plaques près de la surface ne sont pas aussi précises qu'on ne l'espérait. Ceci est dû à l'empreinte au sol du MEGATEM qui ne parvient pas à tout exciter toute la plaque. Le modèle de régression sur-estime en général les dimensions des petites plaques minces. On observe aussi que les estimations semblent suivre la conductance des plaques de petites dimensions. Bien que réalisable, il serait toutefois dangereux de rajouter la conductance dans les équations de régression de la taille des plaques. Une erreur d'estimation sur la conductance pourrait se propager sur l'estimation des dimensions des plaques, ce qui est à éviter. Les dimensions des corps hautement conducteurs sont nettement sous-estimées.

La variabilité des estimations des dimensions d'un corps tri-dimensionnel est plus grande que pour les cas de plaques minces. La fiabilité des réponses en est donc diminuée. C'était à prévoir car la troisième dimension des corps ajoute une composante à la réponse mesurée dont il faut tenir compte. L'utilisation d'une fréquence d'émission de $30Hz$ au lieu de la fréquence initiale de $90Hz$ ne semble pas affecter grandement les résultats.

Comme prévu, le modèle de classification sous-estime la taille des plaques minces lorsque la ligne de vol n'est pas directement au milieu du corps conducteur. En étant décalé transversalement, le MEGATEM ne parvient pas à exciter tout le corps conducteur. On perd donc de la précision sur l'estimation. Comme pour le cas de la profondeur, l'utilisation conjointe de plusieurs lignes de vol parallèles permettrait d'améliorer les estimations des dimensions. Il serait aussi possible de tenir compte des résultats obtenus pour l'estimation de la profondeur pour avoir une meilleure estimation des dimensions de la plaque. Cela permettrait de tenir compte de l'empreinte au sol et de la profondeur de pénétration du MEGATEM dans les estimations.

5.3.5 Tests de l'unicité des résultats

Le test de l'unicité des résultats permet de vérifier que les réponses obtenues par le système de régression ne peuvent provenir que d'un seul modèle initial. Quelques modèles de plaques minces furent retenus pour l'analyse. Les estimations furent calculées pour chacun de ces modèles. Les estimés furent ensuite utilisés comme pa-

ramètres initiaux pour la modélisation des nouveaux modèles tests. Il fut ensuite possible de calculer les attributs sur ces modèles et de faire une nouvelle estimation de ces paramètres.

Les nouveaux attributs calculés sont semblables aux attributs calculés sur les modèles initiaux, bien que quelques différences notoires sont à observer. Les estimations faites à partir de ces modèles permettent de vérifier l'unicité des résultats, et donc de la robustesse du système de classification. Les modèles dont les estimations initiales étaient très près des valeurs réelles donnent encore une fois de très bonnes estimations puisque les attributs ont très peu changés. Si les nouveaux attributs sont différents des attributs calculés sur les modèles initiaux, il faut s'attendre à ce que les estimations soient différentes. C'est exactement le phénomène observé. Les estimations finales sont centrées autour des paramètres obtenus par les premières estimations et non autour des paramètres initiaux. Ces résultats démontrent bien que chaque combinaison d'attributs donne une estimation unique, ce que nous voulions vérifier par ce test d'unicité. La figure (5.1) présente les résultats du test d'unicité.

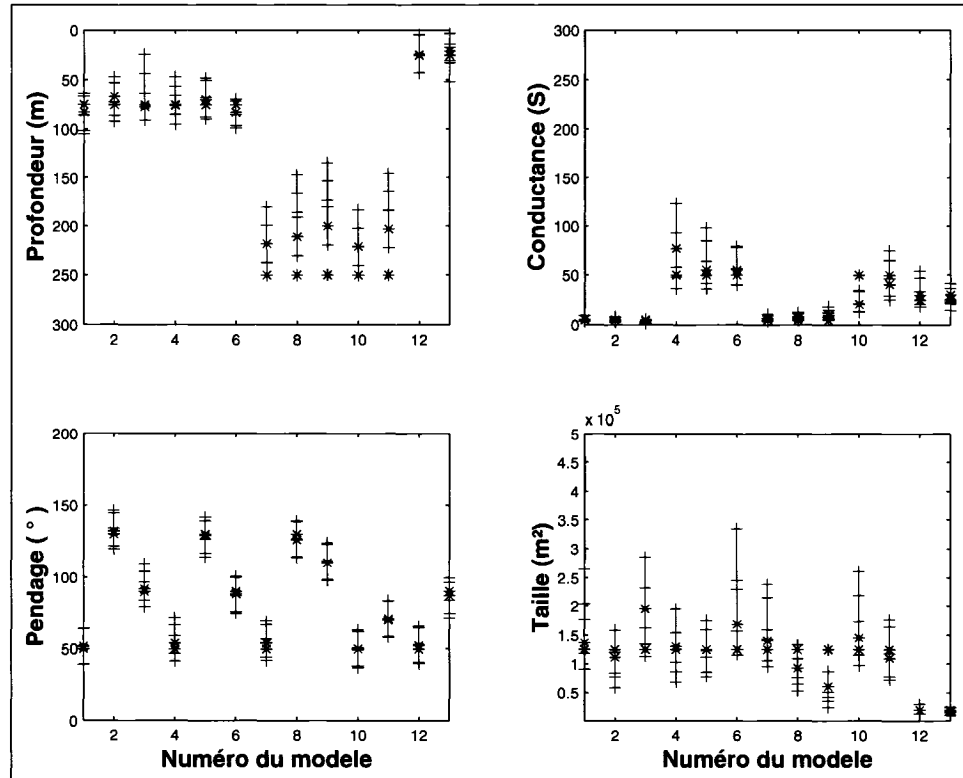


Figure 5.1: Résultats du test d'unicité

(bleu ; propriétés initiales, rouge ; premiers estimés, vert ; estimation à partir des premiers estimés)

5.4 Tests sur données de terrain MEGATEM

Le système étant maintenant validé et ses limites testées, le système de classification automatique des anomalies est appliqué sur des dépôts de sulfures massifs dont les propriétés sont connues. Le système est tout d'abord appliqué sur trois des quatre gisements de sulfures massifs étudiés dans ce projet ; soit ISO, New Inco et Galen. Le dépôt d'Aldermac n'est pas étudié puisqu'il est composé de plusieurs lentilles de sulfures massifs, dont les plus importantes ont déjà été exploitées. De nombreux artefacts électromagnétiques viennent aussi compliquer l'interprétation des données MEGATEM près du dépôt d'Aldermac. Les caractéristiques physiques de ces dépôts sont détaillées au chapitre 3. Des données MEGATEM obtenues au-dessus d'autres dépôts de VMS ont aussi été utilisées afin de valider le système de classification sur des données réelles.

Le calcul des attributs sur les données réelles n'est pas fait automatiquement comme c'est le cas pour les modèles numériques. Le bruit est plus élevé sur les données de terrain et ne possède pas une structure facilement détectable. Un filtrage du bruit est difficilement réalisable puisque le bruit n'est pas homogène dans l'espace et contient des hautes et basses fréquences sans structure fixe. C'est pourquoi des scripts MATLAB furent programmés pour permettre à l'utilisateur de sélectionner manuellement les sommets des anomalies sur les levés $\partial b_x/\partial t$ et $\partial b_z/\partial t$ afin de permettre la détermination des attributs. Les scripts sont présentés dans le disque d'accompagnement.

La figure (5.2) présente les résultats des estimations des propriétés physiques des trois gisements tests étudiés pendant ce projet de recherche ; soit ISO, New Insko et Gallen. Les lignes de vol présentées sont celles dont les coordonnées coïncident avec le milieu des corps. La légende de cette figure est présentée dans le tableau (5.3).

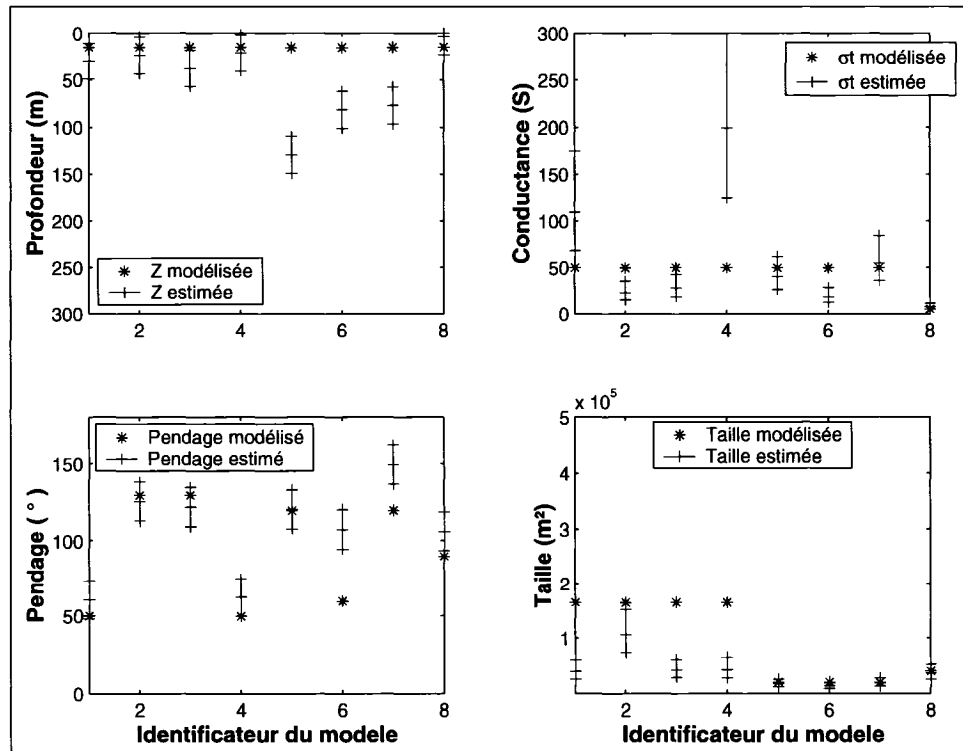


Figure 5.2: Estimation des propriétés d'ISO, New Insko et Gallen

TAB. 5.3: Légende de la figure 5.2

Numéro du modèle	Gisement et ligne de vol
1	ISO L100401
2	ISO L100501
3	ISO L100401 sens inverse
4	ISO L100501 sens inverse
5	New Inco L101501
6	New Inco L101601
7	New Inco L101601 sens inverse
8	Gallen L300401

ISO

Deux levés sont effectués au-dessus du dépôt d'ISO, volés dans des directions opposées. Pour chaque levé, deux lignes de vol (*L100401* et *L100501*) sont situées près du centre du corps et sont utilisées pour l'estimation des propriétés. L'utilisation des données provenant des deux levés permet de faire une meilleure estimation des paramètres et permet de vérifier la continuité du système entre les classes de modèles. L'utilisation des deux levés permet de comparer les estimations obtenues par les deux classes de pendage non-vertical et voir si les données sont fiables pour les deux directions de vol. Sur le graphique (5.2), les numéros 1 à 4 correspondent aux lignes de vol situées au-dessus du dépôt d'ISO.

On remarque que l'estimation de la profondeur donne une valeur se rapprochant de la valeur obtenue par les informations géologiques (forage) pour toutes les lignes de vol. La conductance est légèrement sous-estimée pour les deux lignes de vol croisant le corps avec un pendage plus grand que la verticale et est sur-estimée sur les deux lignes de vol qui croisent le corps à un pendage inférieur à 90° . L'estimation du pendage par régression suggère un pendage plus vertical que celui observé, soit d'environ $55\text{-}60^\circ$. Cette légère différence est peu significative et peut être causée par quelques facteurs. Le dépôt d'ISO, bien que pouvant être modélisé par une plaque mince, possède une épaisseur finie pouvant faire jouer les estimations. De plus, il est peu probable que géologiquement parlant, un dépôt de sulfures massifs possède un pendage constant sur toute sa surface comme une plaque. La valeur déduite de la géologie de 50° pour le pendage peut aussi être entachée d'une certaine incertitude.

La taille du dépôt est très sous-estimée par le système de régression, et ce pour toutes les lignes de vol. Quelques hypothèses sont avancées pour expliquer cette différence entre la réalité et les estimations. Tout d'abord, il faut s'assurer que les lignes de vol sont volées perpendiculairement au dépôt d'ISO. Bien qu'aucune analyse poussée n'a été effectuée à ce sujet, une direction de vol différente aurait des répercussions sur l'estimation des paramètres du dépôt. Les deux lignes de vol situées au-dessus du corps sont peut-être légèrement excentrées de part et d'autre du centre du dépôt. Chacune des lignes ne voit donc qu'une partie du corps, d'où une estimation à la baisse des dimensions du dépôt. Le corps étant de grandes dimensions, les tailles estimées représentent donc la taille minimale du dépôt selon la position des lignes de vol.

New Insko

Les deux levés volés au-dessus d'ISO passent aussi au-dessus du dépôt de New Insko. Deux lignes de vol (*L101501* et *L101601*) sont retenues pour l'estimation des propriétés lors du premier passage et une seule (*L101601*) lors du second vol. Le dépôt de New Insko possède une épaisseur relativement importante pour ses dimensions et ne peut donc pas être considéré comme une plaque mince électromagnétique. Il faudra en tenir compte lors de l'estimation des paramètres par le système de régression. Les numéros 5, 6 et 7 correspondent aux lignes de vol situées au-dessus de New Insko sur la figure (5.2).

La profondeur est toujours sur-estimée sur toutes les lignes de vol pour New Insko. Cette observation est concordante avec les tests effectués sur des prismes, où les faibles profondeurs sont sur-estimées et les grandes profondeurs sous-estimées. La conductance semble fidèle aux mesures de terrain sur toutes les lignes de vol analysées. Sur trois lignes de vol, une seule estimation du pendage semble concordante avec les données de terrain. Cela peut encore une fois être causé par les effets de prisme qui viennent fausser les interprétations. La taille du dépôt est bien retrouvée par l'équation de régression. Bien que l'estimation de certains paramètres semble précise, il ne faut pas oublier que le corps estimé ne remplit pas toutes les conditions d'utili-

sation du système de régression car il possède une épaisseur non-négligeable.

Gallen

Une seule ligne de vol (*L300401*) est utilisée pour l'estimation des paramètres du gisement de Gallen. Le cas de Gallen est assez complexe car sa géométrie représente un amas prismatique de forme irrégulière. Le système de classification est développé pour des plaques minces et des écarts plus importants sont à prévoir lorsqu'on tente de classer un corps de forme prismatique.

L'estimation de la profondeur donne une valeur négative, montrant bien les limites d'utilisation du système pour des corps prismatiques. La conductance et le pendage semblent toutefois être bien retrouvés. Sachant que le corps de Gallen est de forme plus ou moins définie, l'estimation du pendage semble de moindre importance. La taille estimée est très faible comparativement aux dimensions réelles du dépôt. Le cas de Gallen est un exemple parfait pour démontrer les limites du système de classification automatique des anomalies développé pour des corps de type plaque mince.

Quatre autres dépôts connus de sulfures massifs sont étudiés. L'estimation de leurs paramètres est présentée à la figure (5.3). Les données ont été acquises par Noranda. Moins d'information géologique est disponible sur les propriétés physiques de ces dépôts. La comparaison entre les estimés et les vraies valeurs est donc plus difficile à effectuer, car il y a plus d'incertitude sur les données initiales.

TAB. 5.4: Légende de la figure 5.3

Numéro du modèle	Gisement et ligne de vol
1	CIBLE #1 Ligne 4
2	CIBLE #1 Ligne 5
3	CIBLE #2 Ligne 2
4	CIBLE #2 Ligne 3
5	CIBLE #3 Ligne 2
6	CIBLE #3 Ligne 3
7	CIBLE #4 Ligne 1
8	CIBLE #4 Ligne 2
9	CIBLE #4 Ligne 3

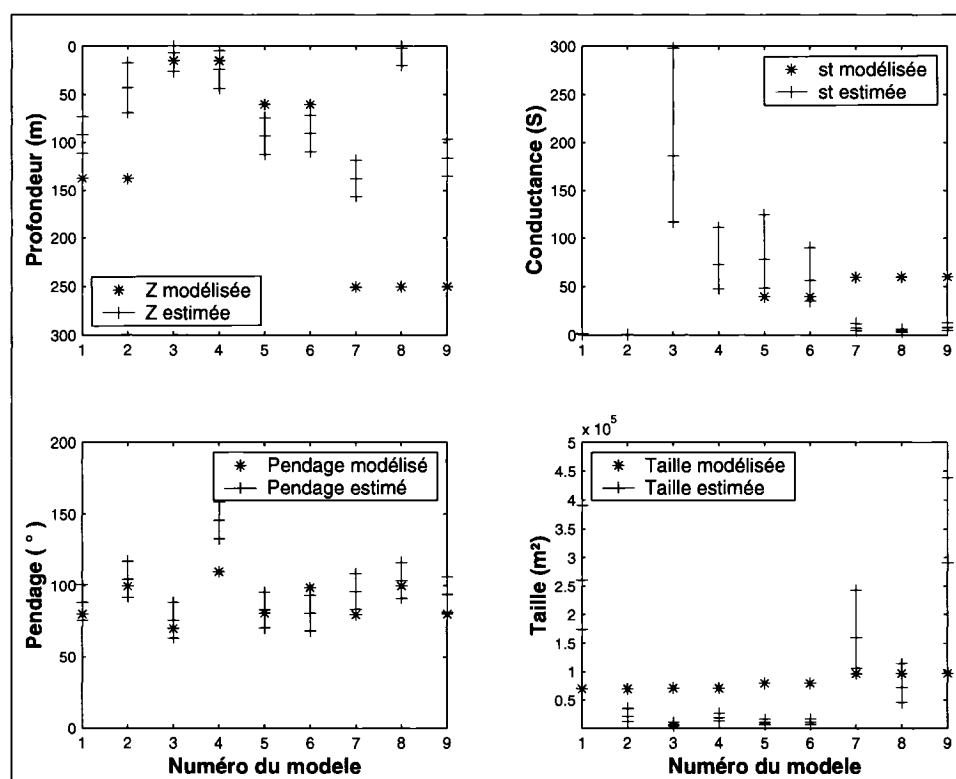


Figure 5.3: Estimation des propriétés d'autres gisements de sulfures massifs

Deux lignes de vol sont étudiées pour l'estimation des propriétés physique de la première cible. La profondeur est sous-estimée sur les deux lignes de vol. Cette mauvaise estimation de la profondeur peut être une indication que l'hypothèse de la plaque mince ne s'applique pas pour ce corps. La conductance estimée est très faible ($< 1S$) et on ne possède pas de mesure de la conductance réelle pour fins de comparaison. D'après la minéralogie de ce corps, composé principalement de pyrite et de pyrrhotite, on déduit que le dépôt doit être faiblement conducteur. Bien que certains minéraux puissent posséder une conductivité variant sur plusieurs ordres de grandeur, ces deux minéraux possèdent une valeur intrinsèque de conductivité assez faible (tiré du chapitre 3 de Nabighian (1987), écrit par Georges Keller). Le pendage est bien retrouvé tandis que la taille varie beaucoup en fonction de la ligne de vol prise pour faire l'estimation. La position de la ligne de vol par rapport au centre du corps a peut-être un impact sur les estimations. On ne peut se fier qu'aux amplitudes des anomalies sur les levés MEGATEM pour estimer la position des levés par rapport au corps conducteur.

Les paramètres de la deuxième cible sont aussi estimés sur deux lignes de vol. La profondeur est retrouvée avec précision. Encore une fois, nous ne possédons pas la valeur de la conductance. On la suppose assez élevée à cause de la composition minéralogique du dépôt : pyrite, sphalérite et chalcopryrite qui peuvent être assez conducteurs. L'estimation prédit d'ailleurs une conductance assez forte, ce qui correspondrait à la minéralogie observée. Le pendage est bien retrouvé sur une ligne de vol sur les deux utilisées pour l'estimation. La taille est sous-estimée sur les deux lignes de vol. Les deux estimations sont toutefois conséquentes entre elles.

Les paramètres de la troisième cible sont relativement bien estimés sur les deux lignes de vol utilisées dans la régression. La profondeur est retrouvée à quelques mètres près, dans les limites acceptables si l'on tient compte que le corps possède une épaisseur finie et que cela peut jouer sur l'estimation de la profondeur. L'intervalle de confiance autour de la conductance inclut la conductance mesurée sur le terrain et le pendage est bien estimé. Seule la taille est encore une fois sous-estimée.

L'estimation des paramètres du dernier corps est assez variable selon la ligne de vol utilisée pour le calcul des attributs. Trois lignes de vol sont utilisées pour l'estimation des paramètres. Il est toutefois impossible de déterminer lesquelles sont situées au centre du dépôt, ceci pouvant expliquer les variations dans les estimations. La qualité des données sur chaque ligne de vol peut aussi causer ces variations. La profondeur est nettement sous-estimée et est très variable. La conductance est aussi nettement sous-estimée. Ceci peut être dû à des effets géologiques dont nous ne connaissons pas la cause. Le pendage est toutefois bien retrouvé. On y observe une verticalisation du dépôt en comparaison avec les données réelles. Cela peut être due à la position des lignes de vol par rapport au centre du dépôt. Sauf l'estimé de la troisième ligne de vol, la taille semble être retrouvée avec précision.

Les estimations effectuées sur les données réelles de terrain confirment les résultats obtenus sur les données numériques. Certaines estimations sont très précises tandis que d'autres donnent des résultats trompeurs. La géologie des dépôts (la forme en particulier) et les conditions d'acquisition des données sont importantes pour assu-

rer une classification précise des propriétés physiques des dépôts de sulfures massifs volcanogènes. Les estimations sont précises si les conditions d'utilisation du système sont respectées. Le système est développé pour des plaques minces, pour une ligne de vol situé au centre du dépôt et volée à 90° de la direction d'élongation du corps. Une fréquence d'utilisation de $90Hz$ est aussi nécessaire pour assurer une estimation de qualité.

Le système est développé sur un terrain à deux couches, soit un socle résistant ($10000\Omega m$) au-dessus duquel se trouve un mort-terrain conducteur ($20\Omega m$ de $20m$ d'épaisseur, soit une conductance de $1S$). Les paramètres de ce mort-terrain sont considérés comme une limite supérieure de conductance pour le terrain de l'Abitibi. Une valeur plus faible de la conductance du mort-terrain aurait peu d'effet sur les calculs des attributs. Une valeur plus élevée pourrait affecter les valeurs des attributs mais l'utilisation d'une médiane pour le calcul des attributs atténue cet effet car la réponse du mort-terrain n'est lue que sur les premiers canaux de temps. Les estimations finales des propriétés des corps de sulfures massifs ne seraient donc que légèrement affectées.

Chapitre 6

Conclusion

La conclusion de ce mémoire permet de tirer les grandes lignes sur la détection et la classification automatique des anomalies MEGATEM par régression. Une discussion sur les méthodes employées pour la détection et la classification sera tout d'abord effectuée. On discutera ensuite des domaines d'application du système de régression et des résultats obtenus, pour terminer avec les conclusions et recommandations.

6.1 Discussion

6.1.1 Discussion de la détection des anomalies

Plusieurs méthodes sont possibles pour détecter les anomalies sur un levé MEGATEM. La méthode étudiée dans ce projet utilise des statistiques d'ordre supérieur pour détecter les variations des levés par rapport à un seuil pré-déterminé. La méthode de détection est adaptée pour tenir compte des particularités des données MEGATEM. Cette variance courante permet de détecter toute variation du champ électromagnétique, peu importe la provenance. Il faut adapter le seuil de détection afin d'isoler les anomalies provenant de dépôts de sulfures massifs. Un seuil distinct est utilisé sur les levés $\partial b_x / \partial t$ et $\partial b_z / \partial t$ et est ajustable selon l'amplitude des réponses.

Le niveau de détection des anomalies est fonction de plusieurs paramètres, qui peuvent influencer le résultat final. Il est possible d'ajouter un facteur permettant une moins grande permissivité ou une plus grande robustesse face aux variations. Pour

s'assurer de ne garder que les anomalies venant de sources suffisamment conductrices, on garde les réponses détectées sur au moins trois canaux de temps. Cette limite peut être adaptée selon le type d'information recherché. Le nombre de points utilisés pour le calcul de la variance courante a aussi un impact sur la détection des anomalies. Une fenêtre de petites dimensions permet de détecter les anomalies possédant de brusques variations tandis qu'une large fenêtre permet une détection plus générale.

Le détecteur présentement utilisé permet de bien détecter tous les types de plaques minces générant une réponse d'amplitude assez forte sur un levé MEGATEM. La contrainte de la détection ne provient donc pas du détecteur, mais du niveau de bruit du MEGATEM. Le détecteur est cependant de nature trop permissive. Il ne tient compte que des variations en amplitude des champs électromagnétiques sur les levés MEGATEM. Une analyse conjointe des variations d'amplitude, de la forme et de la décroissance des anomalies pourrait permettre une meilleure séparation des anomalies. Cette amélioration du système de détection demande toutefois une étude plus approfondie de toutes les réponses possibles sur un levé MEGATEM. Des dépôts de sulfures massifs et des modèles de bruit doivent être analysés. Une analyse si complète est difficilement réalisable par statistiques d'ordre supérieur. Il faudrait avoir recours à des méthodes permettant une plus grande flexibilité, comme la reconnaissance de forme ou les ondelettes.

6.1.2 Discussion de la classification des anomalies

La régression multi-linéaire a été choisie pour la classification automatique des anomalies car elle est simple à mettre en oeuvre et est robuste pour déterminer les relations linéaires entre différentes variables. L'utilisation de plaques minces seulement permet de générer plus rapidement une banque de données utilisable pour un système de classification. La modélisation électromagnétique de prismes est plus complexe et demande un temps d'apprentissage non-négligeable pour l'utilisation adéquate de tous les paramètres possibles. L'utilisation de plaques minces permet de représenter une importante classe de dépôts de sulfures massifs, avec une excellente variété de paramètres physiques. Cela permet aussi de tester le système de classification automatique des anomalies par régression. Les excellents résultats obtenus permettront

d'étendre l'étude à d'autres types de modèles.

La pondération utilisée permet de tenir compte des erreurs numériques et de la qualité des réponses de modélisation. Les poids calculés sur les modèles génèrent toutefois une sous-représentation de certaines classes de modèles dans la régression. Ainsi, les plaques de petites dimensions, de faible conductance et très profondes seront sous-représentées dans la régression car leur réponses numériques sont de faible amplitude. Leur poids relatifs seront donc faibles dans les régressions.

La fiabilité des modèles à estimer est donc proportionnelle à la pondération du modèle. Un estimateur de la pondération pourrait être calculé pour donner une idée de la fiabilité de l'estimation. Cet estimateur serait fonction de la variabilité des attributs sur les canaux de temps, du nombre de canaux utilisés et de l'amplitude absolue des réponses par rapport au niveau de bruit.

Le test d'ajout permet de trouver les variables significatives à partir d'une liste de variables potentielles pour l'estimation d'un paramètre. Dix attributs sont utilisés comme variables explicatives des paramètres des plaques minces. D'autres attributs ont pu être omis et pourraient avoir un impact sur l'estimation des paramètres. Le test d'ajout ne permet pas de trouver d'autres attributs, il opère avec les variables qu'on lui impose. La validation des variables utilisées est faite en regardant la distribution des résidus par rapport aux variables X et des intervalles de confiance sur les coefficients de la régression.

Le modèle final de régression est un modèle multi-couches où le premier paramètre doit être estimé avec précision pour permettre une bonne classification des autres paramètres. D'après les tests effectués, le pendage est très bien retrouvé pour tous les types de plaques minces et sert très bien comme premier paramètre à estimer. On remarque que plusieurs attributs sont très variables selon le pendage de la plaque mince. Ces attributs ont des distributions multi-modales, dont les modes semblent reliés au pendage des plaques. Les variations de la forme des anomalies selon le pendage est aussi un bon indicateur qui montre qu'utiliser le pendage comme premier

paramètre est un choix judicieux. Le système final ainsi créé est plus difficile à gérer, mais génère des estimations plus précises des propriétés des plaques minces.

6.1.3 Discussion du domaine d'application

Le système de régression est fiable si les estimations sont faites sur des modèles dont les propriétés sont comprises dans les valeurs initiales pour créer le modèle. La régression ne peut être utilisée pour extrapoler les propriétés. Ainsi, le domaine d'application se limite à des plaques minces, avec un pendage variant entre 30° et 150° , une profondeur de 20 à 300 mètres et une conductance de 1 à 100 Siemens. Les estimations sont plus précises pour une ligne de vol située directement au milieu du corps, perpendiculaire à la direction d'élongation du corps. La fréquence d'émission de 90 Hertz est utilisée, pour une lithologie à deux couches, dont un mort-terrain de 20m d'épaisseur conducteur à $20\Omega * m$ au-dessus d'un socle résistant de résistivité de $10000\Omega * m$.

La précision des résultats est plus grande pour un pendage de 45° à 135° . La précision sur la profondeur est fonction de la conductance et des dimensions de la plaque. L'estimation de la conductance est précise pour une valeur de moins de 50 Siemens et donne un ordre de grandeur pour les fortes conductances. L'estimation des dimensions est dépendante de l'empreinte au sol et de la profondeur de pénétration de l'appareil. L'estimation des dimensions donne plus un ordre de grandeur plutôt qu'une estimation précise car trop de paramètres peuvent affecter la réponse. Pour une réponse plus précise, l'utilisation d'anomalies sur des lignes de vol parallèles pourrait améliorer les résultats.

Ce système est assez robuste lorsqu'on dépasse les limites d'application du modèle. Ainsi, l'estimation de la conductance et de la profondeur est bonne pour un corps de forme prismatique. Le système pourrait facilement être reconstruit en utilisant les données acquises avec une fréquence de 30 Hertz. Les mêmes attributs devraient être significatifs, avec des coefficients différents. Si la ligne de vol n'est pas directement centrée sur l'anomalie, les estimations sont en général moins précises, à l'exception de la conductance. La profondeur est sur-estimée tandis que le pendage estimé est plus

proche de la verticale.

6.2 Conclusion et recommandations

Finalement, le modèle de détection des anomalies étudié est excellent pour retenir les variations en amplitude sur des levés électromagnétiques transitoires tel qu'il fut employé pour les données MEGATEM. Un tel système est toutefois très permissif et ne permet pas de reconnaître certains types d'anomalies qui demandent une étude plus poussée d'autres anomalies représentant du bruit électromagnétique.

L'ajout de contraintes au système de détection pourrait permettre de déterminer la cause de l'anomalie. Pour ce faire, il faudrait toutefois avoir une meilleure connaissance des réponses MEGATEM associées à toutes les sources d'anomalies, et non seulement aux plaques minces comme cela a été étudié dans ce projet. D'autres méthodes de détection pourraient aussi être testées afin de comparer les diverses techniques s'offrant à nous. Par exemple, la détection par ondelettes et l'établissement d'un réseau de neurones pourraient servir à la fois de détecteur et de système de classification des anomalies.

Le système de classification automatique des anomalies par régression multilinéaire pondérée est très efficace pour trouver les relations linéaires entre différentes variables. Son utilisation pour la détection d'anomalies de types plaques minces à partir d'attributs calculés sur un levé MEGATEM a démontré d'excellents résultats. Certaines relations trouvées par la régression valident celles déterminées précédemment par Palacky et West (1973) pour déterminer le pendage et la profondeur de plaques minces selon une approche différente. La relation trouvée pour la conductance accorde une grande importance à la constante de temps, ce qui suit la logique de la théorie de l'électromagnétisme.

L'utilisation d'un système de classification en deux étapes, en séparant selon le pendage au départ, permet d'améliorer grandement les résultats. Certains attributs n'ont pas la même distribution, ni les mêmes variations selon le pendage parce que la

forme des anomalies MEGATEM varient beaucoup selon le pendage du corps conducteur.

L'utilisation de plusieurs lignes de vol permettrait d'améliorer les régressions. L'estimation de la profondeur pourrait être de meilleure qualité car l'utilisation de lignes de vol parallèles permettraient plusieurs estimations de la distance entre l'appareil et la plaque. Il serait ensuite possible d'utiliser conjointement ces estimations pour faire une estimation unique de la profondeur du corps. L'utilisation de plusieurs lignes de vol serait aussi profitable à l'estimation des dimensions du corps conducteur, le paramètre le moins bien estimé des plaques minces. L'utilisation d'anomalies provenant de plusieurs lignes de vol pourrait aussi permettre une estimation de l'azimuth de la plaque par rapport aux lignes de vol. Les travaux effectués jusqu'à présent supposent un azimuth de 90° par rapport aux lignes de vol.

Certains points pourraient être étudiés avec plus de détails afin de compléter l'analyse. On pourrait utiliser une mesure de similarité entre les anomalies réelles et synthétiques de la banque de données pour définir un degré de confiance dans les estimations. Il pourrait être intéressant de tester le système pour différents types de géologie. Est-ce que seuls les coefficients de la régression seront affectés ou tout le système d'équations? L'utilisation de lignes de vol parallèles pourrait améliorer les estimations des dimensions et de la profondeur des corps conducteurs. Un système de régression multi-linéaire semblable pourrait être développé pour l'établissement d'un système de classification de corps autres que les plaques minces. L'étude de prismes et de sphères conducteurs permettraient de compléter l'analyse des dépôts de sulfures massifs. Un système complet permettrait en premier lieu de reconnaître le type d'anomalie présent sur les levés MEGATEM. Une fois l'anomalie détectée, on redirige les données vers l'algorithme de classification approprié. Le système développé dans ce mémoire se veut une première approche d'un tel système de classification. Il permet d'estimer avec précision les propriétés de dépôts de VMS de type plaque mince. Il serait relativement aisé d'annexer des systèmes de classifications semblables pour les corps de géométries différentes afin de créer un système complet de classification des dépôts de sulfures massifs volcanogènes retrouvés en Abitibi.

Bibliographie

- ANNAN, P. et LOCKWOOD, R. (1991). An application of airborne GEOTEM in Australian conditions. *Exploration Geophysics*, 22, 5–12.
- ANNAN, P., SMITH, R., LEMIEUX, J., O'CONNELL, M. et PEDERSEN, R. (1996). Resistive-limit, time-domain AEM apparent conductivity. *Geophysics*, 61, 93–99.
- ARNASON, K. (1999). A short manual for the program TEMDDD. The National Energy Authority of Iceland.
- BARRETT, T., CATTALANI, S., CHARTRAND, F. et JONES, P. (1991). Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. II. The Aldermac mine. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28, 1301–1327.
- BARTEL, D. et BECKER, A., editors (1986). Time-domain response of a thin plate beneath overburden, Society of Exploration Geophysicists, 56th Annual International Mtg.
- BECKER, A. (1969). Simulation of time-domain, airborne, electromagnetic system response. *Geophysics*, 34, 739–752.
- BENAVIDES, A. et EVERETT, M. (2005). Target signal enhancement in near-surface controlled-source electromagnetic data. *Geophysics*, 70, 59–67.
- BEST, M. et BONYWELL, J. (1989). Airborne electromagnetic methods. *A Geophysical Handbook for Geologists, Special 41*, 55–72.
- CHARTRAND, F. et CATTALANI, S. (1990). Massive sulfide deposits in north-western Quebec. Dans *Synthèse de 60 ans d'exploration minière, Symposium de Rouyn-Noranda*, ICM, Rouyn-Noranda, Canada, 77–91.

- CHENG, L., SMITH, R., ALLARD, M., KEATING, P., CHOUTEAU, M., LEMIEUX, J., VALLÉE, M., BOIS, D. et FOUNTAIN, D. (2005*a*). Geophysical case study of the Iso and New Inco deposits, Québec, Canada : Part I. submitted.
- CHENG, L., SMITH, R., ALLARD, M., KEATING, P., CHOUTEAU, M., LEMIEUX, J., VALLÉE, M., BOIS, D. et FOUNTAIN, D. (2005*b*). Geophysical case study of the Iso and New Inco deposits, Québec, Canada : Part II. submitted.
- CHRISTIANSEN, A. et CHRISTENSEN, N. (2003). A quantitative appraisal of airborne and ground-based transient electromagnetic (TEM) measurements in Denmark. *Geophysics*, 68, 523–534.
- DRAPER, N. et SMITH, H. (1981). Applied Regression Analysis. Wiley series in probability and mathematical statistics, John Wiley and Sons, USA.
- FLIS, M., NEWMAN, G. et HOHMANN, G. (1989). Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements. *Geophysics*, 54, 514–523.
- GIBSON, H. et WATKINSON, D. (1990). Volcanogenic massive sulphide deposits of the Noranda Cauldron and shield volcano, Quebec. Dans *Synthèse de 60 ans d'exploration minière, Symposium de Rouyn-Noranda*, ICM, Rouyn-Noranda, Canada, 119–132.
- GROOM, R. et ALVAREZ, C. (2002). 3D EM modelling - Application of the localized non-linear approximator to near surface applications. Extended Abstract.
- HANNESON, J. et WEST, G. (1984). The horizontal loop electromagnetic response of a thin plate in a conductive earth : Part II - Computational results and examples. *Geophysics*, 49, 421–432.
- HOHMANN, G. (1975). Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *Geophysics*, 36, 309–324.
- HOVERSTEN, G. et MORRISON, H. (1982). Transient fields of a current loop source above a layered earth. *Geophysics*, 47, 1068–1077.
- HUNTER, A. G. . D. (2004). AEM target detection in geological noise. Extended Abstract.

- KAY, S. (1998). Fundamentals of statistical signal processing : Detection theory, volume 2 of *Prentice-Hall signal processing series*. Prentice-Hall PTR, USA.
- KONSTANTARAS, A., VARLEY, M., VALLIANATOS, F., COLLINS, G. et HOLIFIELD, P. (2004). A neuro-fuzzy approach to the reliable recognition of electric earthquake precursors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 641–646.
- LAJOIE, J. et WEST, G. (1976). The electromagnetic response of a conductive inhomogeneity in a layered earth. *Geophysics*, 41, 1133–1156.
- LEIPHART, D. et HART, B. (2001). Comparison of linear regression and a probabilistic neural network to predict porosity from 3-D seismic attributes in Lower Brushy Canyon channelled sandstones, southeast New Mexico. *Geophysics*, 66, 1349–1358.
- LIU, G. et ASTEN, M. (1992). A comparison of airborne and ground transient EM systems in their resolving power against geological noise. *Exploration Geophysics*, 23, 197–200.
- LOWE, C., THOMAS, M. et MORRIS, W., editors (1999). Geophysics in mineral exploration : Fundamentals and case histories, Sudbury, Canada, Geological Association of Canada, Short Course Notes Volume 14.
- LULIN, J.-M. (1990). Une analyse du développement minier du Nord-Ouest québécois, La ceinture polymétallique du N-W québécois. Dans *Synthèse de 60 ans d'exploration minière, Symposium de Rouyn-Noranda*, ICM, Rouyn-Noranda, Canada, 17–34.
- MALO-LALANDE, C. (2003). Application de la méthode électromagnétique transitoire en boucle simple pour l'exploration de gisements de type plaque. Maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- MARCOTTE, D. (2000). Traitement statistique des données géologiques. École Polytechnique de Montréal.
- MARROQUIN, I. (1997). Traitement et interprétation des signaux TBF. Maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

- MCCRACKEN, K., ORISTAGLIO, M. et HOHMANN, G. (1986*a*). A comparison of electromagnetic exploration systems. *Geophysics*, 51, 810–818.
- MCCRACKEN, K., ORISTAGLIO, M. et HOHMANN, G. (1986*b*). Minimization of noise in electromagnetic exploration systems. *Geophysics*, 51, 819–832.
- NABIGHIAN, M. (1979). Quasi-static transient response of a conducting half-space - An approximate representation. *Geophysics*, 44, 1700–1705.
- NABIGHIAN, M. (1987). Electromagnetic methods in applied geophysics, volume 1 of *Investigations in Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, USA.
- NABIGHIAN, M. (1991). Electromagnetic methods in applied geophysics, volume 2 of *Investigations in Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, USA.
- NELSON, P. et MORRIS, D. (1969). Theoretical response of a time-domain, airborne, electromagnetic system. *Geophysics*, 34, 729–738.
- OGILVY, R. (1986). Theoretical transient EM response curves over a thin dipping dyke in free space - Separated inline loop configuration. *Geophysical Prospecting*, 34, 769–788.
- OGILVY, R. (1987). Interpretation of transient EM common-loop anomalies by response characteristics. *Geophysical Prospecting*, 35, 454–473.
- OSTLE, B., JR, K. T., HICKS, C. et MCEL RATH, G. (1996). Engineering Statistics; The industrial experience. Wadsworth Publishing Company, USA.
- PALACKY, G. (1976). Use of decay patterns for the classification of anomalies in time-domain AEM measurements. *Geophysics*, 41, 1031–1041.
- PALACKY, G. et WEST, G. (1973). Quantitative measurements of Input AEM measurements. *Geophysics*, 38, 1145–1158.
- PAPP, È. et BAXTER, R. (2002). Factor analysis and factor score imaging of transient electromagnetic model response over simple geometric bodies. *Exploration Geophysics*, 33, 44–50.

- PETERS, B. et BUCK, P. (2000). The Maggie Hays and Emily Ann nickel deposits, Western Australia : A geophysical case history. *Exploration Geophysics*, 31, 210–221.
- RAICHE, A. (1974). An integral equation approach to 3D modeling. *Geophys. J. Astr. Soc.*, 36, 363–376.
- RAICHE, A. (1987). Transient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earths. *Geophysics*, 52, 785–793.
- RAICHE, A. (2004). P223E Basics Electromagnetic Modelling. CSIRO Exploration and Mining - Electromagnetic Modelling Group.
- SIMMONS, B. (1973). Geology of the Millenbach massive sulphide deposit, Noranda, Québec. *CIMM Bulletin*, 951–964.
- SMITH, R. (1998). On the effect of varying the pulse width to detect high conductance bodies. *Exploration Geophysics*, 29, 42–45.
- SMITH, R. (2001). On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data : some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors. *Geophysical Prospecting*, 49, 405–416.
- SMITH, R. et ANNAN, A. (1997). Advances in airborne time-domain EM technology. Dans *Proceedings of Exploration 97 : Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, Édité par A. Gubins, Integrated Exploration Information Management, 497–504, Paper 64.
- TELFORD, W. et BECKER, A. (1979). Exploration case histories of the Iso and New Inco orebodies. *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*, 605–629.
- VALLÉE, M., KEATING, P., SMITH, R. et ST-HILAIRE, C. (2004). Estimating depth and model type using the continuous wavelet transform of magnetic data. *Geophysics*, 69, 191–199.

- WALKER, P. (1995). VHPLATE : The development of a robust integral equation simulation algorithm. Dans *International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics*, Édité par M. Oristaglio et B. Spies, Schlumberger-Doll Research, Ridgefield, Connecticut, USA, 103–109.
- WALKER, P. et WEST, G. (1991). A robust integral equation solution for electromagnetic scattering by a thin plate in conductive media. *Geophysics*, 56, 1140–1152.
- WANG, T. (2002). The electromagnetic smoke ring in a transversely isotropic medium. *Geophysics*, 67, 1779–1789.
- WANNAMAKER, P., HOHMANN, G. et SANFILIPO, W. (1984). Electromagnetic modeling of three-dimensional bodies in layered earths using integral equations. *Geophysics*, 49, 60–74.
- WATKINSON, D., MCEWEN, J. et JONASSON, I. (1990). Mine Gallen, Noranda, Quebec : Geology of an archean massive sulphide mound. Dans *Synthèse de 60 ans d'exploration minière, Symposium de Rouyn-Noranda*, Rouyn-Noranda, Canada, 167–174.
- WEIDELT, P. (1975). Electromagnetic induction in three-dimensional structures. *J. Geophys.*, 41, 85–109.
- WOLFGRAM, P. et GOLDEN, H. (2001). Airborne EM Applied to Sulphide Nickel - Examples and Analysis. *Exploration Geophysics*, 32, 136–140.
- YONELINAS, A., DOBBINS, I., SZYMANSKI, M., DHALIWAL, H. et KING, L. (1996). Signal-detection, threshold and dual-process models of recognition memory : ROCs and conscious recollection. *Consciousness and Cognition*, 5, 418–441.

Annexe A

Test de détection des anomalies

A.1 Tests sur modèles numériques

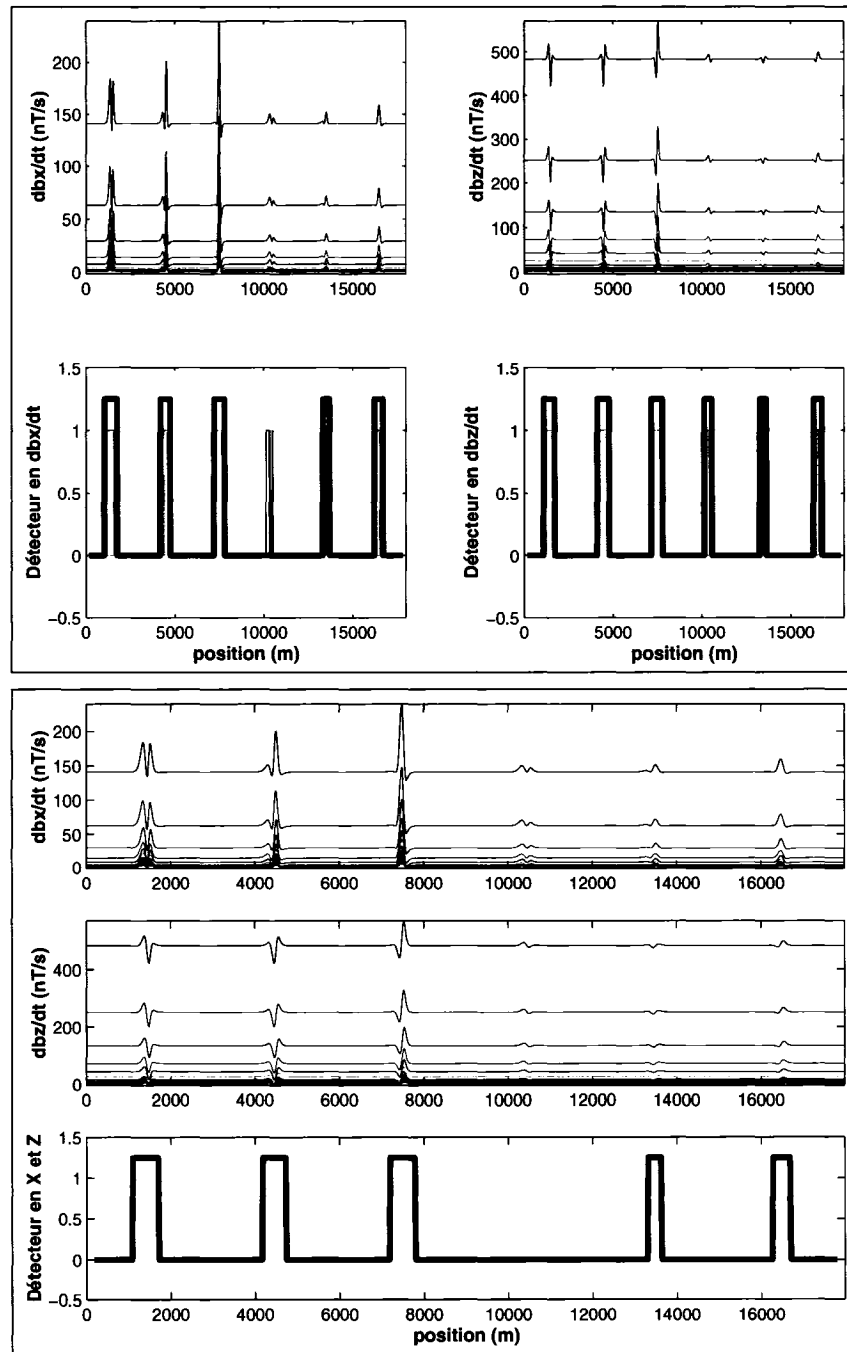


Figure A.1 : Détection des modèles plaques minces : $100 \times 50m^2$
 $Z = 25 - 75m$, $\sigma t = 125S$, Pendage = $50^\circ - 90^\circ - 130^\circ$.
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

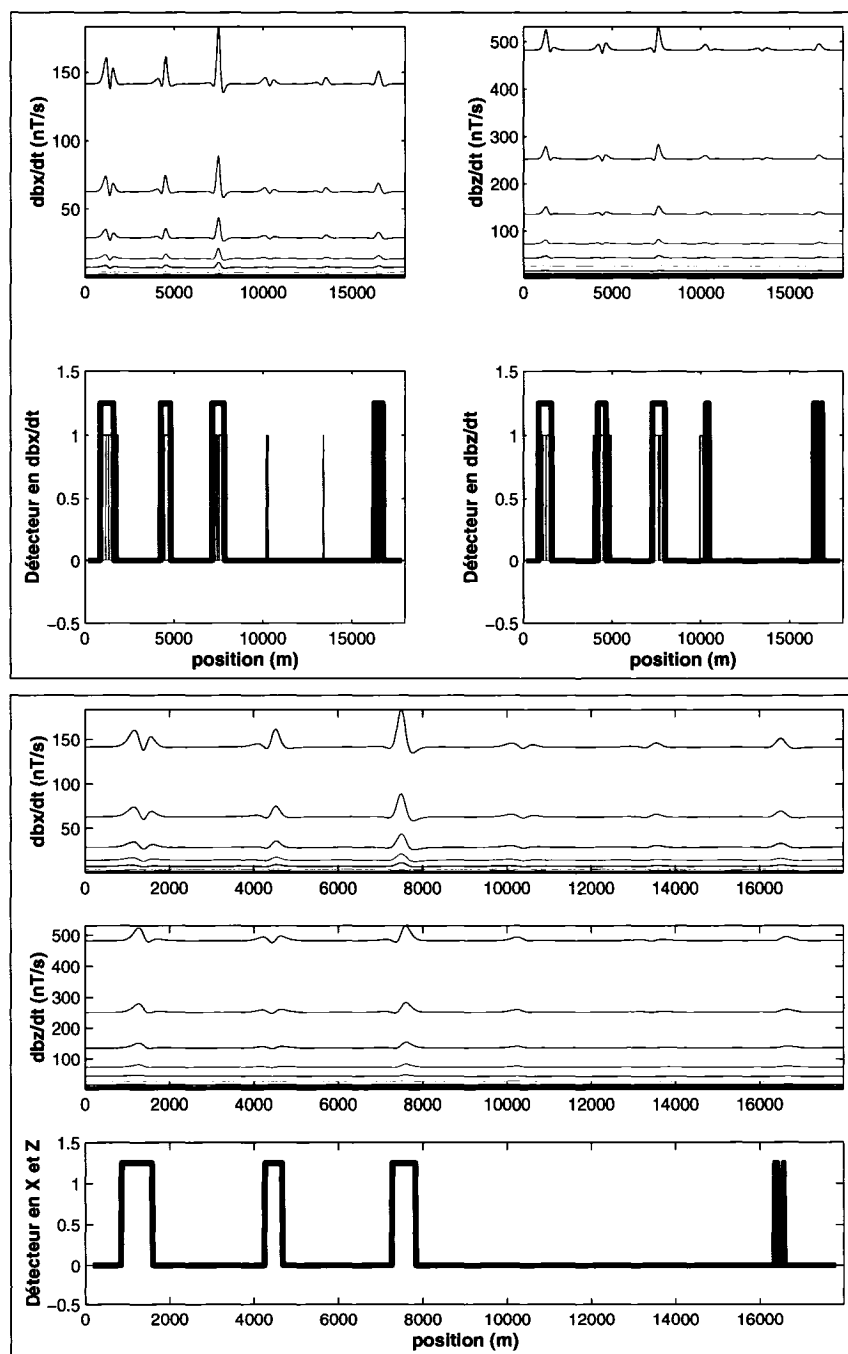


Figure A.2 : Détection des modèles plaques minces : $500 \times 250m^2$
 $Z = 150 - 250m$, $\sigma t = 5S$, Pendage = $50^\circ - 90^\circ - 130^\circ$.
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

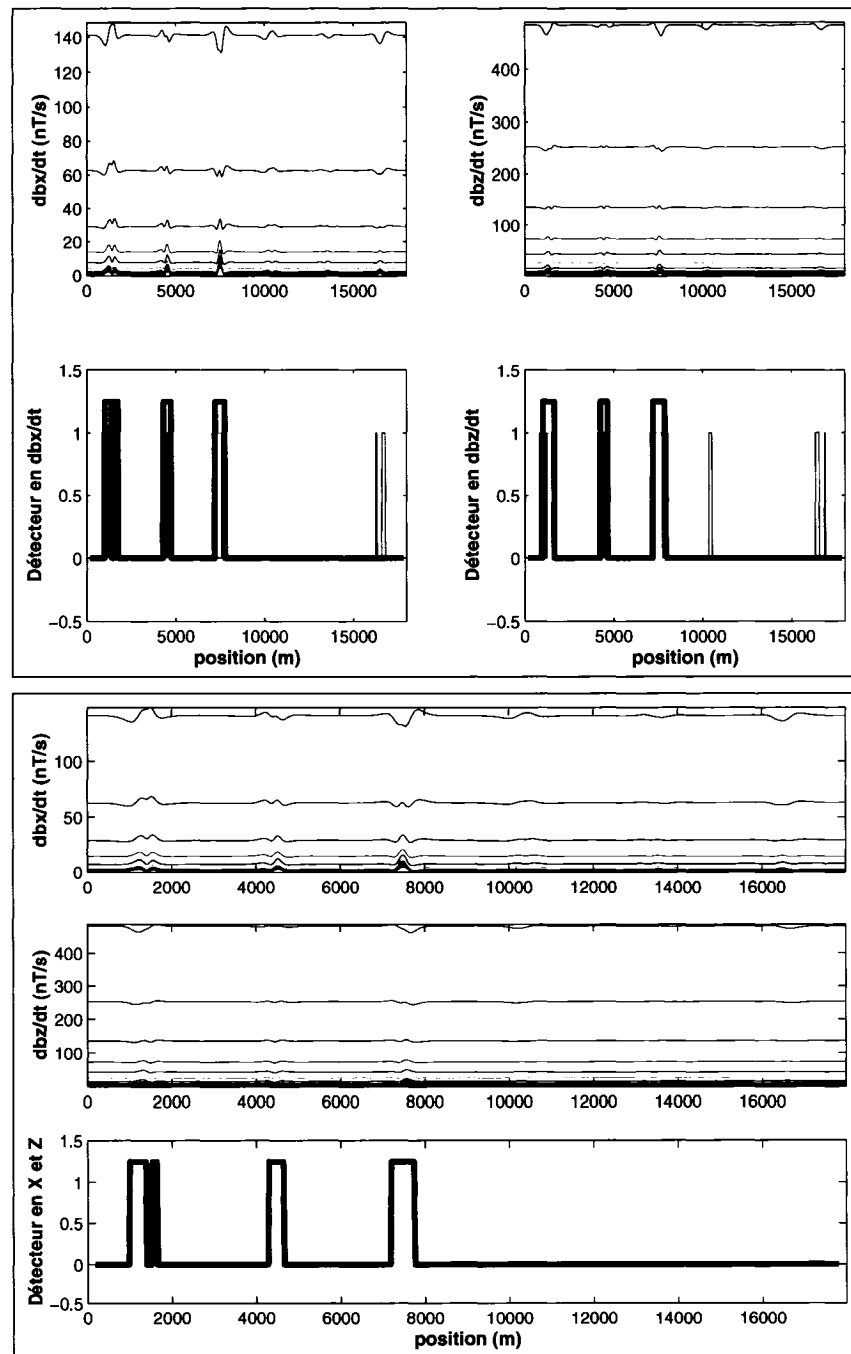


Figure A.3 : Détection des modèles plaques minces : $500 \times 250m^2$
 $Z = 150 - 250m$, $\sigma t = 125S$, Pendage = $50^\circ - 90^\circ - 130^\circ$.
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

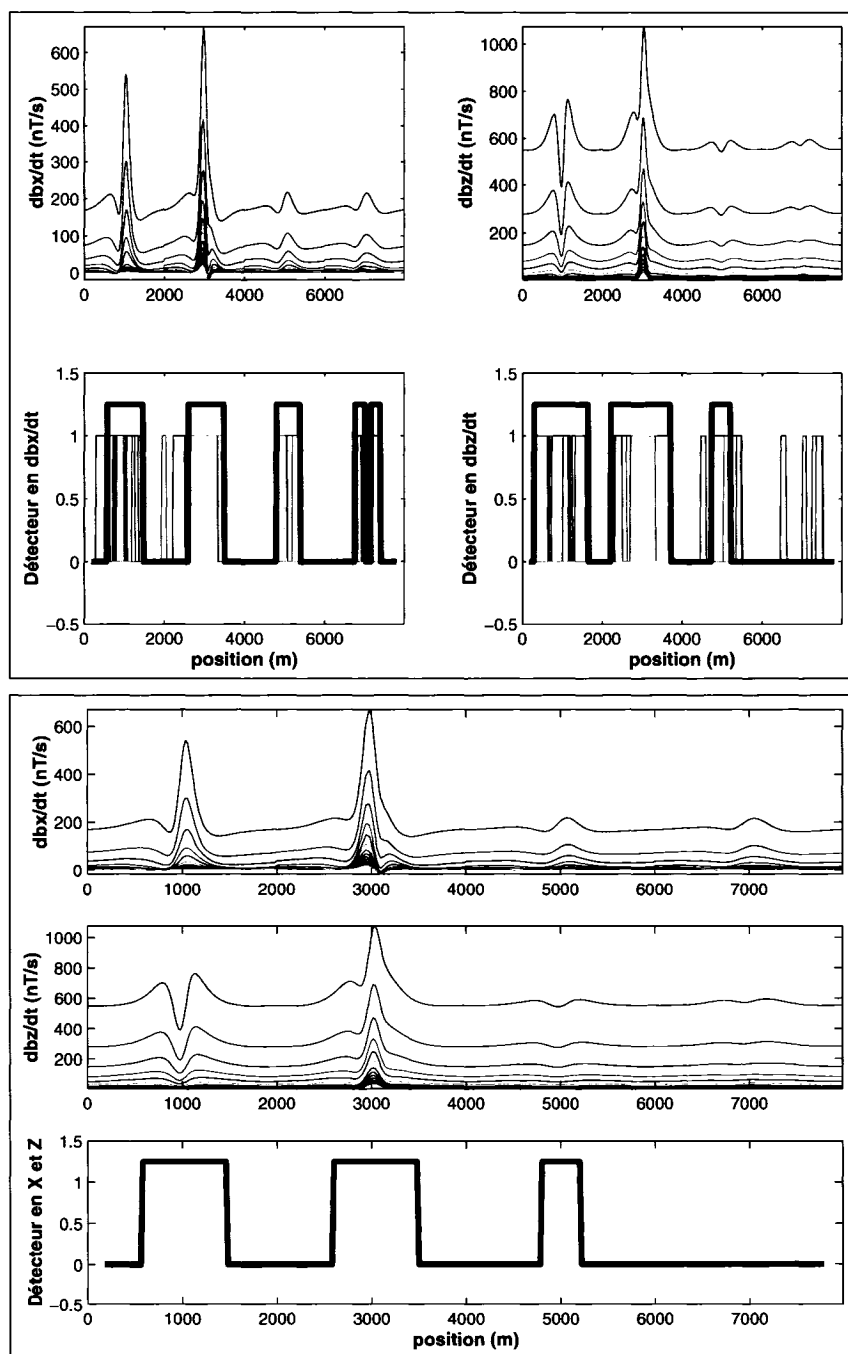


Figure A.4 : Détection des modèles de prismes : $500 \times 250m^2$
 épaisseur = $5 - 100m$, $Z = 25 - 150m$, $\sigma t = 5S$, Pendage = 90° .
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

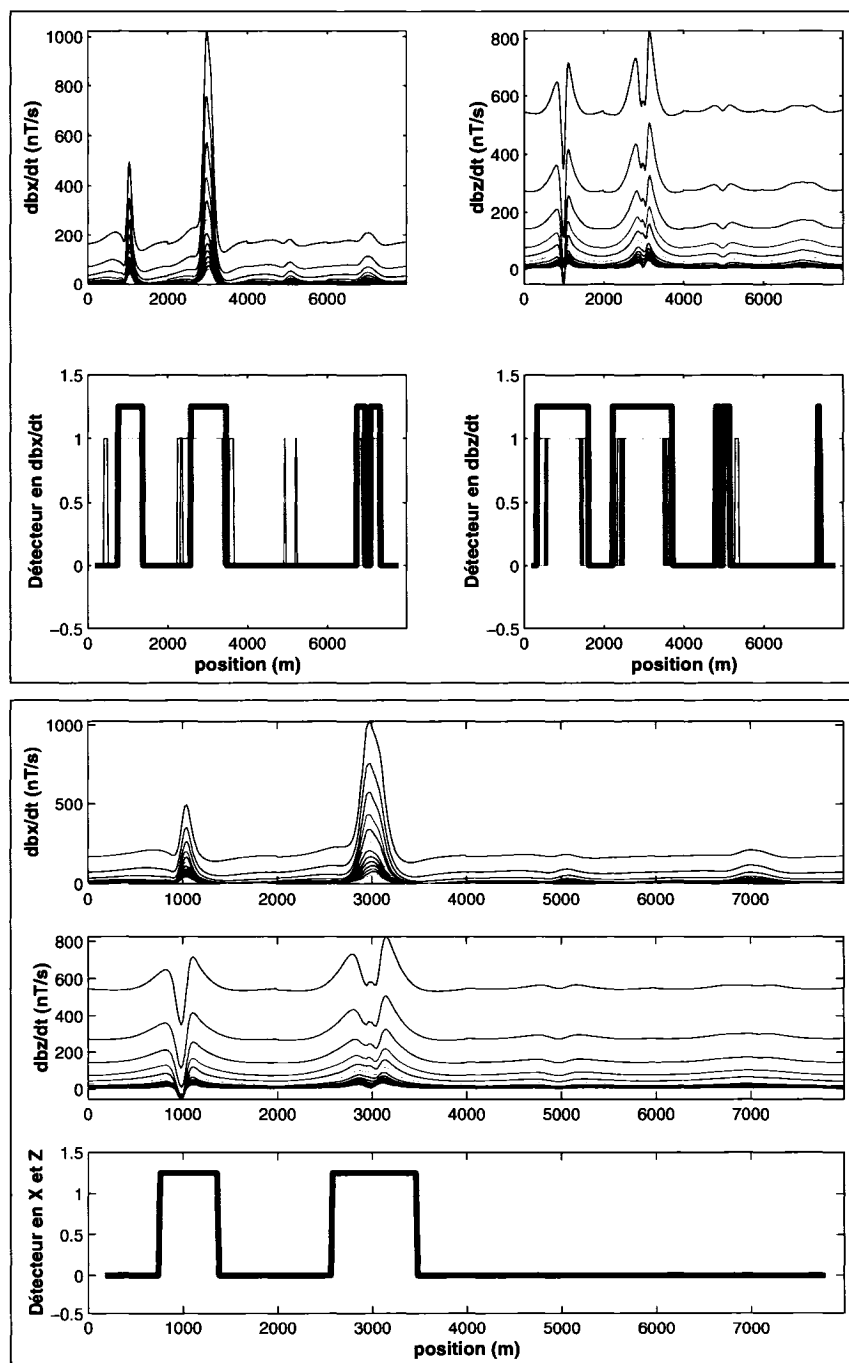


Figure A.5 : Détection des modèles de prismes : $500 \times 250m^2$
 épaisseur = $5 - 100m$, $Z = 25 - 150m$, $\sigma t = 125S$, Pendage = 90° .
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

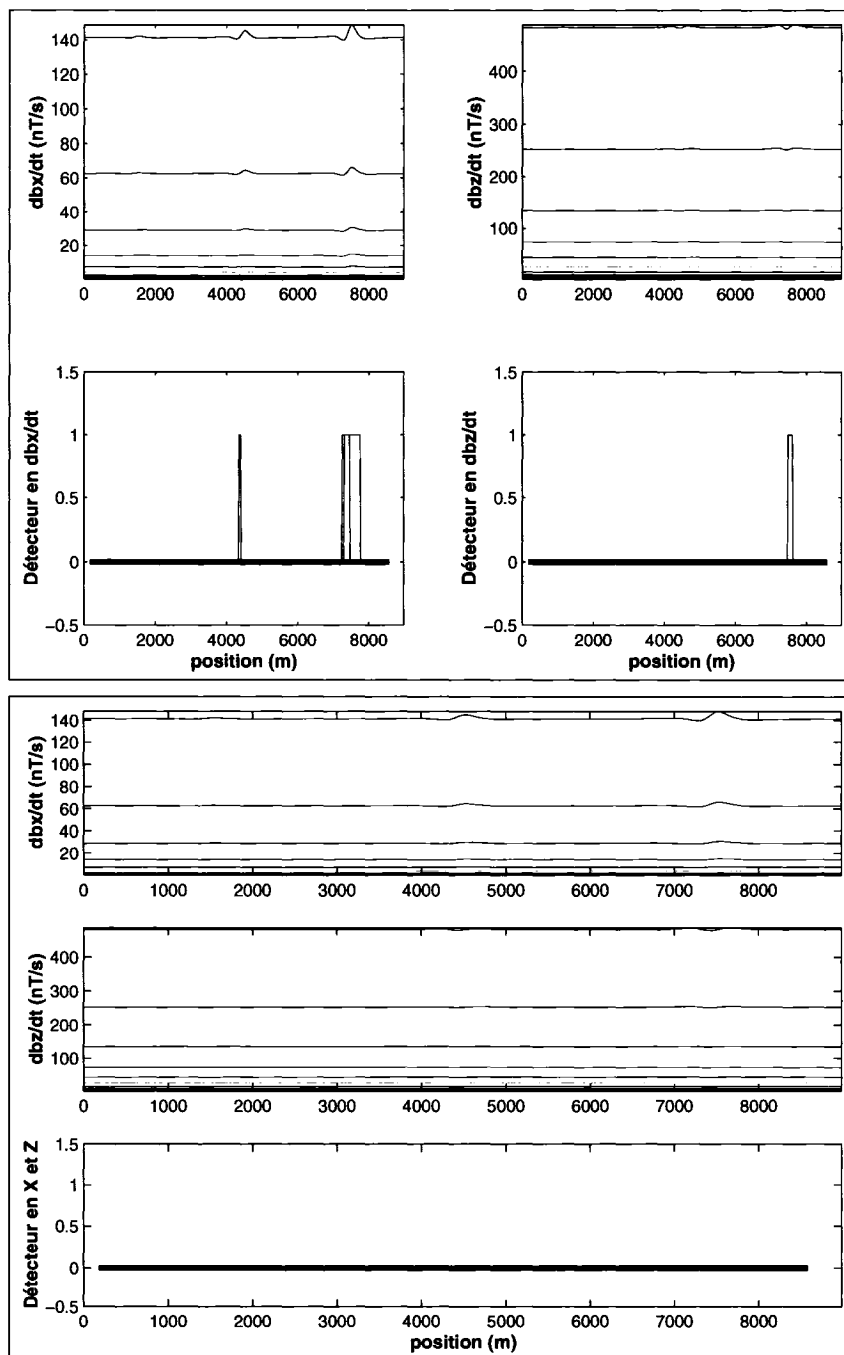


Figure A.6 : Détection des modèles plaques minces peu conductrices : $1000 \times 500m^2$, $Z = 21m$, $\sigma t = 0.01 - 0.05 - 0.1S$, Pendage = 90° .
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras : Détection sur au moins 3 canaux de temps)

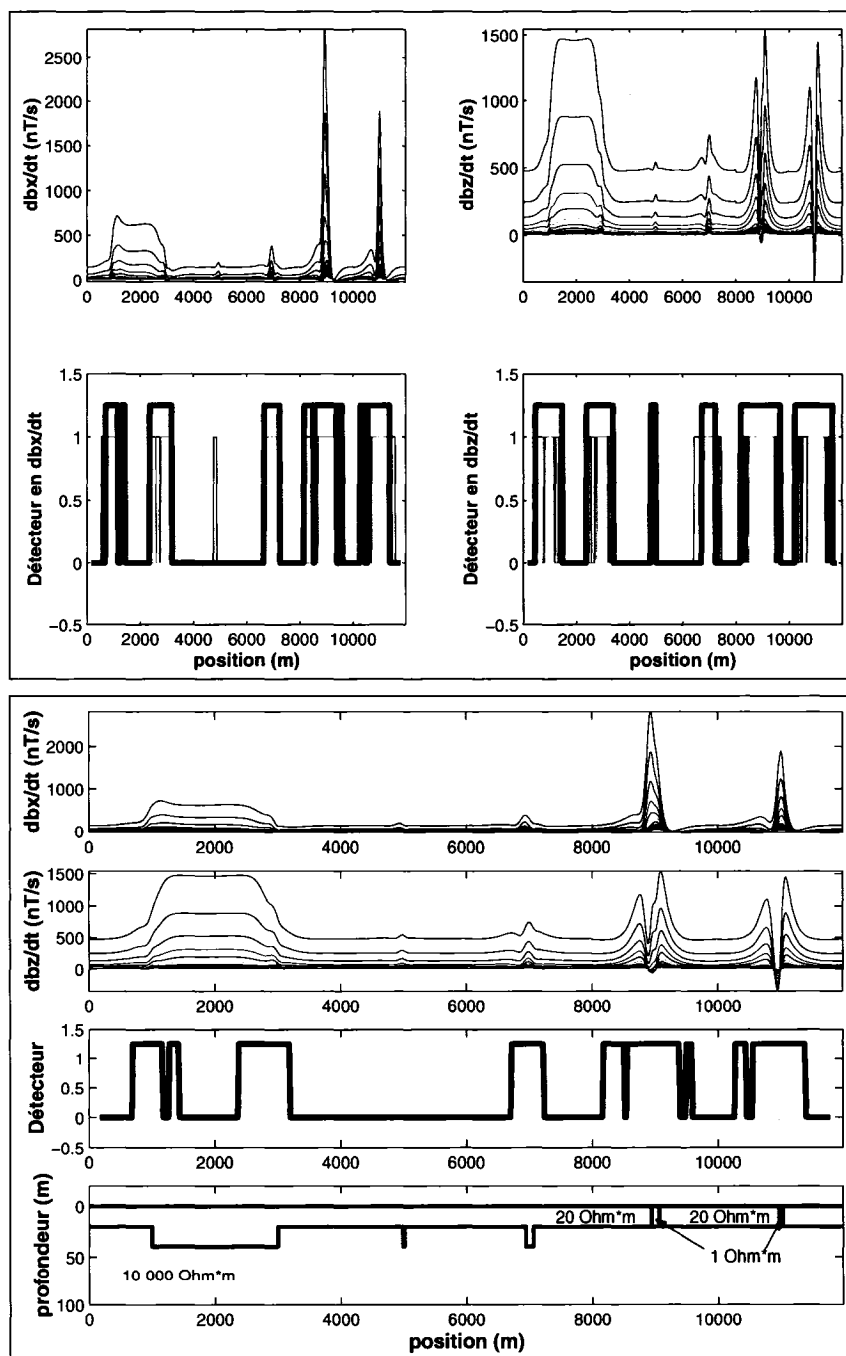


Figure A.7 : Détection des modèles de mort-terrain.
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

A.2 Tests sur données MEGATEM

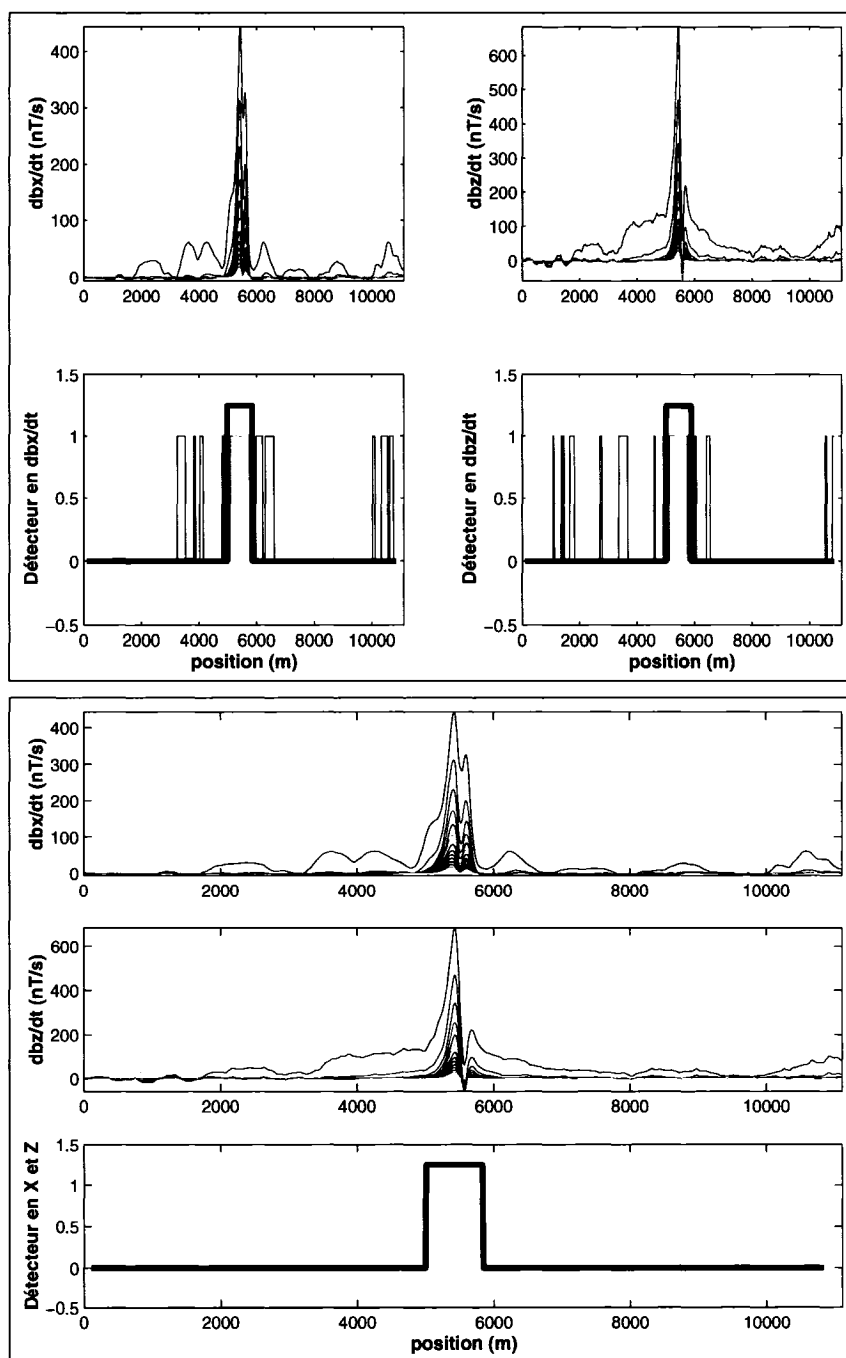


Figure A.8 : Détection du dépôt de sulfures massifs ISO
 Ligne 100401 du levé MEGATEM
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

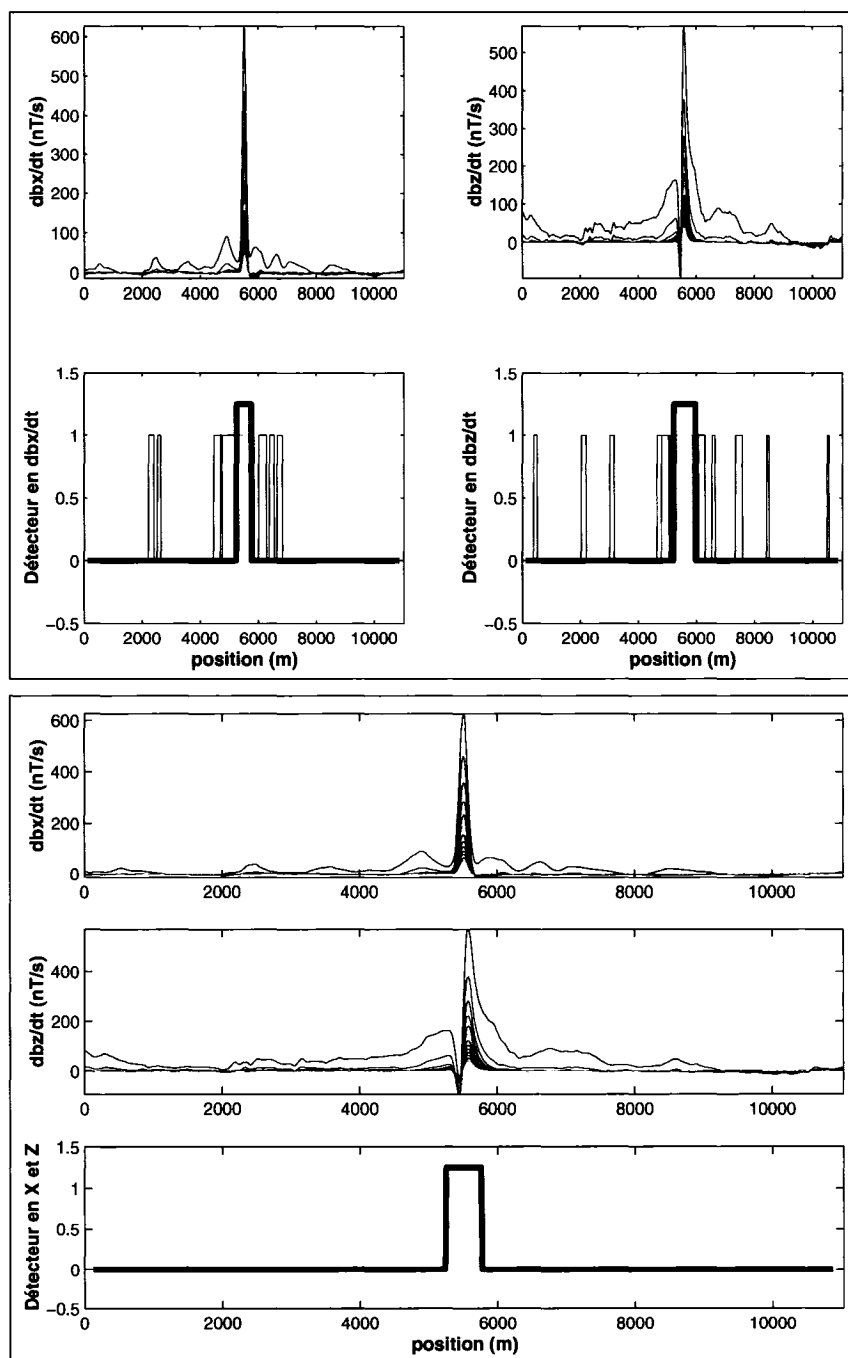


Figure A.9 : Détection du dépôt de sulfures massifs ISO
 Ligne 100501 du levé MEGATEM
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

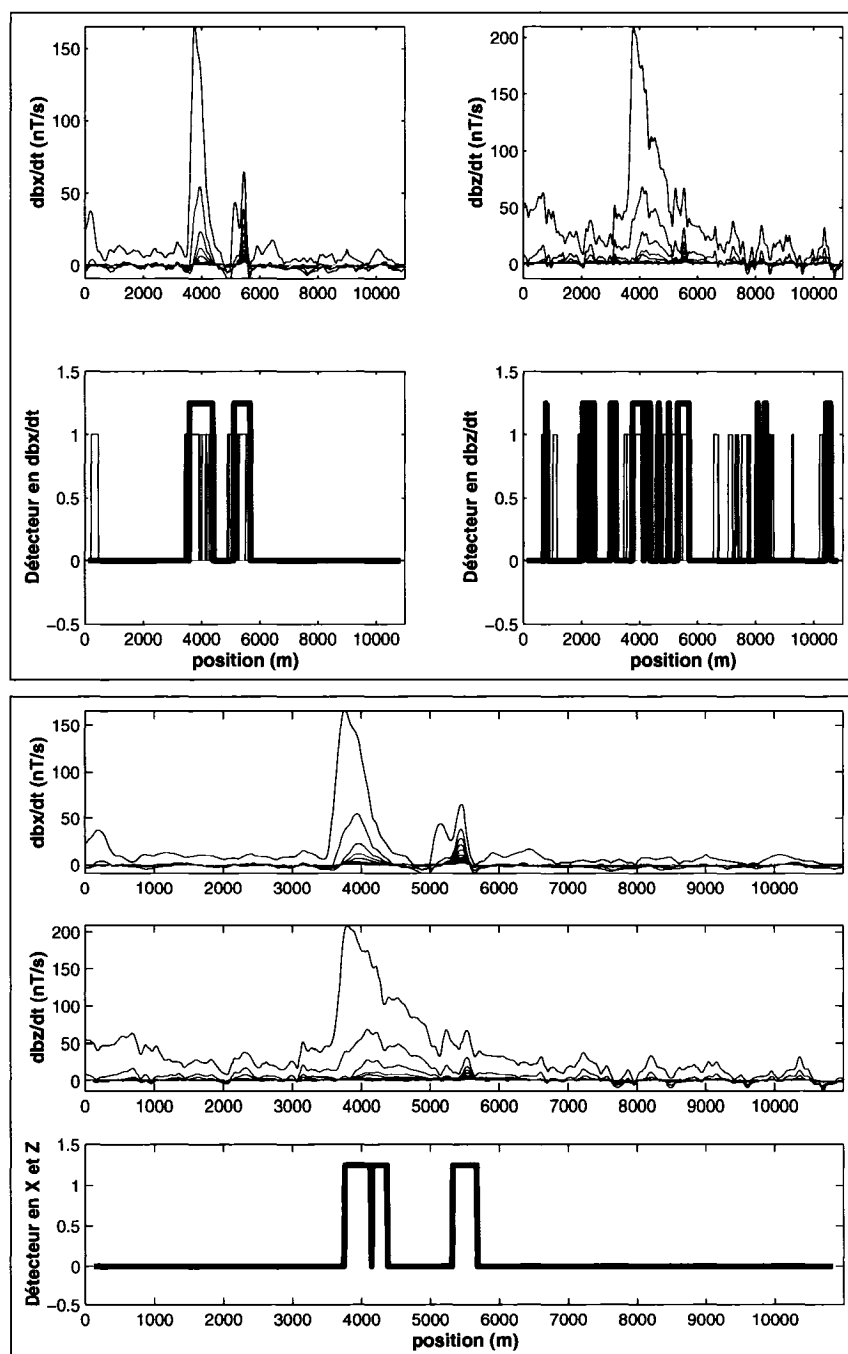


Figure A.10 : Détection du dépôt de sulfures massifs New-Inesco
 Ligne 101501 du levé MEGATEM
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

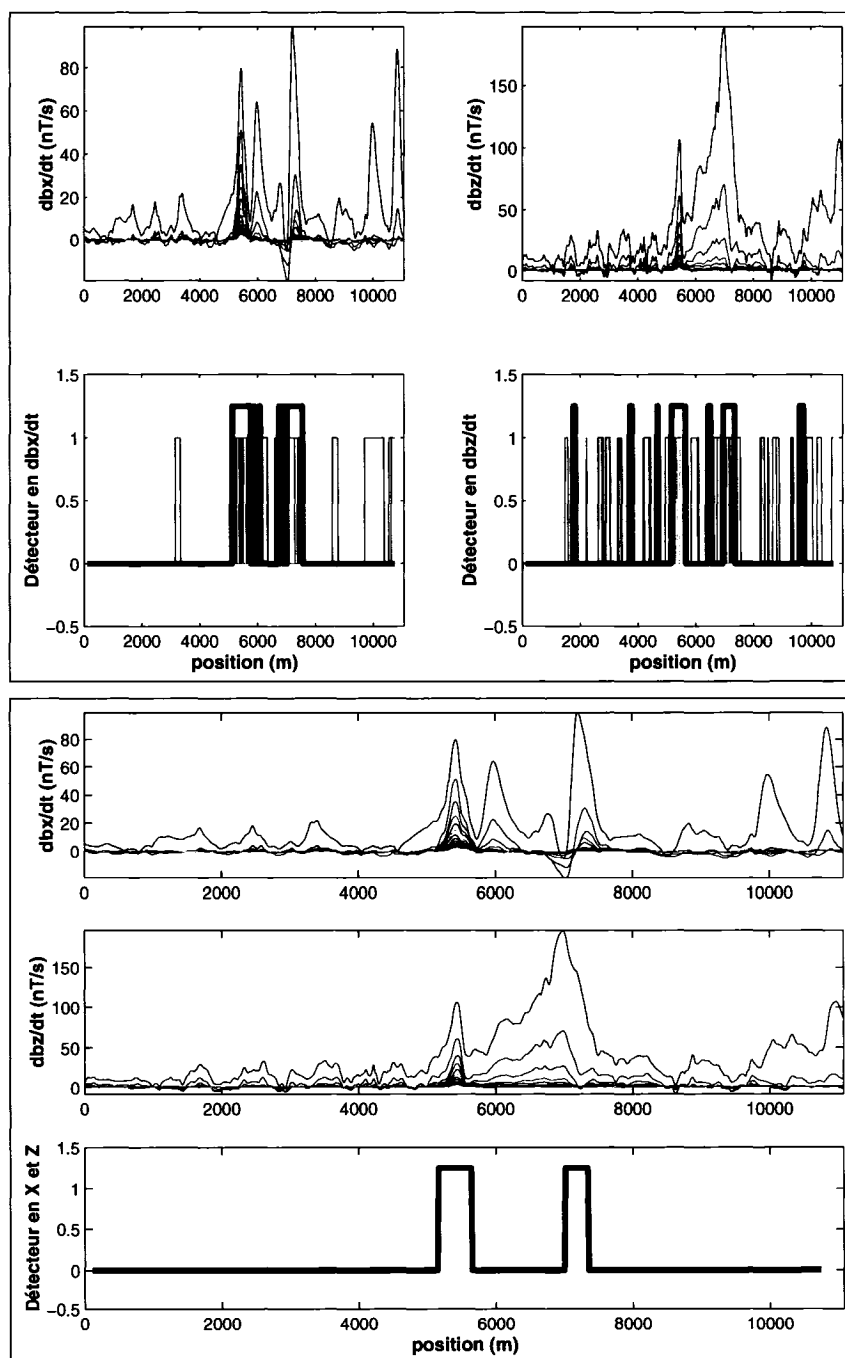


Figure A.11 : Détection du dépôt de sulfures massifs New-Insko
Ligne 101601 du levé MEGATEM

(Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
Détection sur au moins 3 canaux de temps)

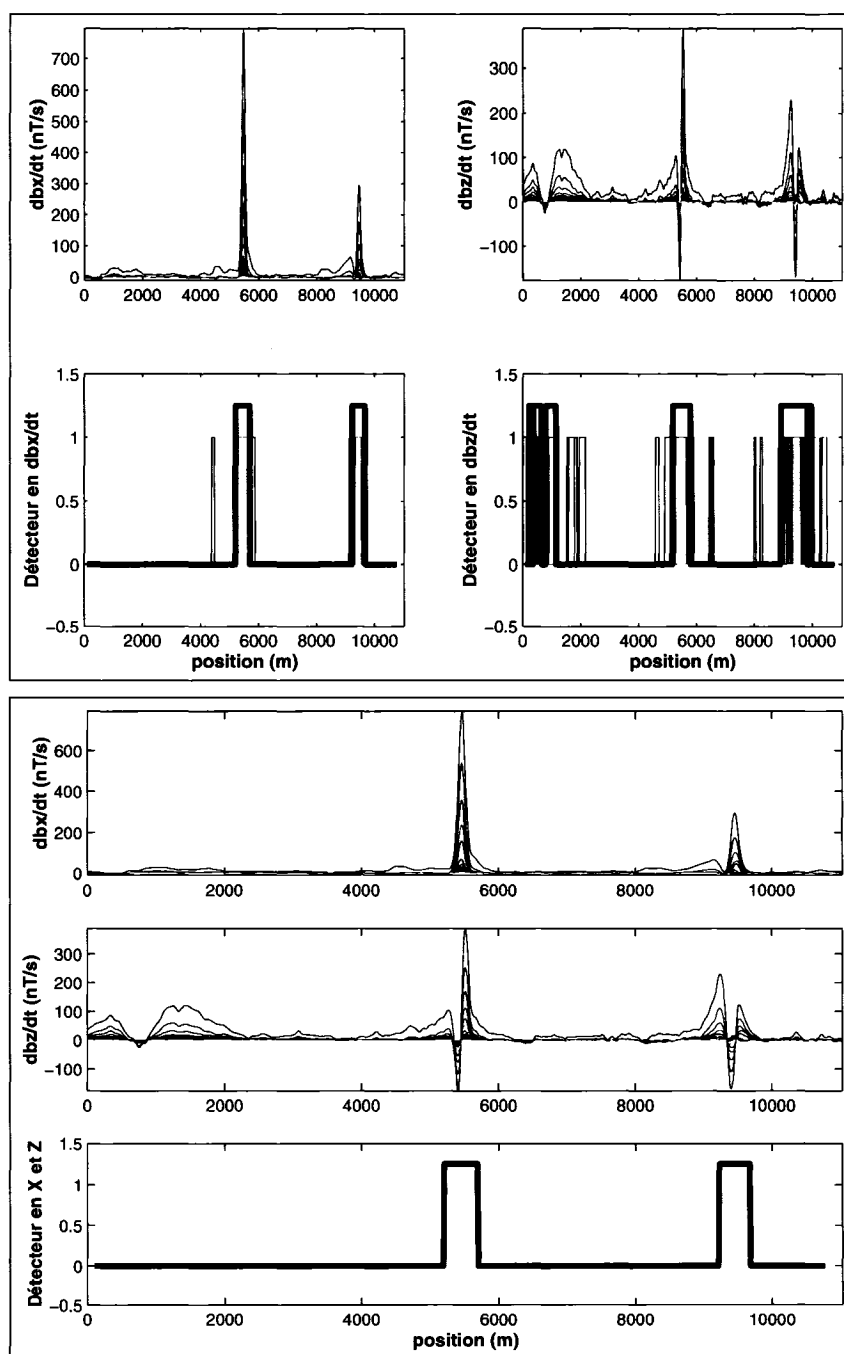


Figure A.12 : Détection du dépôt de sulfures massifs Gallen
Ligne 300401 du levé MEGATEM

(Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
Détection sur au moins 3 canaux de temps)

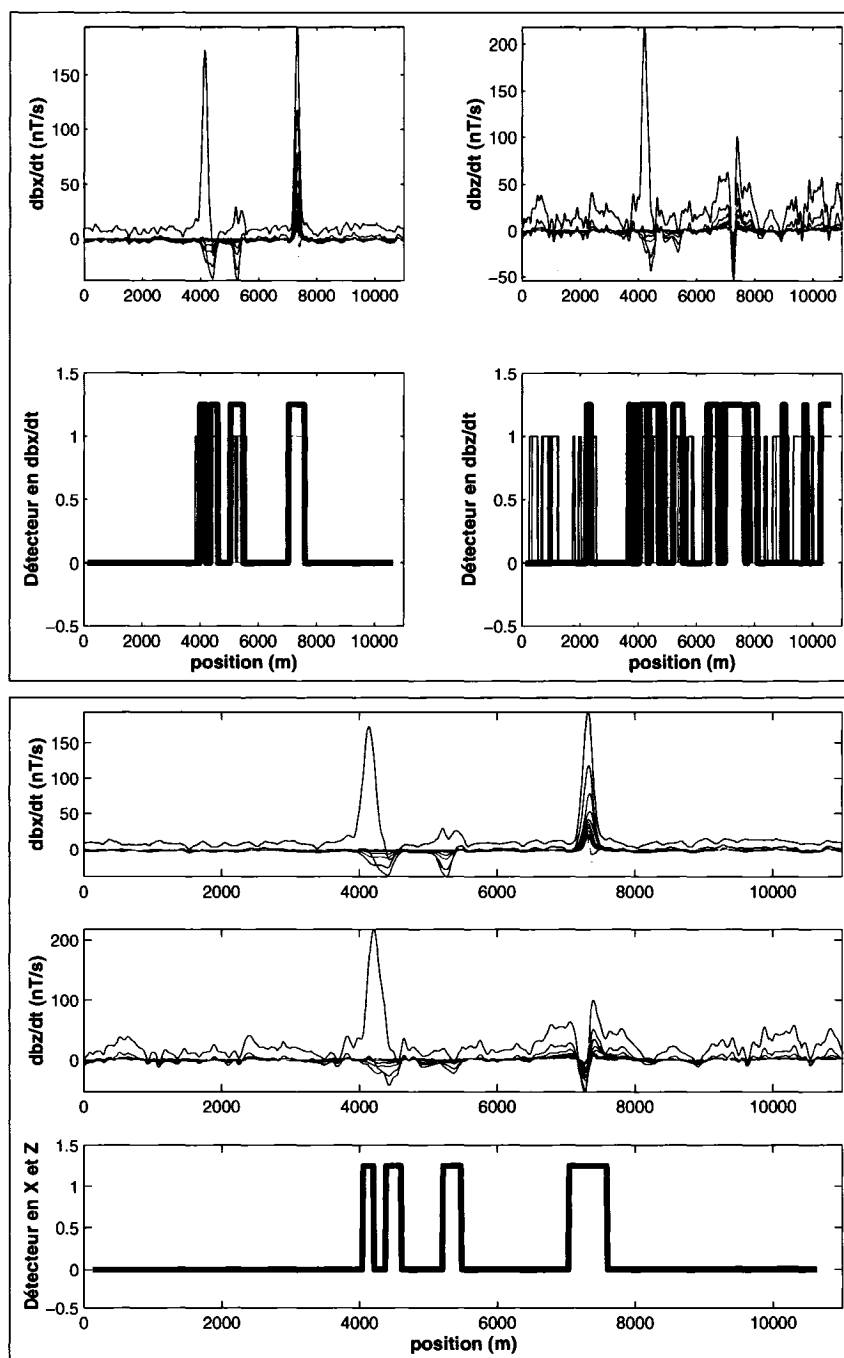


Figure A.13 : Détection du dépôt de sulfures massifs Aldermac
 Ligne 200301 du levé MEGATEM
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

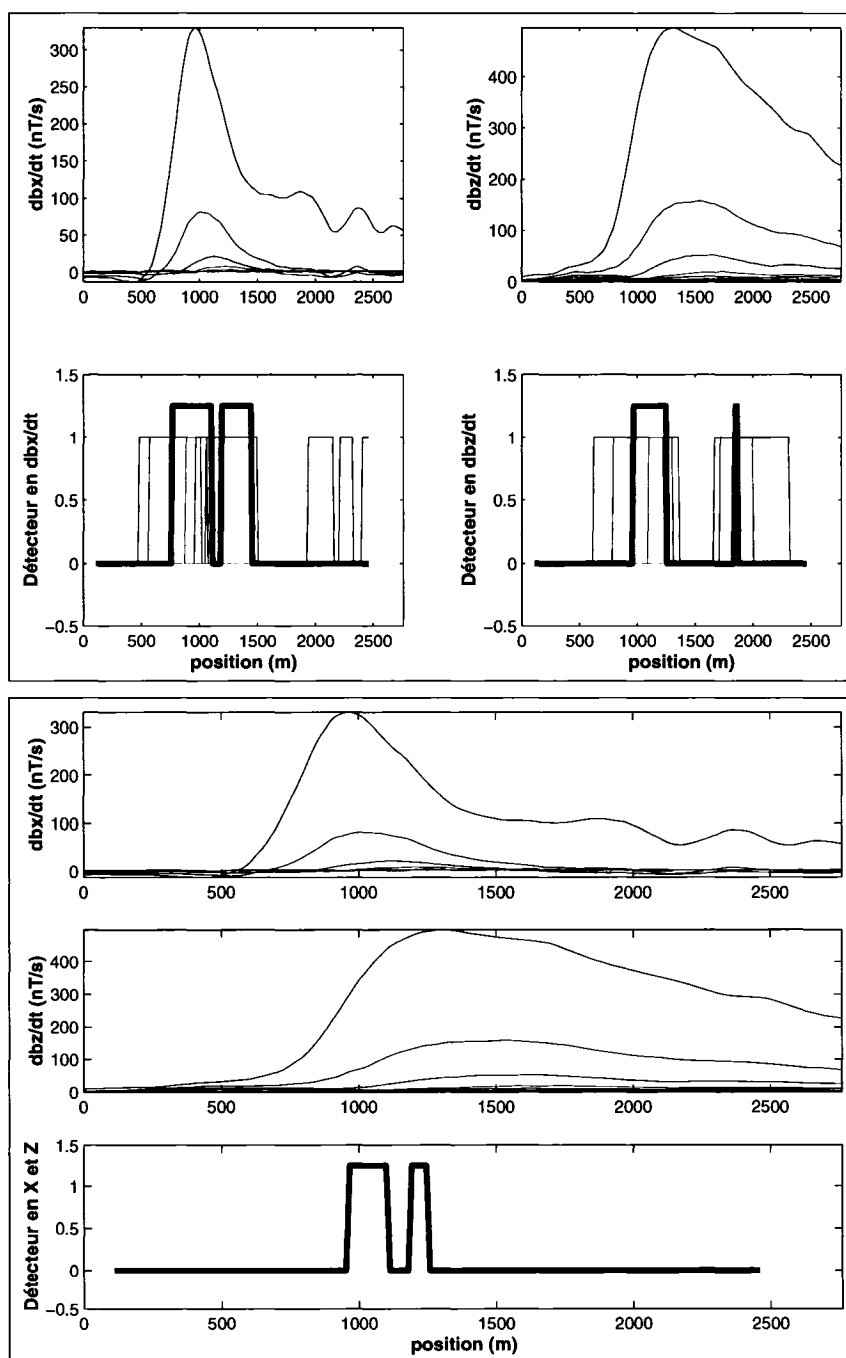


Figure A.14 : Détection d'une cible MEGATEM (CORPS #1)
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

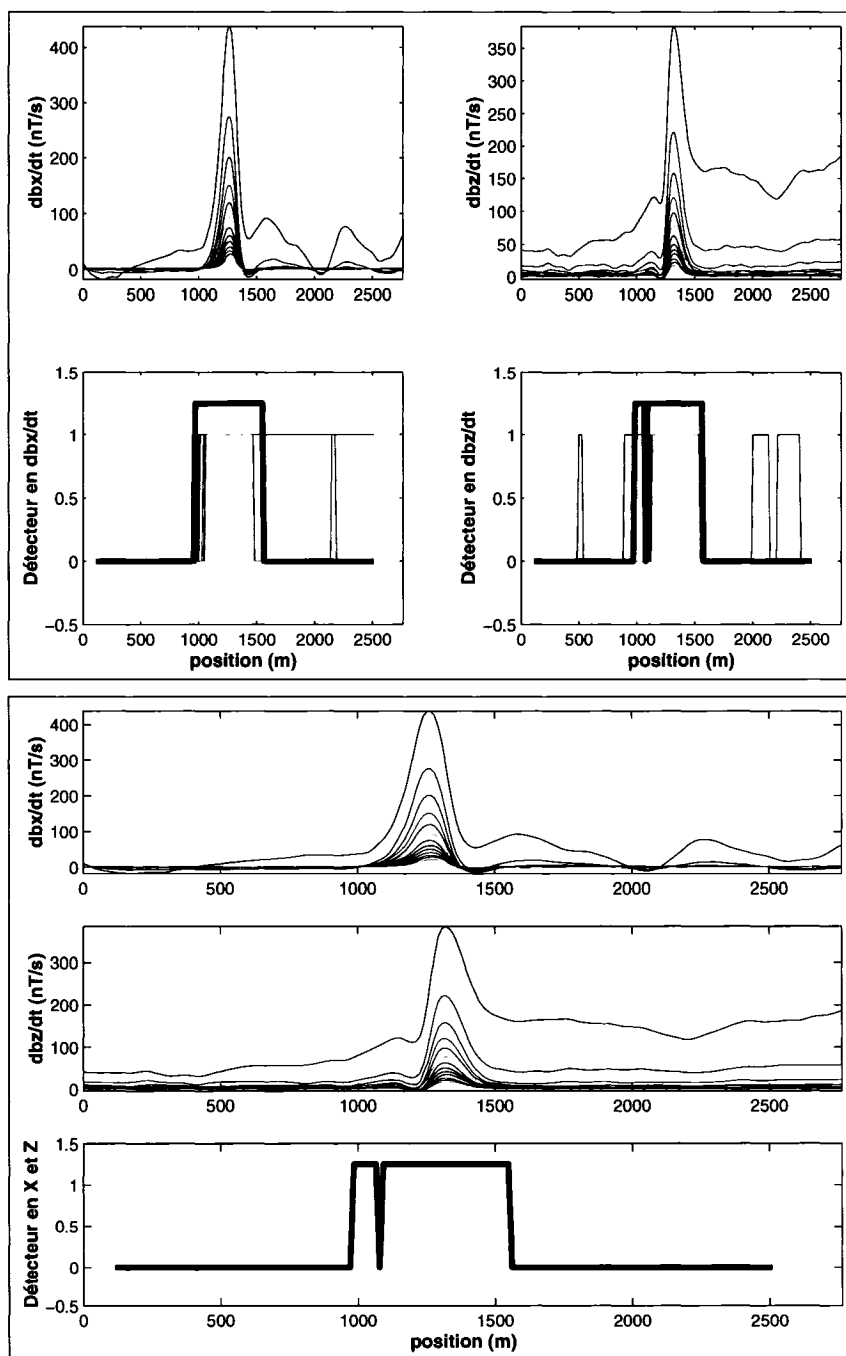


Figure A.15 : Détection d'une cible MEGATEM (CORPS #2)
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

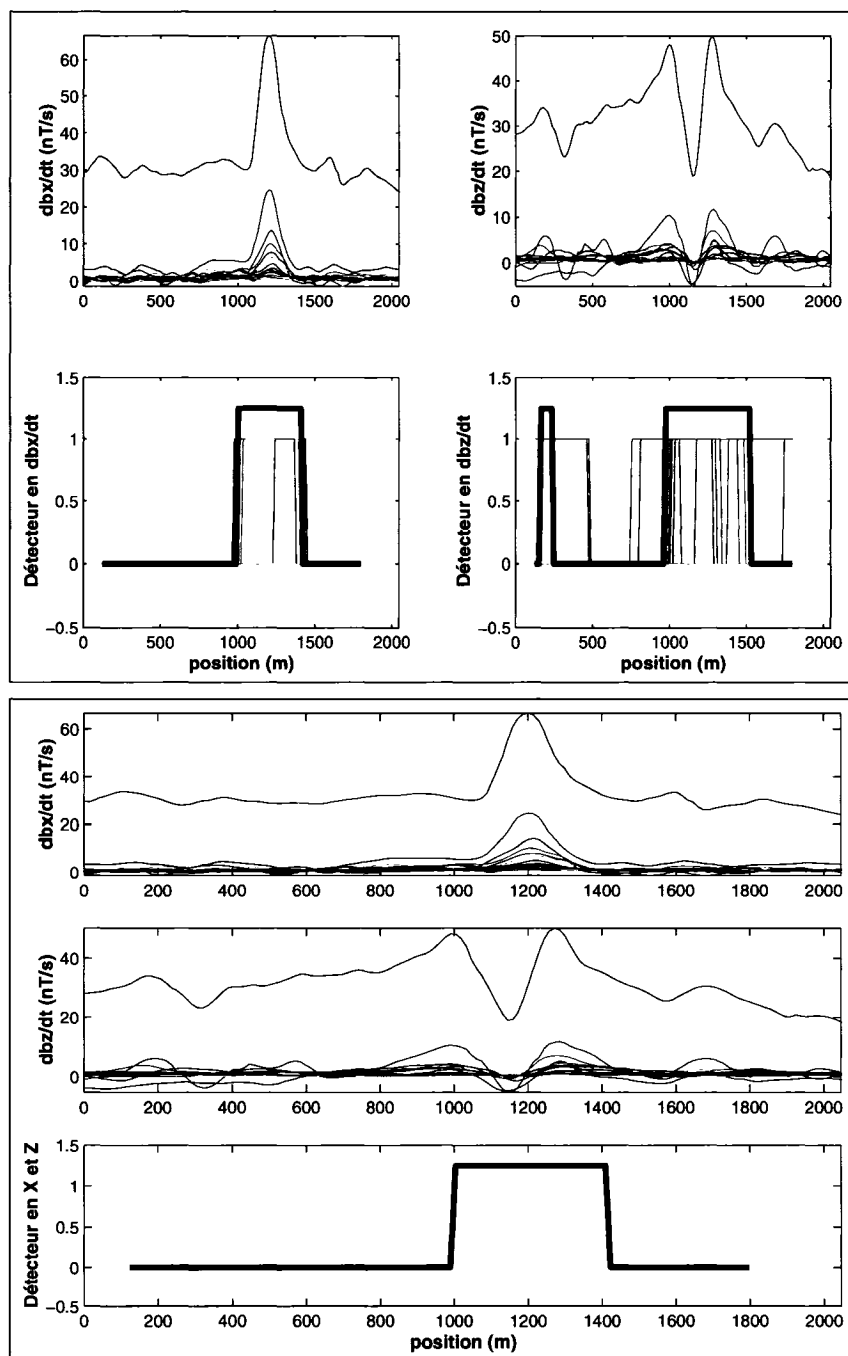


Figure A.16 : Détection d'une cible MEGATEM (CORPS #3)
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

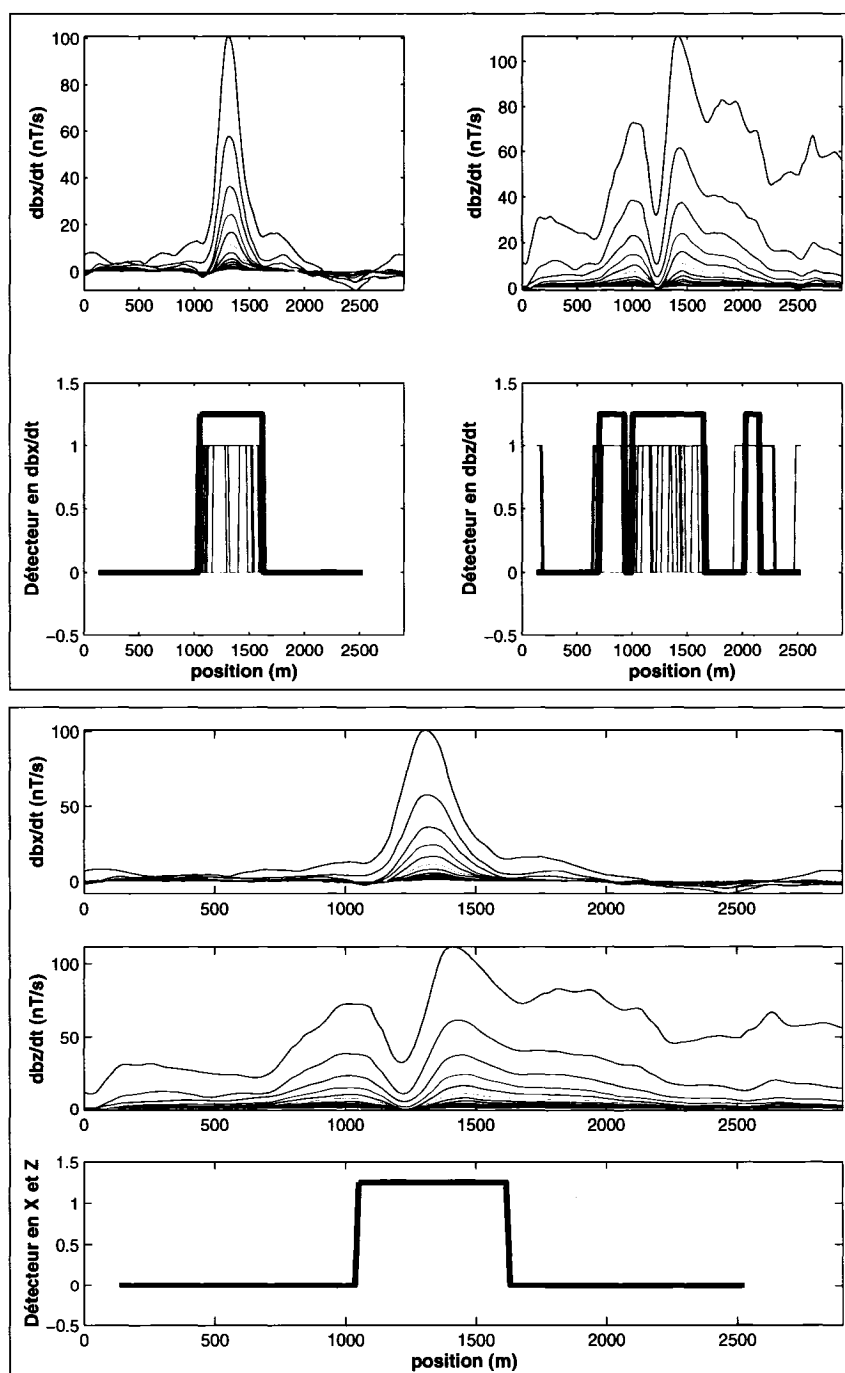
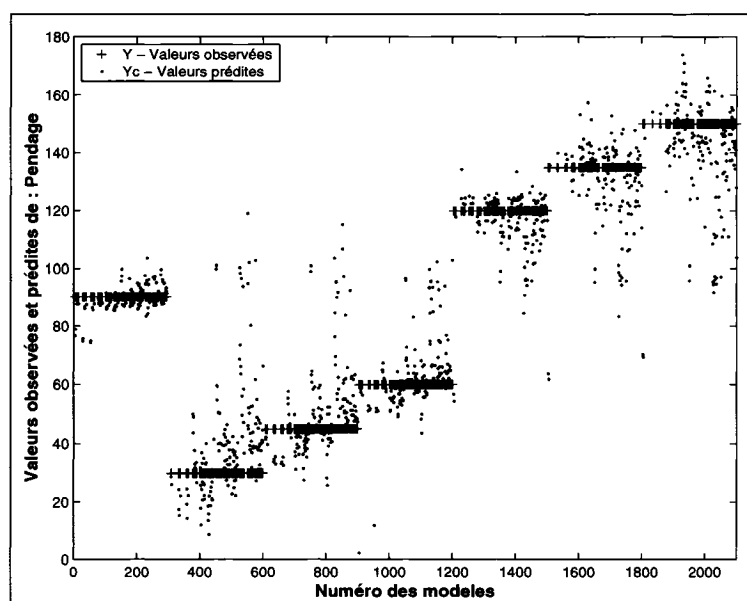


Figure A.17 : Détection d'une cible MEGATEM (CORPS #4)
 (Légende du détecteur : Traits fins : Détection sur chaque canal, Trait gras :
 Détection sur au moins 3 canaux de temps)

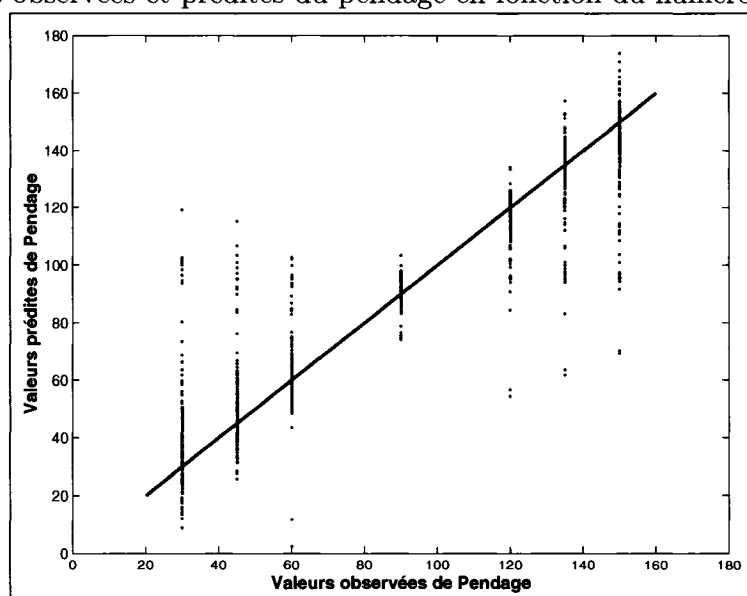
Annexe B

Analyse des régressions

B.1 Régression du pendage



a) Valeurs observées et prédites du pendage en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites du pendage en fonction de la valeur observée

Figure B.1 : Régression du pendage

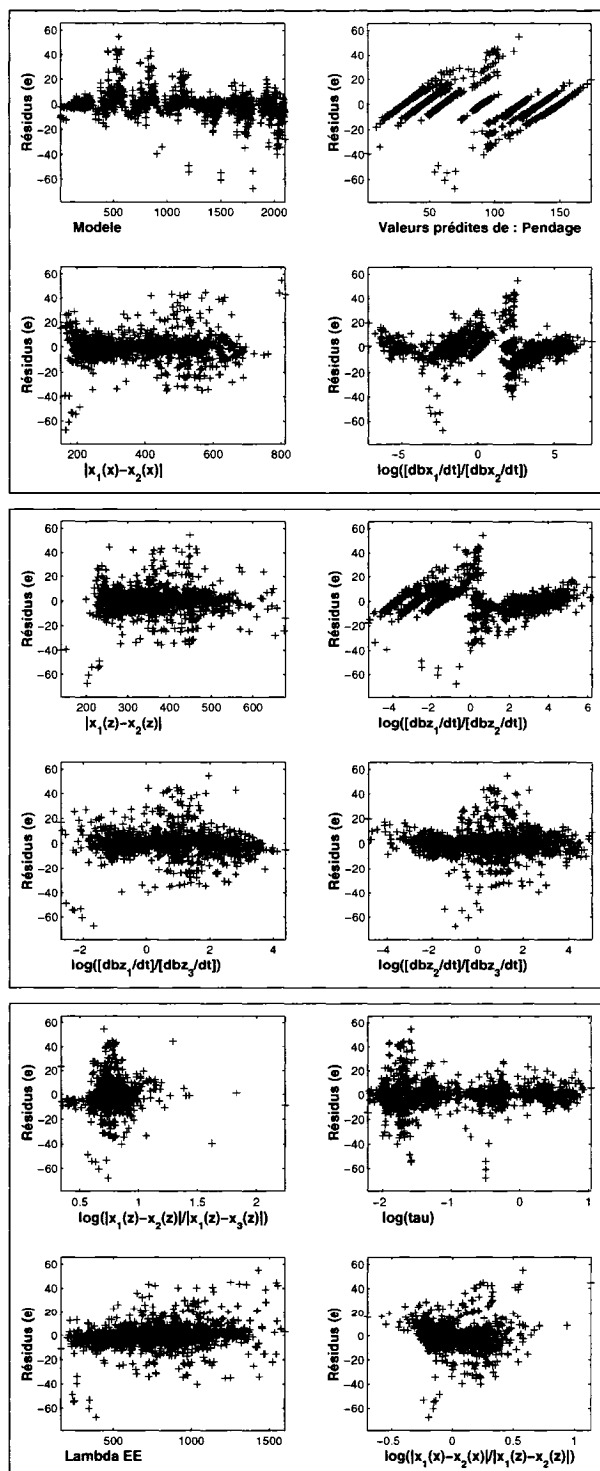
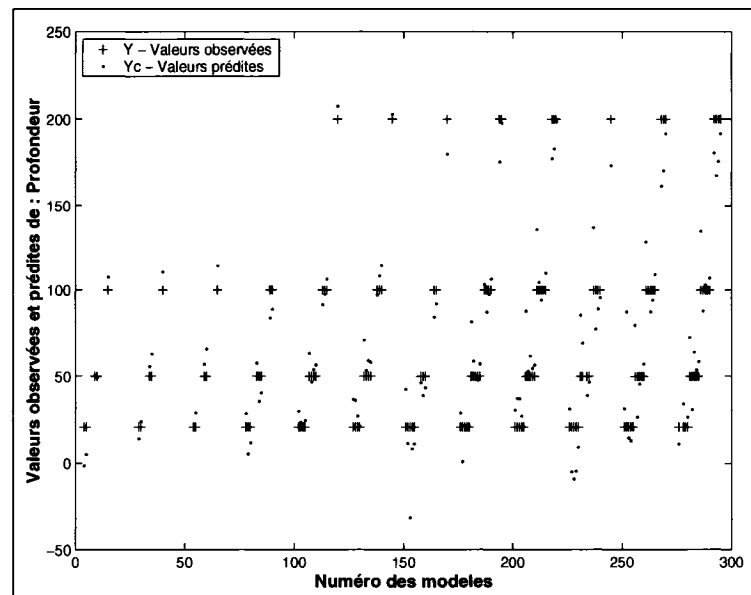
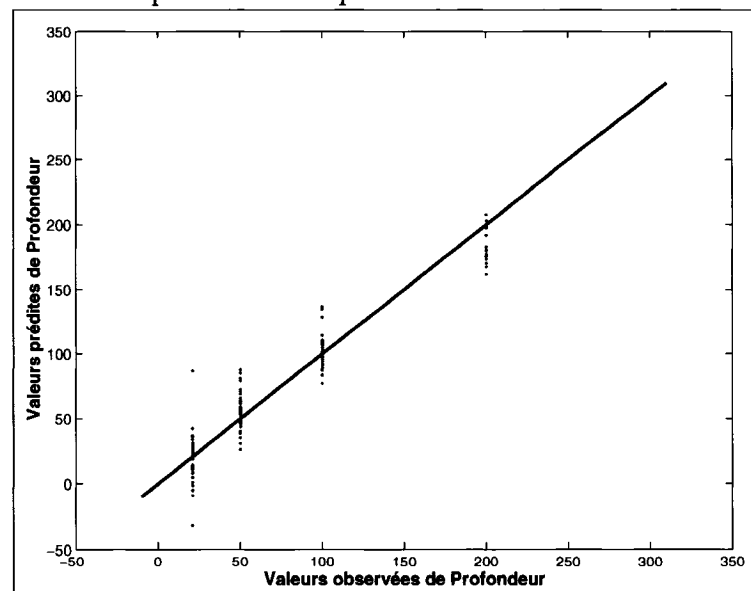


Figure B.2 : Résidus de la régression du pendage en fonction de différentes variables

B.2 Régression de la profondeur



a) Valeurs observées et prédites de la profondeur en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la profondeur en fonction de la valeur observée
Figure B.3 : Régression de la profondeur (Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)

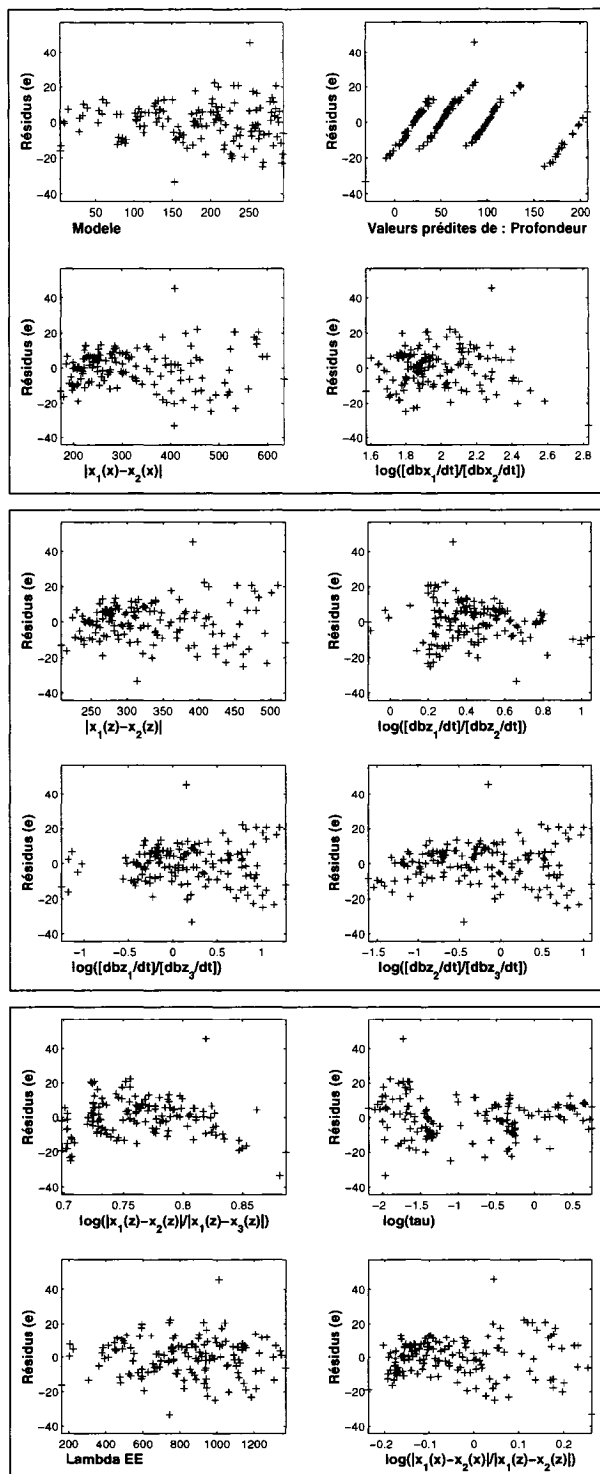
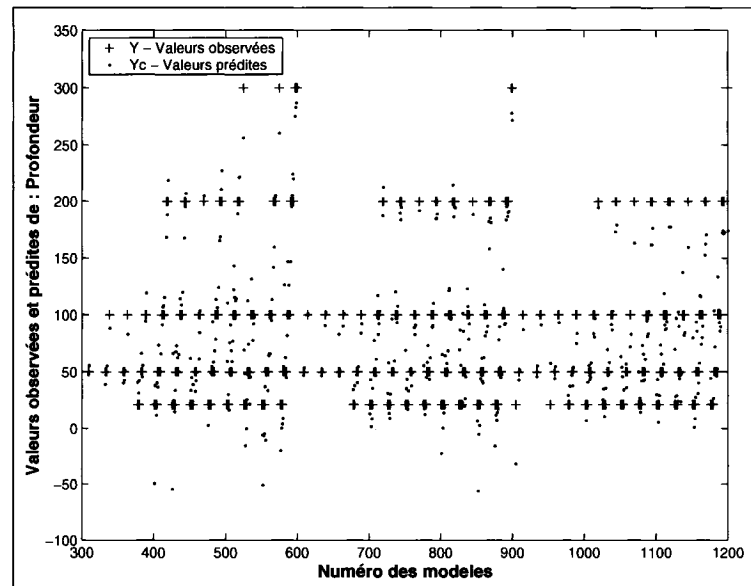
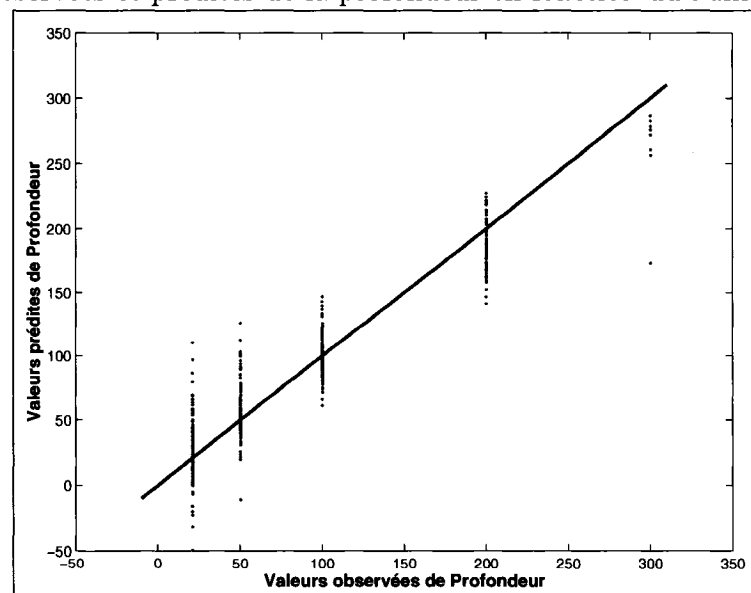


Figure B.4 : Résidus de la régression de la profondeur en fonction de différentes variables (Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la profondeur en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la profondeur en fonction de la valeur observée
Figure B.5 : Régression de la profondeur (Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)

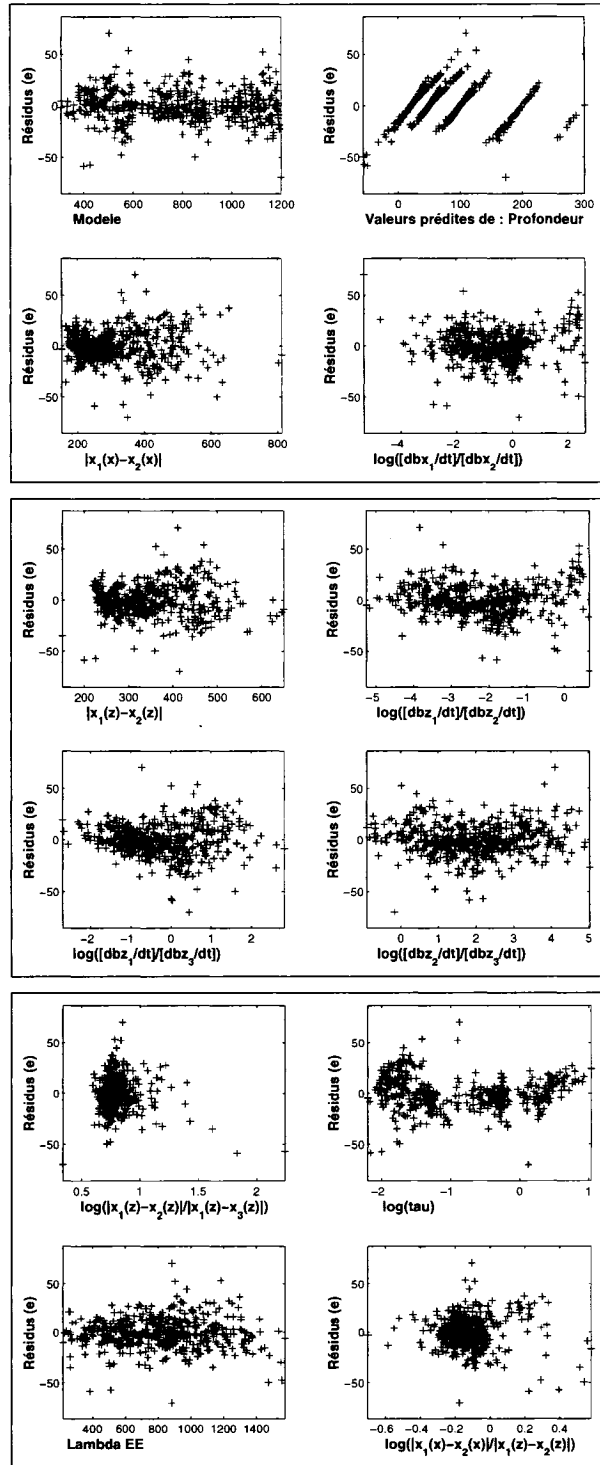
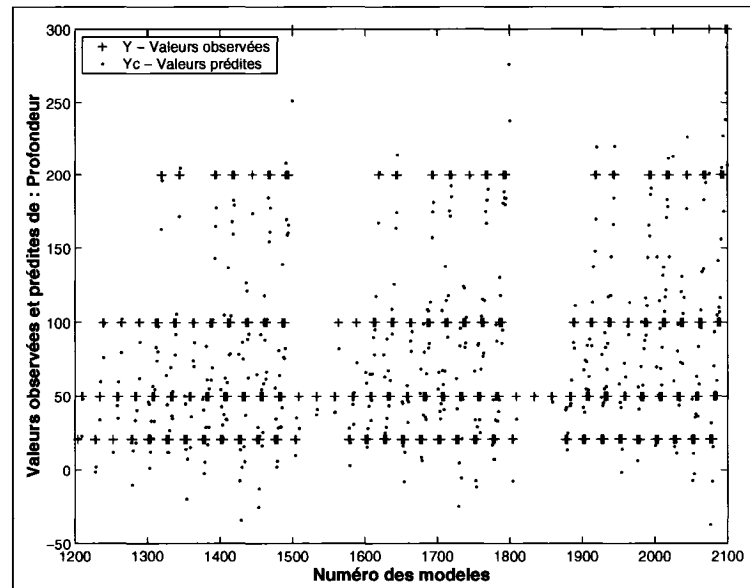
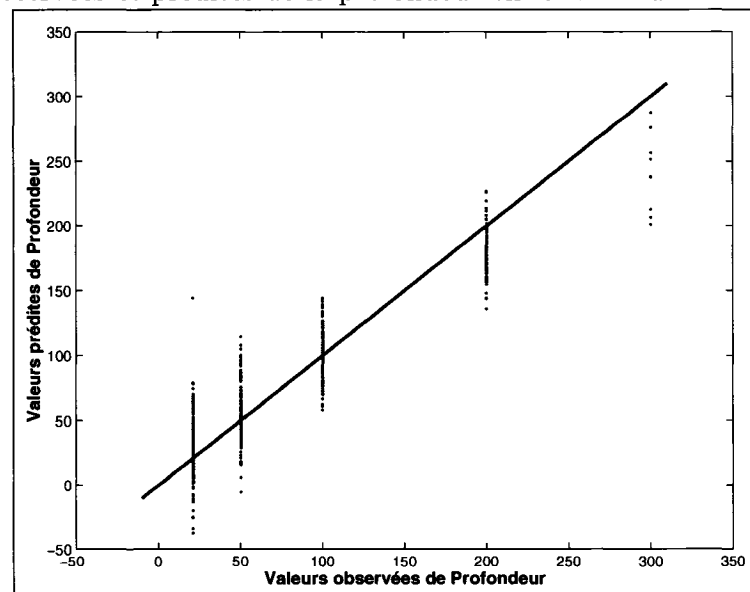


Figure B.6 : Résidus de la régression de la profondeur en fonction de différentes variables (Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la profondeur en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la profondeur en fonction de la valeur observée
Figure B.7 : Régression de la profondeur (Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

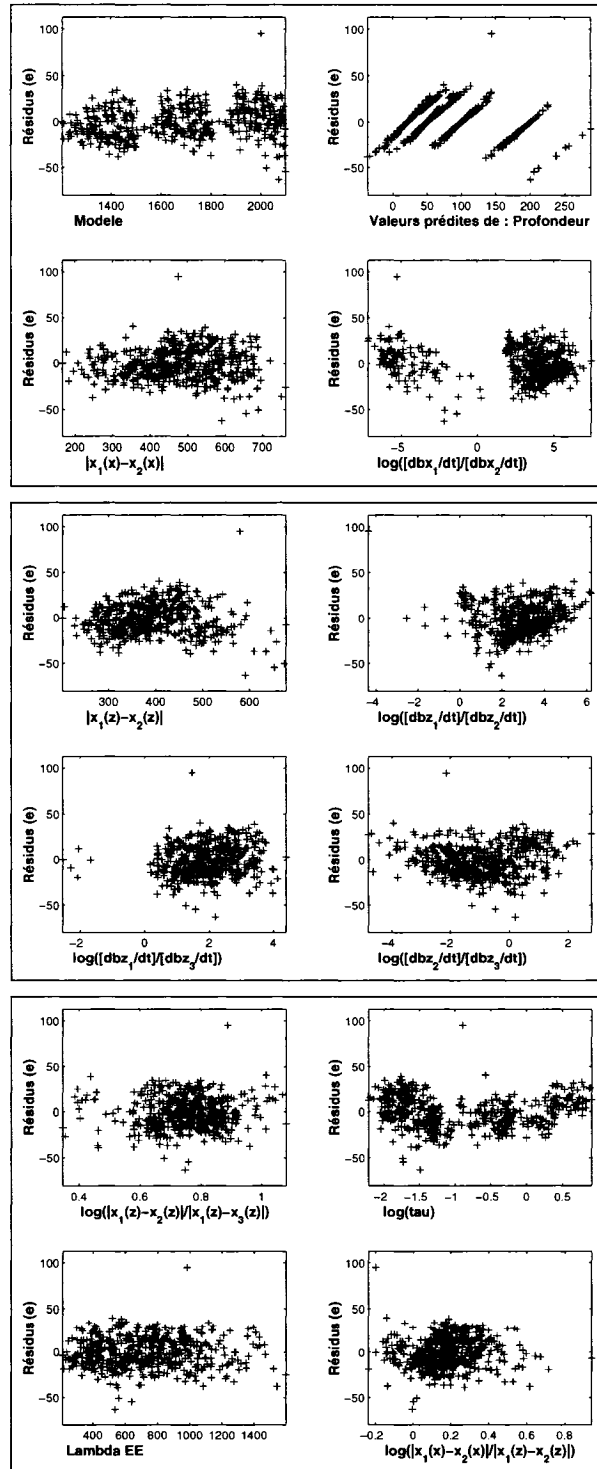
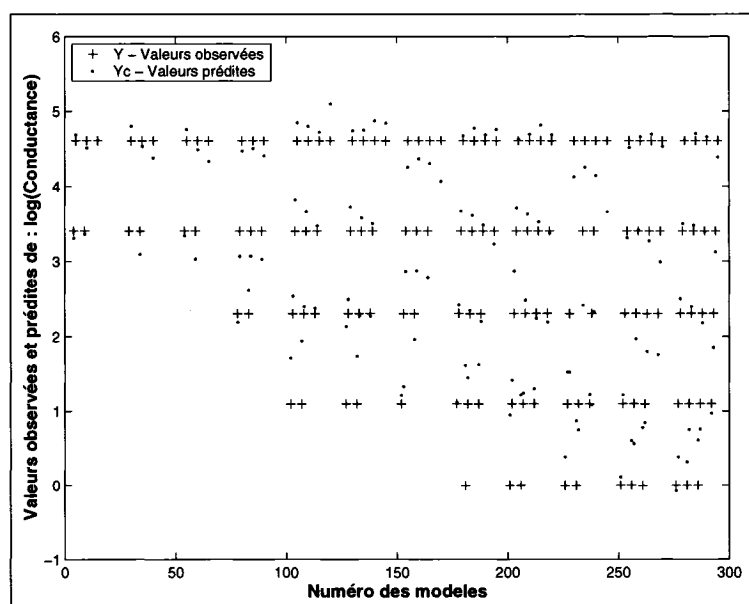
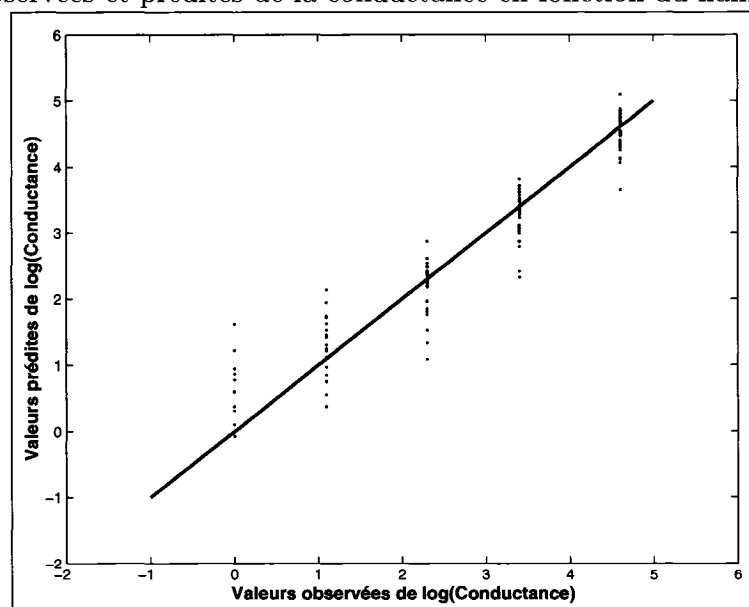


Figure B.8 : Résidus de la régression de la profondeur en fonction de différentes variables (Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

B.3 Régression de la conductance



a) Valeurs observées et prédites de la conductance en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la conductance en fonction de la valeur observée

Figure B.9 : Régression de la conductance (Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)

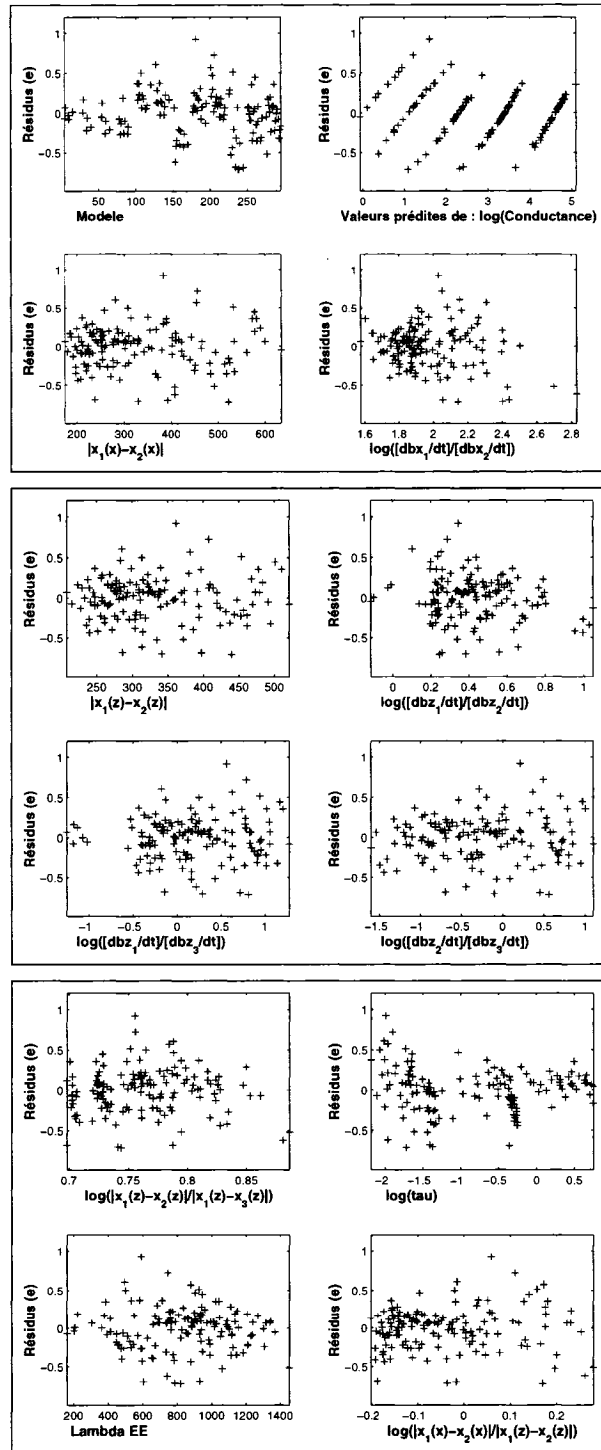
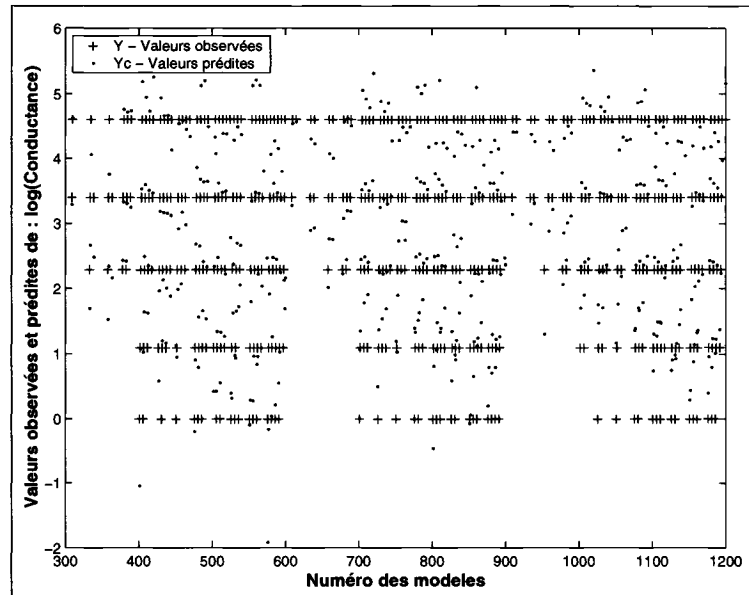
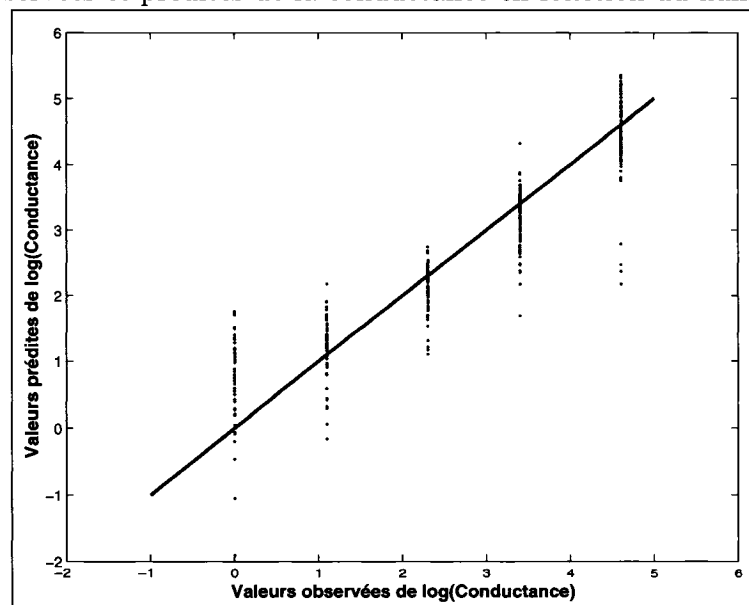


Figure B.10 : Résidus de la régression de la conductance en fonction de différentes variables (Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la conductance en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la conductance en fonction de la valeur observée
Figure B.11 : Régression de la conductance (Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)

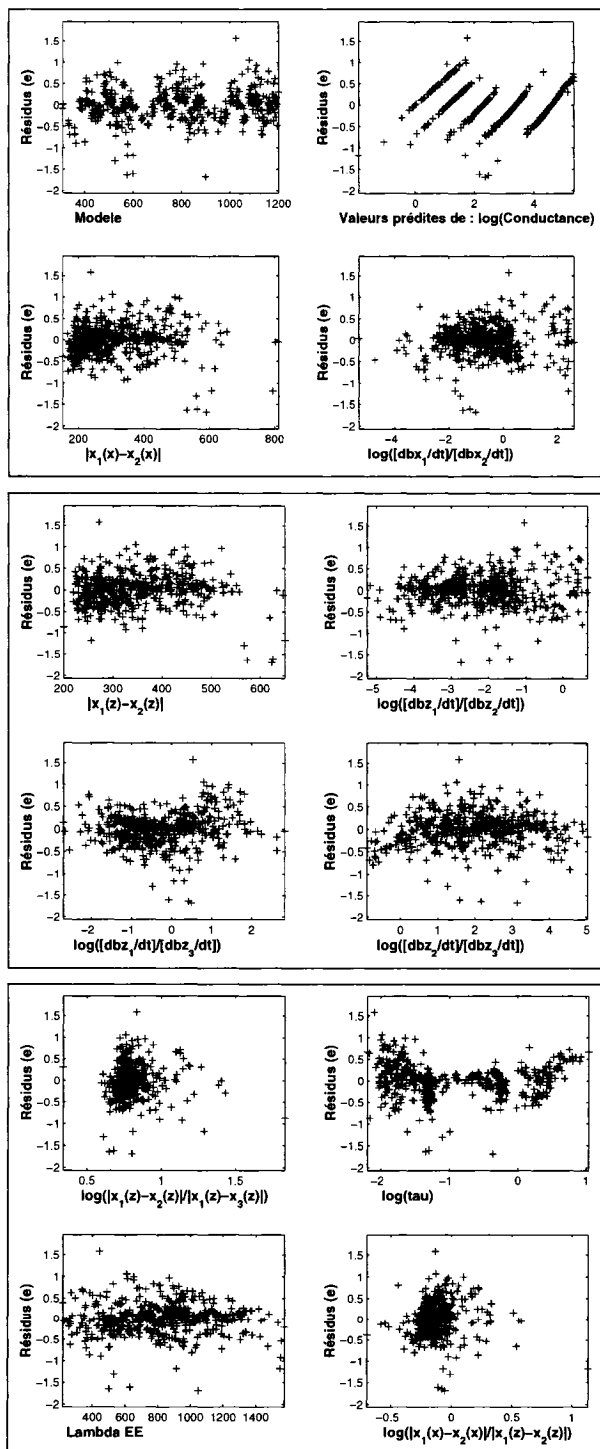
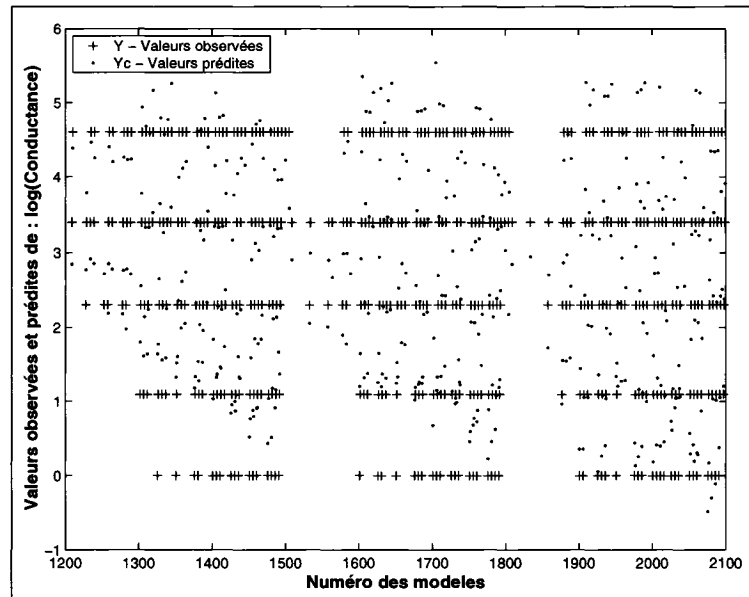
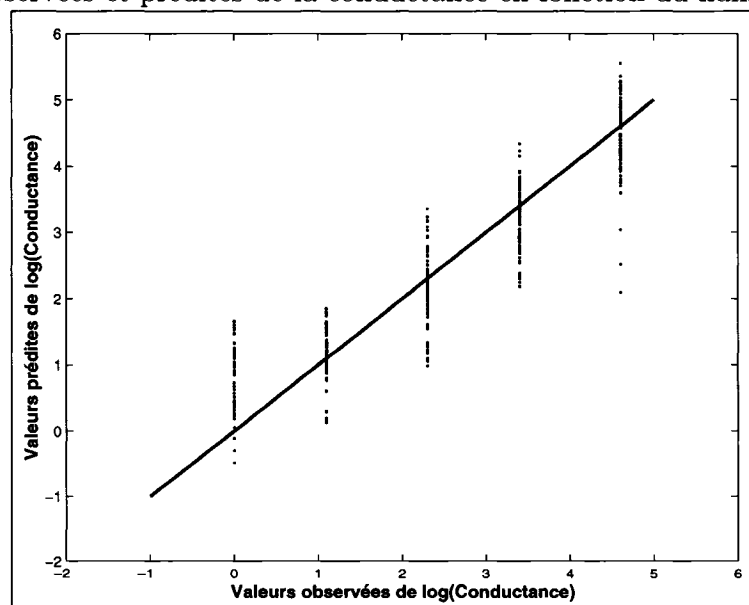


Figure B.12 : Résidus de la régression de la conductance en fonction de différentes variables (Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la conductance en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la conductance en fonction de la valeur observée

Figure B.13 : Régression de la conductance (Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

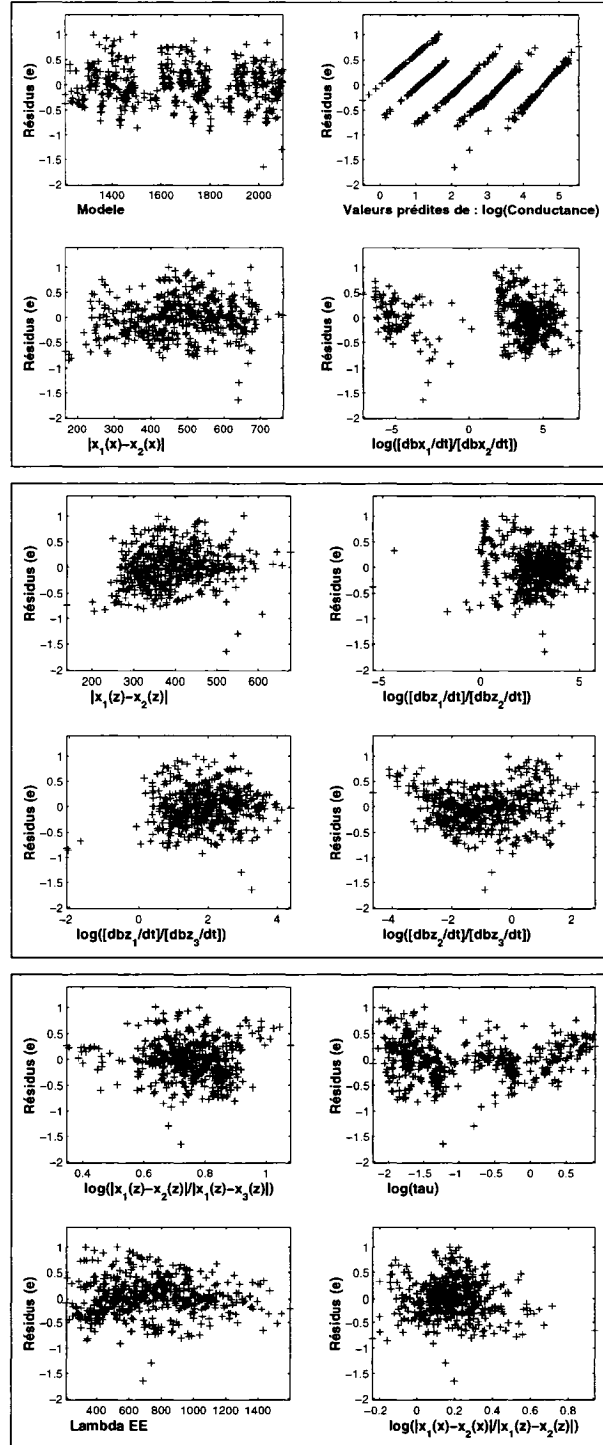
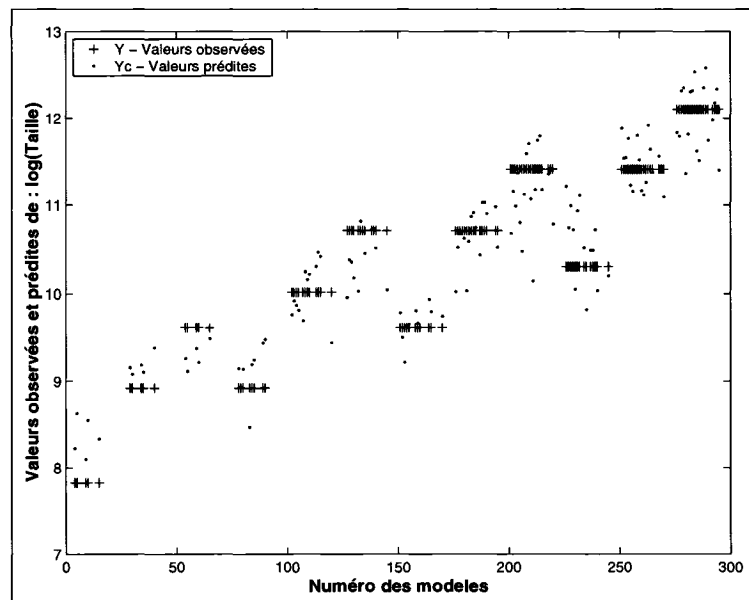
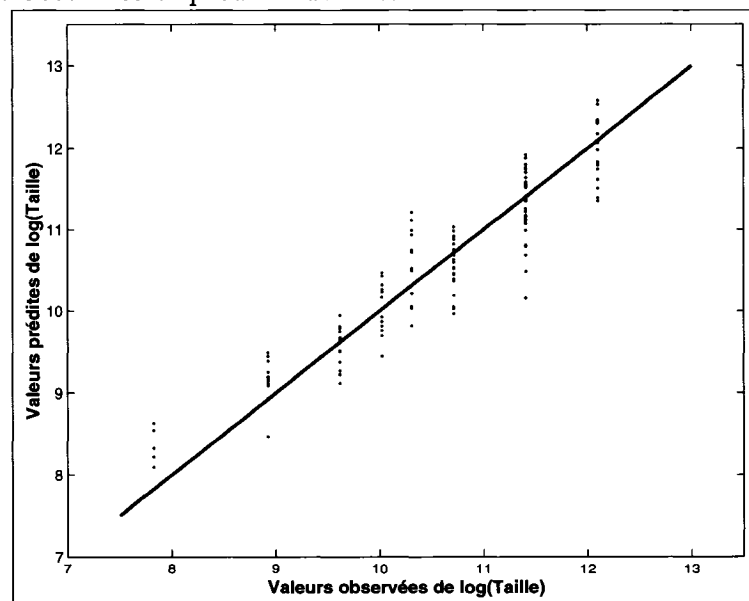


Figure B.14 : Résidus de la régression de la conductance en fonction de différentes variables (Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

B.4 Régression de la taille



a) Valeurs observées et prédites de la taille en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la taille en fonction de la valeur observée
Figure B.15 : Régression de la taille (Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)

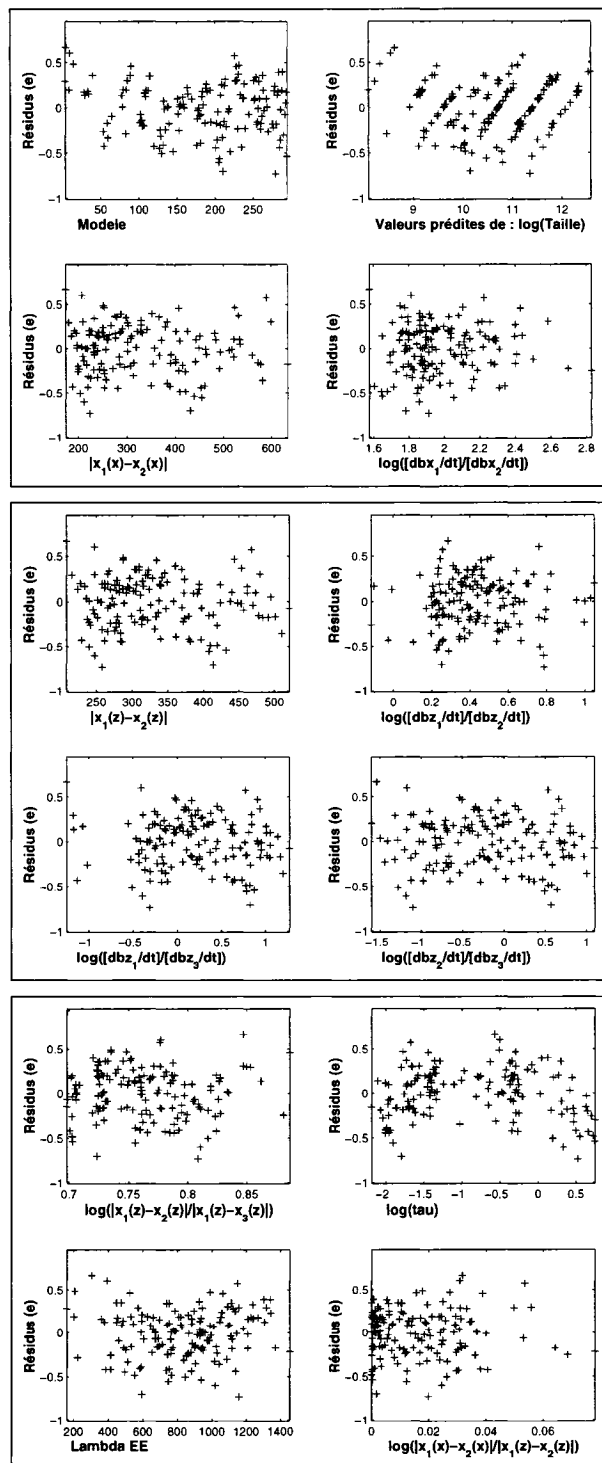
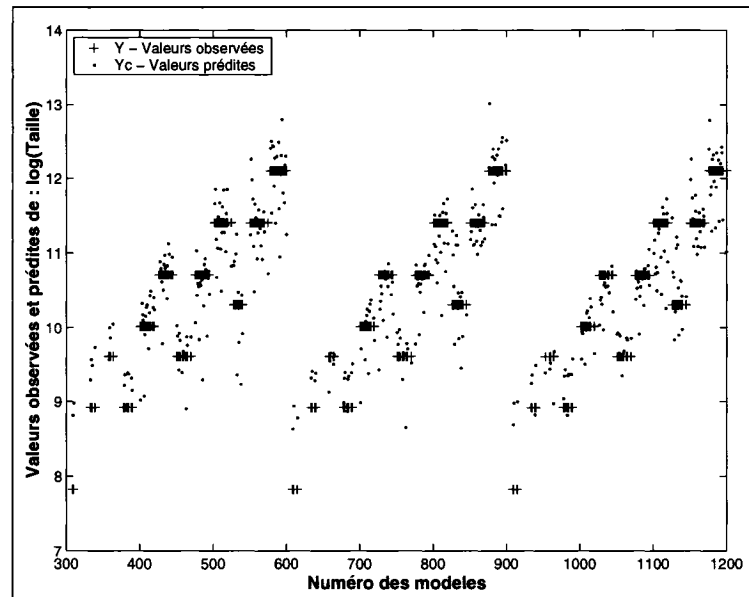
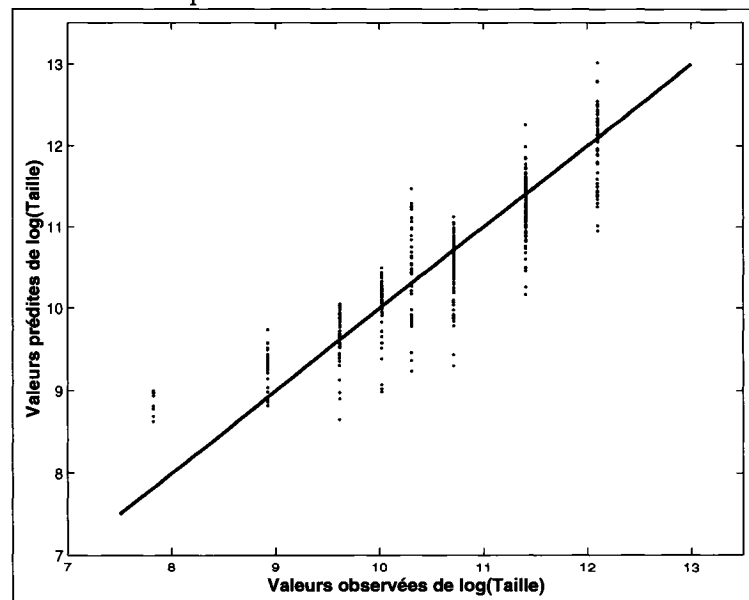


Figure B.16 : Résidus de la régression de la taille en fonction de différentes variables
(Classe 1 : $85^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la taille en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la taille en fonction de la valeur observée

Figure B.17 : Régression de la taille (Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)

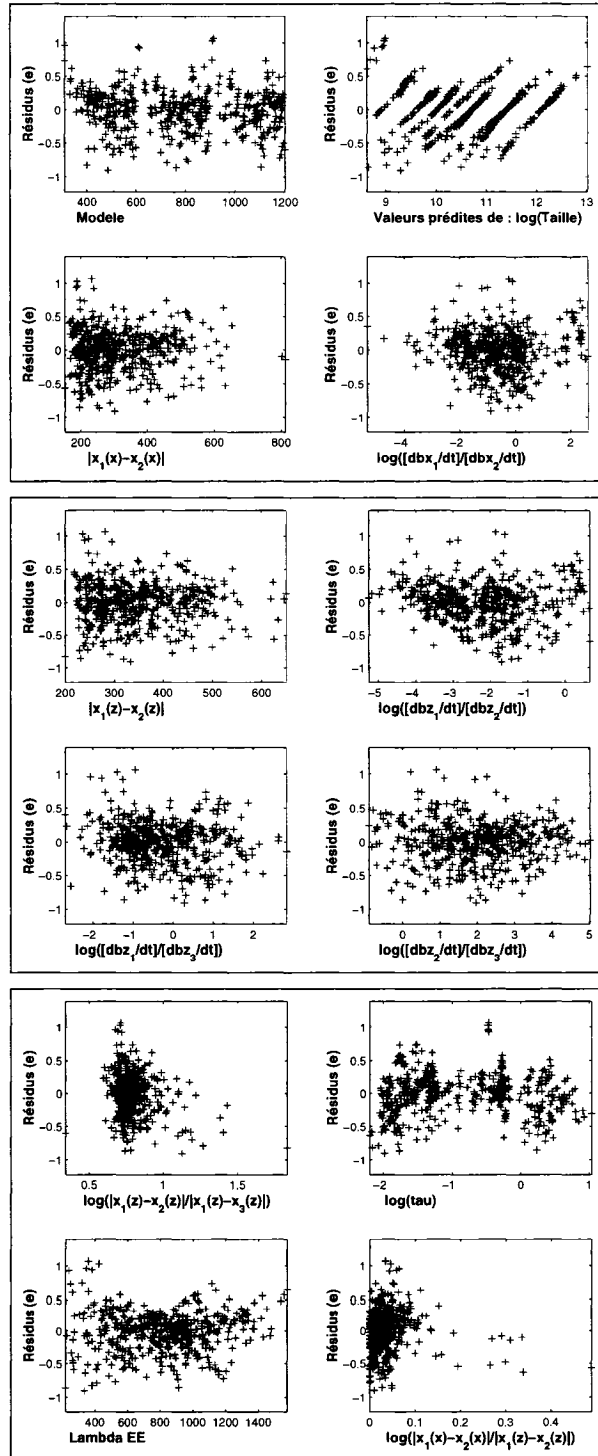
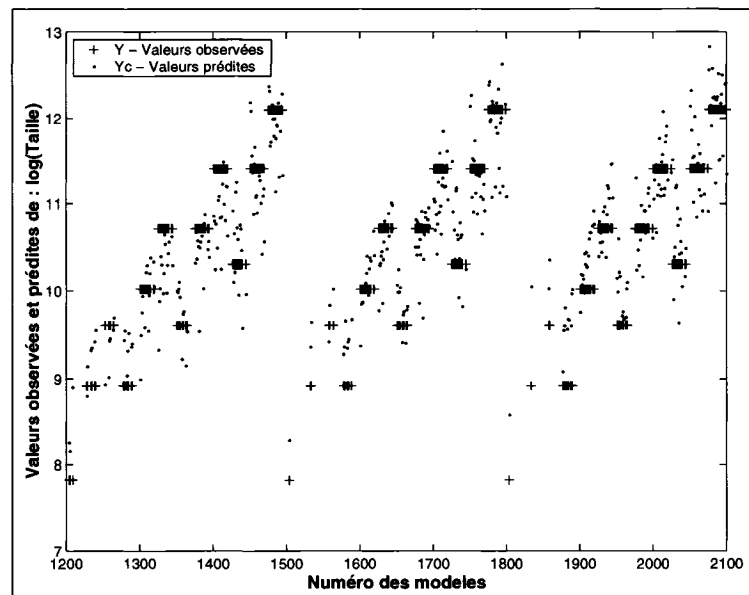
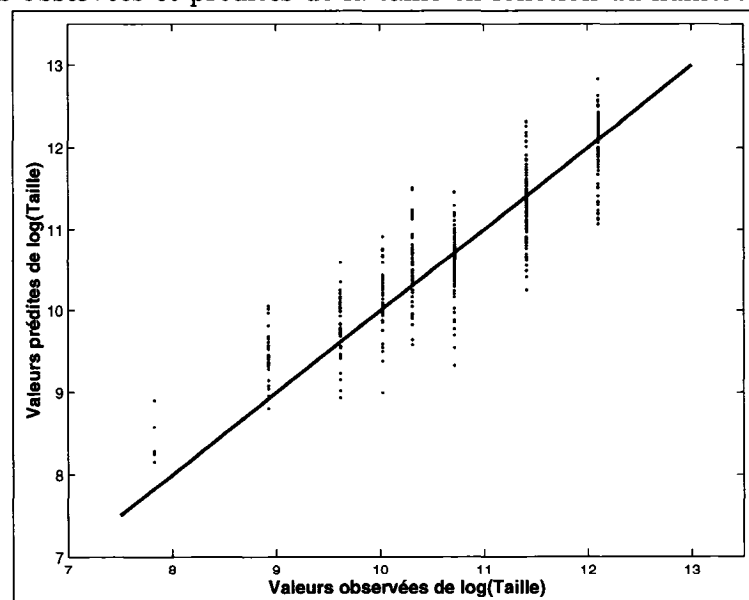


Figure B.18 : Résidus de la régression de la taille en fonction de différentes variables
(Classe 2 : $\theta < 85^\circ$)



a) Valeurs observées et prédites de la taille en fonction du numéro de modèle



b) Valeurs prédites de la taille en fonction de la valeur observée
Figure B.19 : Régression de la taille (Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

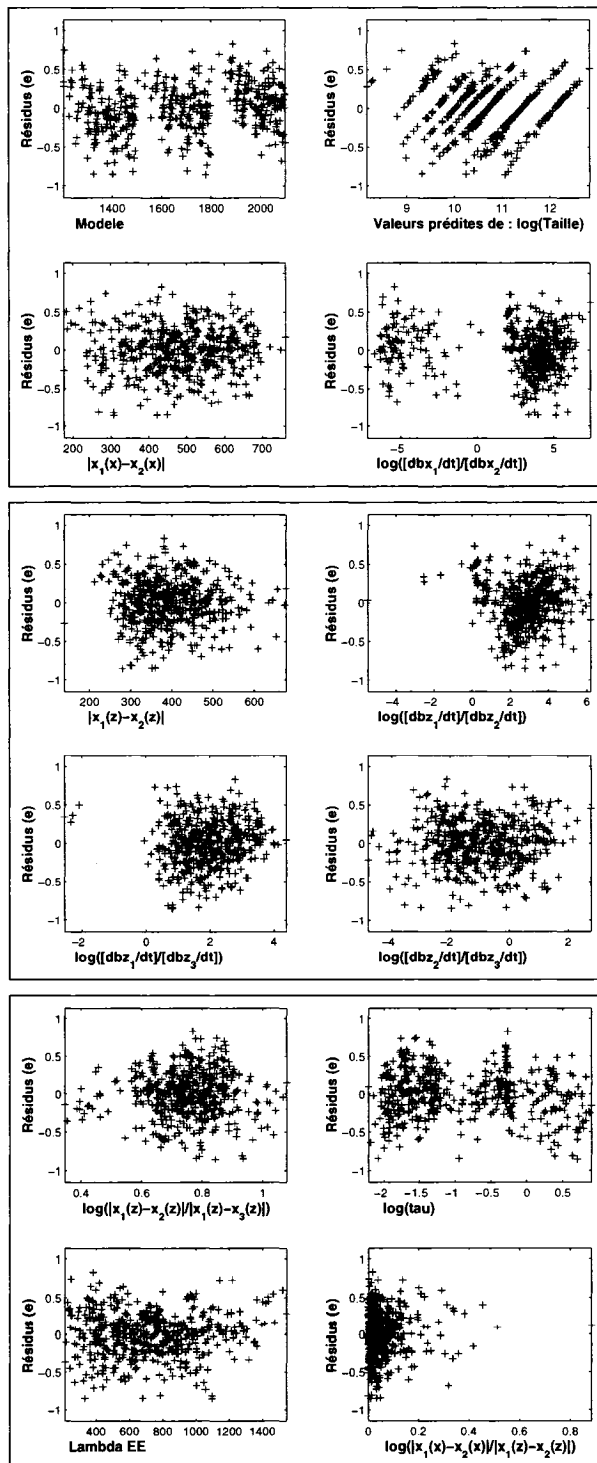


Figure B.20 : Résidus de la régression de la taille en fonction de différentes variables
(Classe 3 : $\theta > 95^\circ$)

Annexe C

Tests du système de classification

C.1 Modèles tests du système de classification

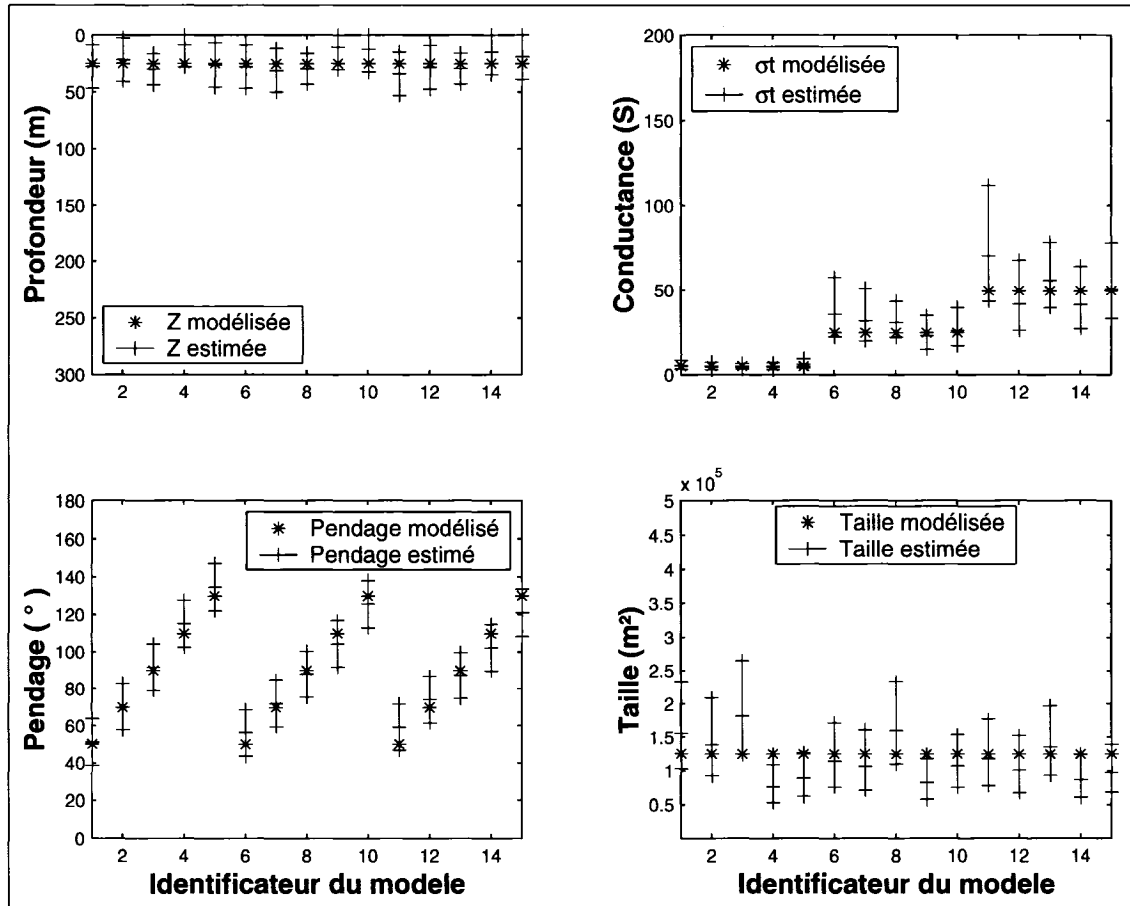


Figure C.1 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$,
 $z = 25m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

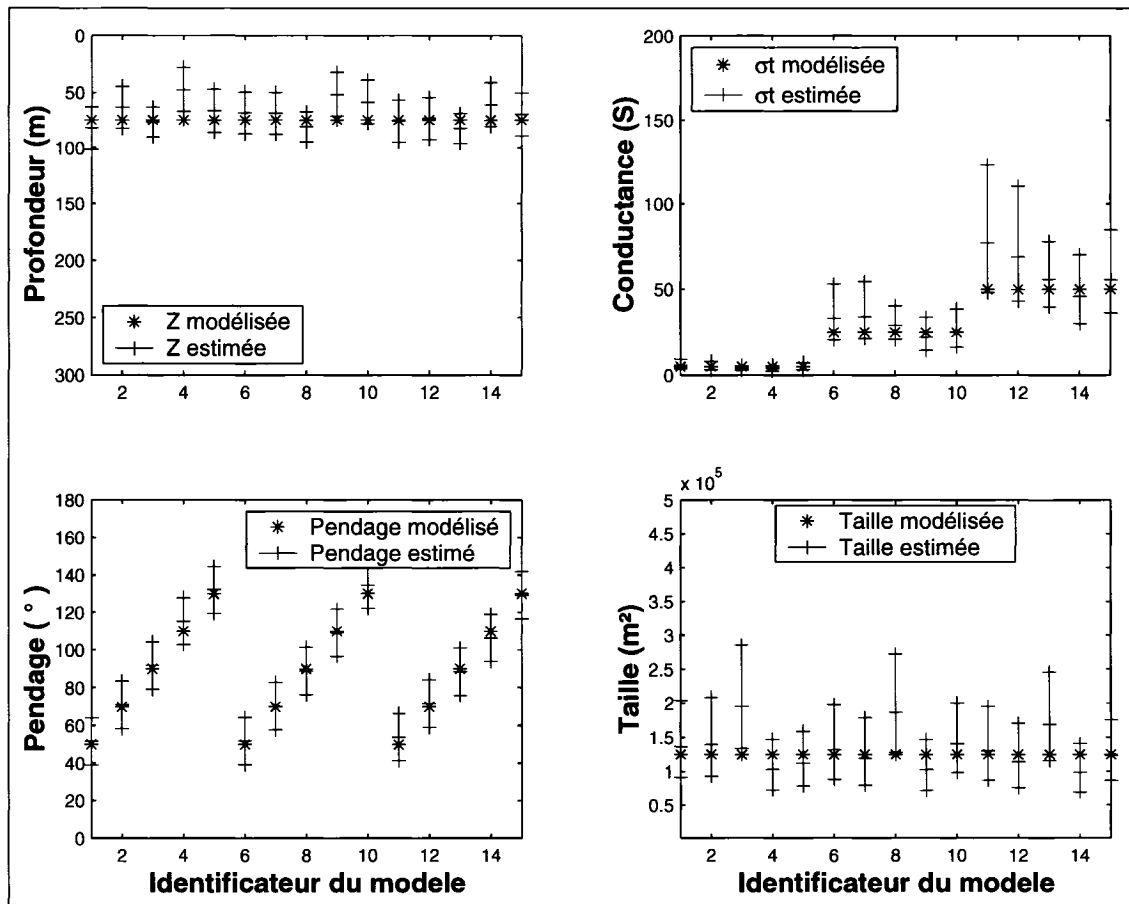


Figure C.2 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$,
 $z = 75m$, $\sigma_t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

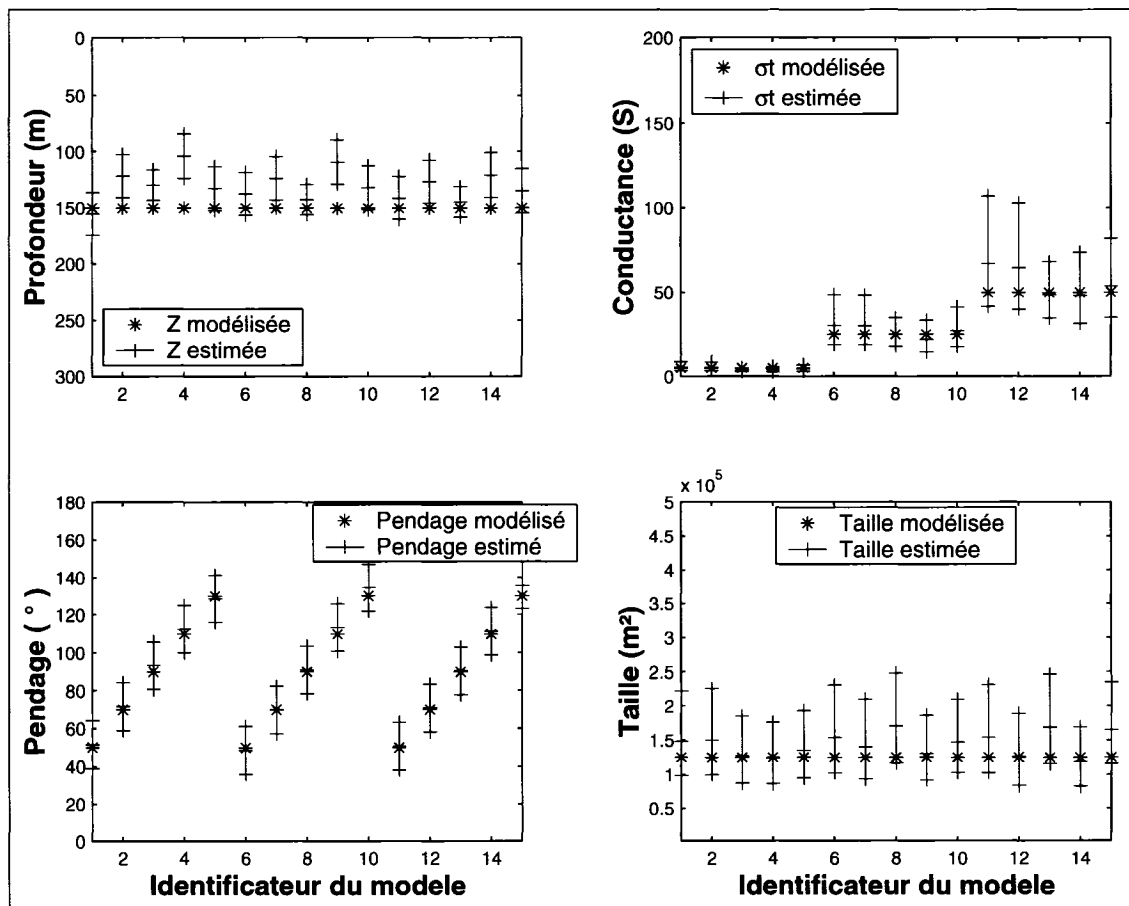


Figure C.3 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$,
 $z = 150m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

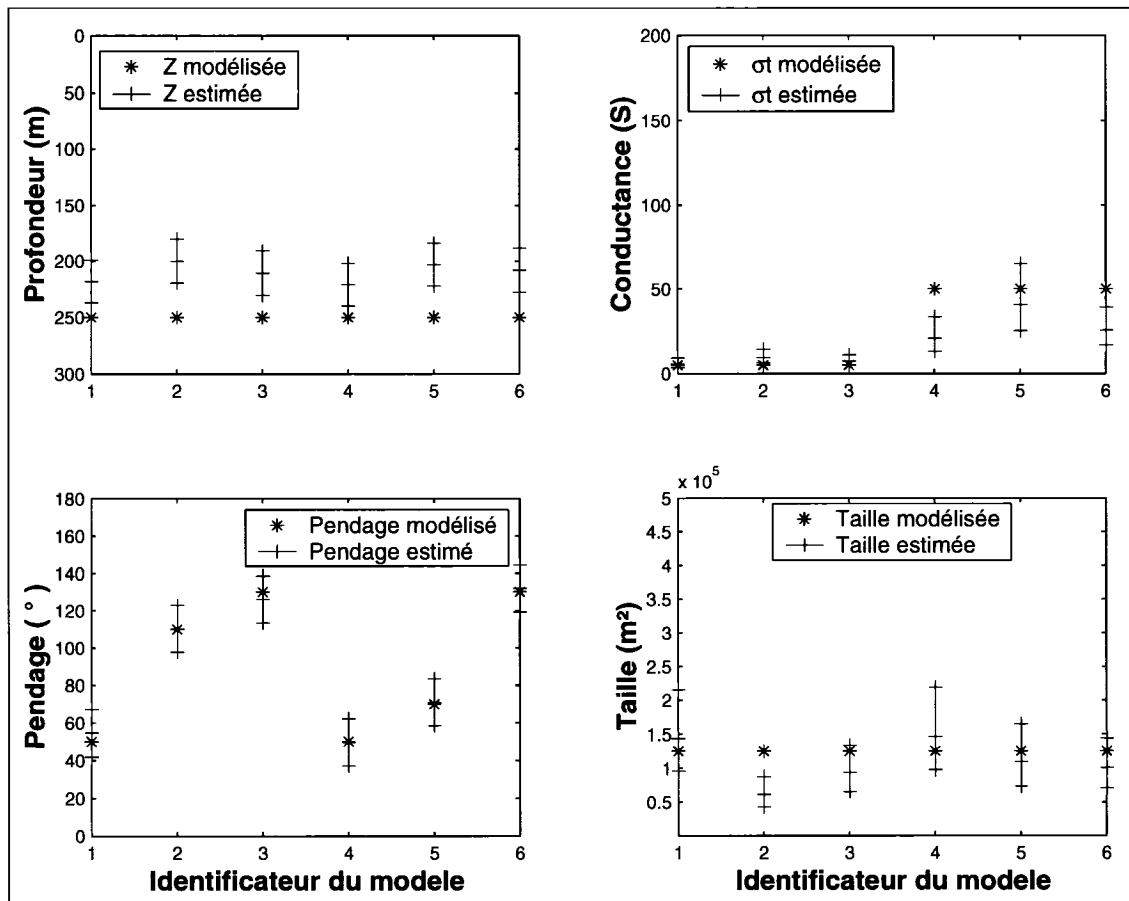


Figure C.4 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$
 $z = 250m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

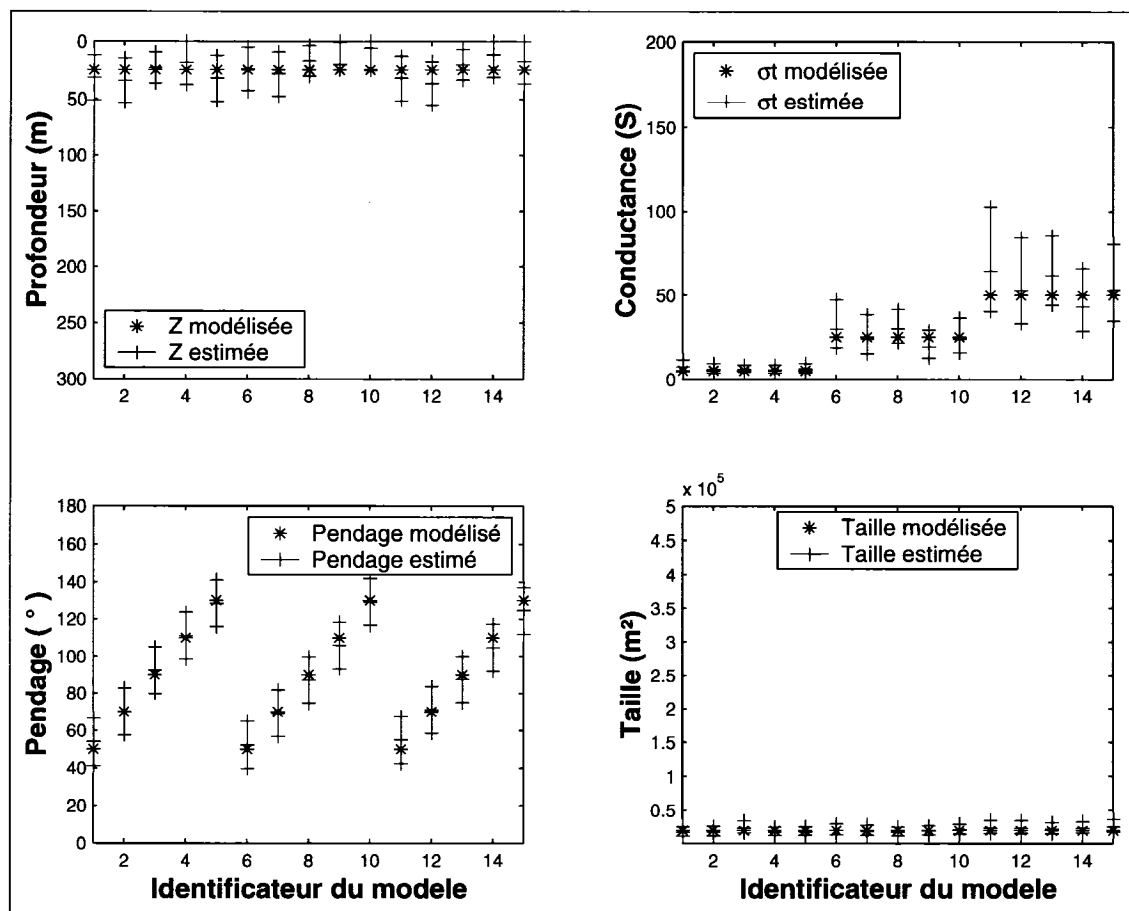


Figure C.5 : Estimation des paramètres pour les modèles $200 \times 100m^2$, $z = 25m$, $\sigma_t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

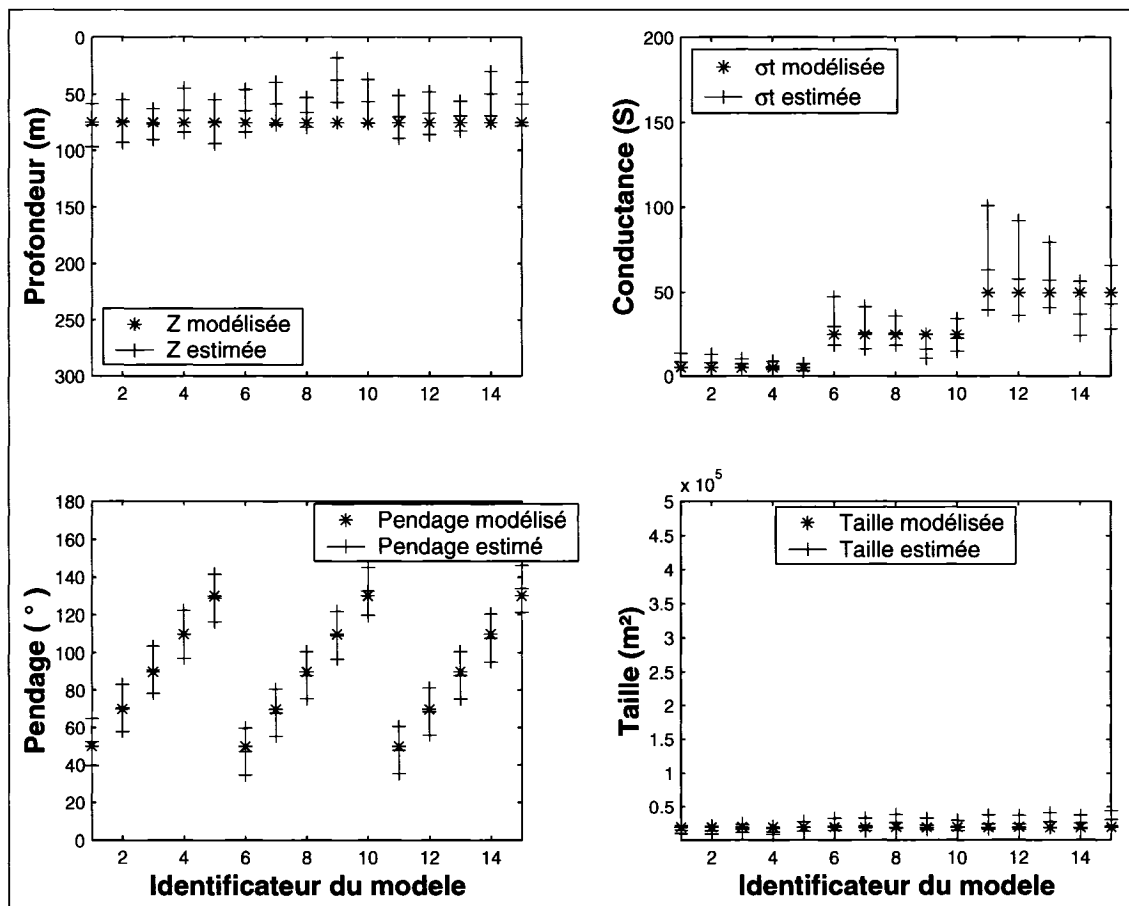


Figure C.6 : Estimation des paramètres pour les modèles $200 \times 100m^2$, $z = 75m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

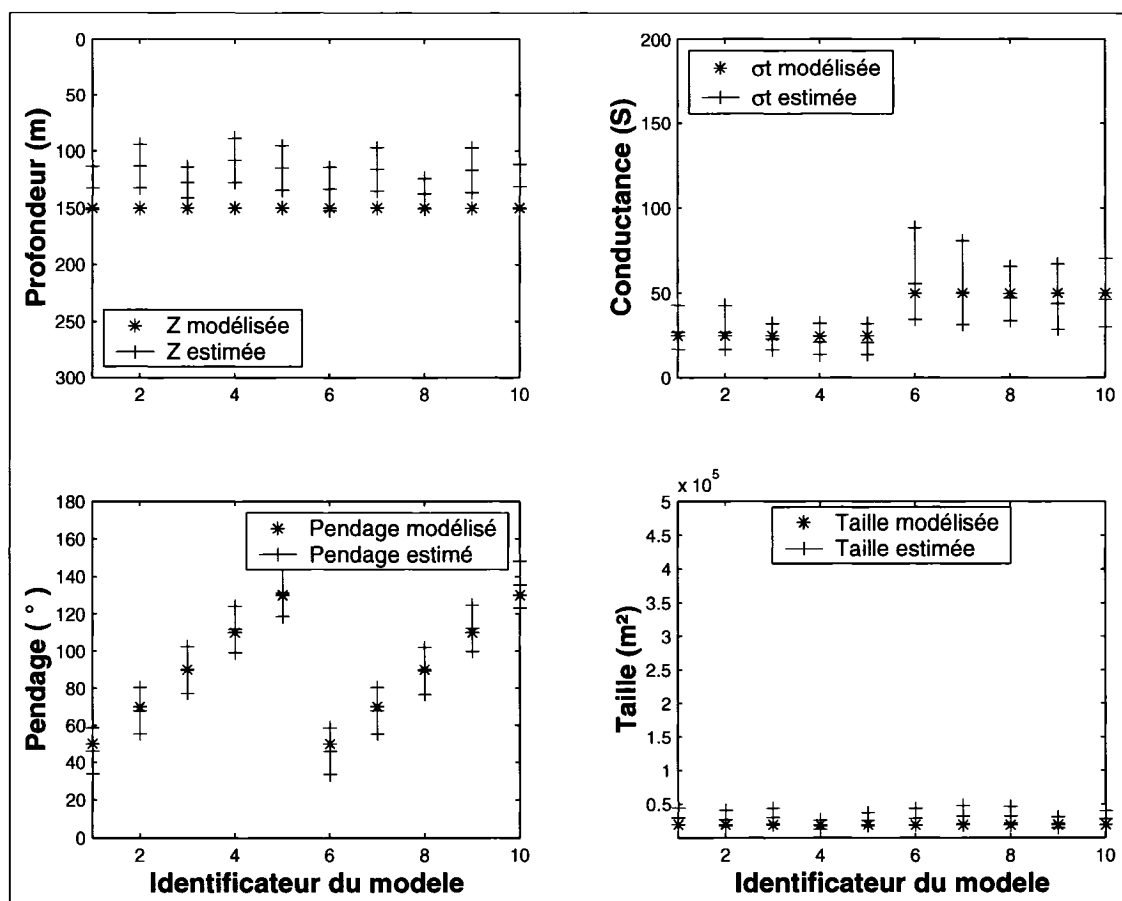


Figure C.7 : Estimation des paramètres pour les modèles $200 \times 100m^2$, $z = 150m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

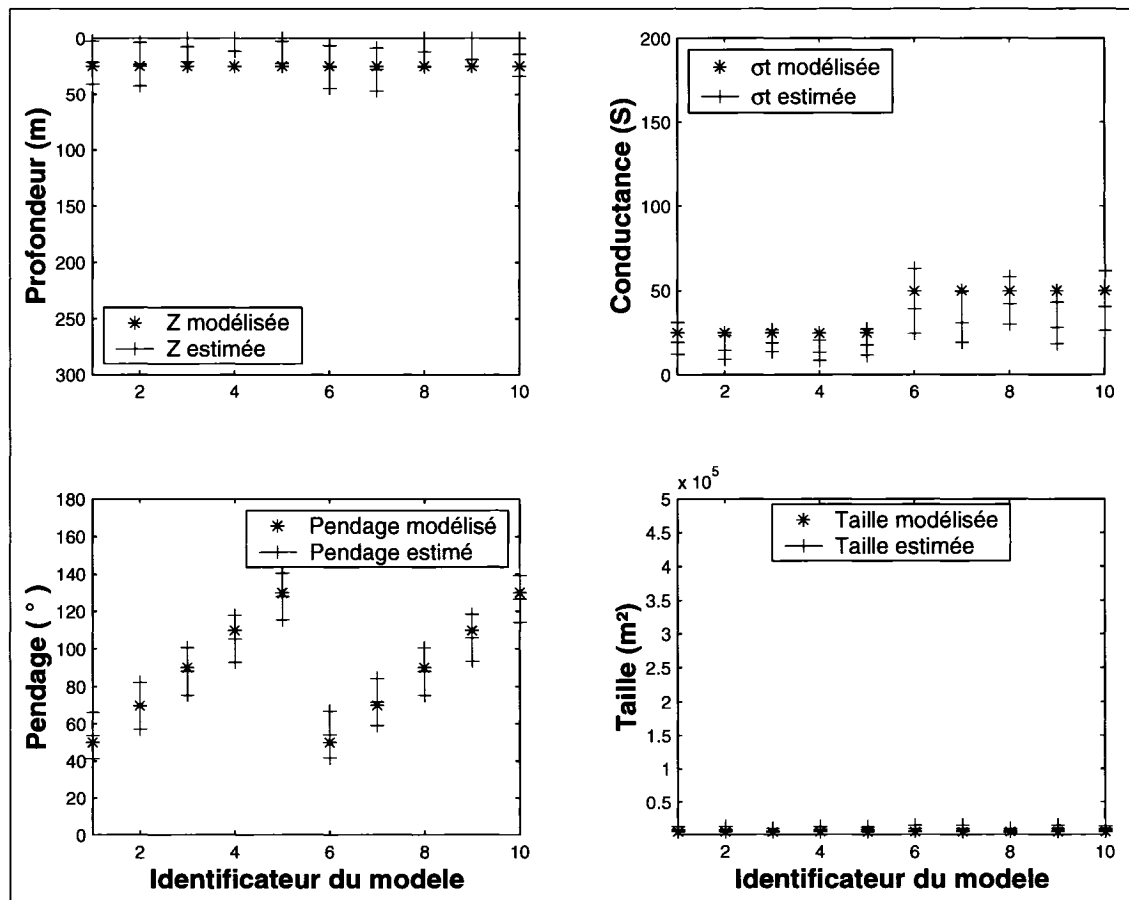


Figure C.8 : Estimation des paramètres pour les modèles $100 \times 50m^2$, $z = 25m$, $\sigma_t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

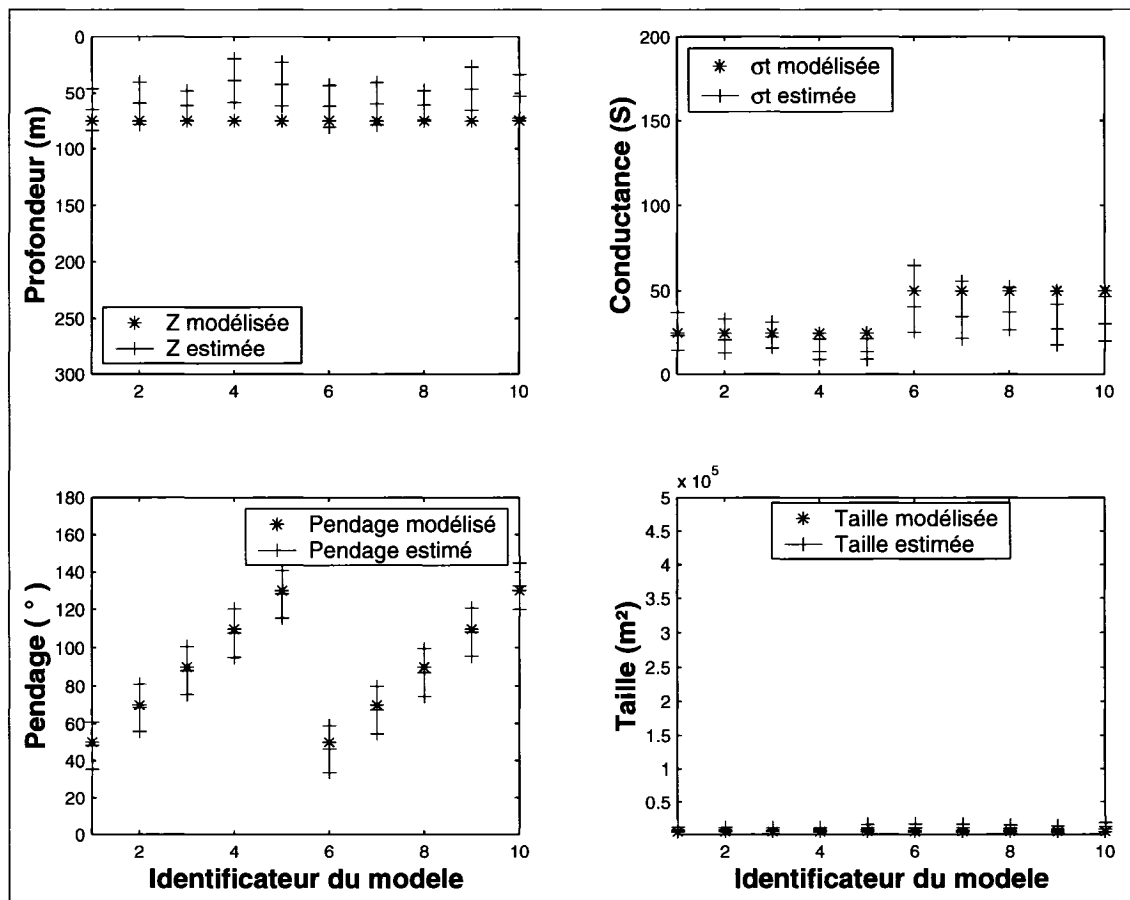


Figure C.9 : Estimation des paramètres pour les modèles $100 \times 50m^2$, $z = 75m$, $\sigma t = 5 - 25 - 50S$ et $\theta = 50^\circ - 70^\circ - 90^\circ - 110^\circ - 130^\circ$

C.2 Modèles tests des limites du système de classification

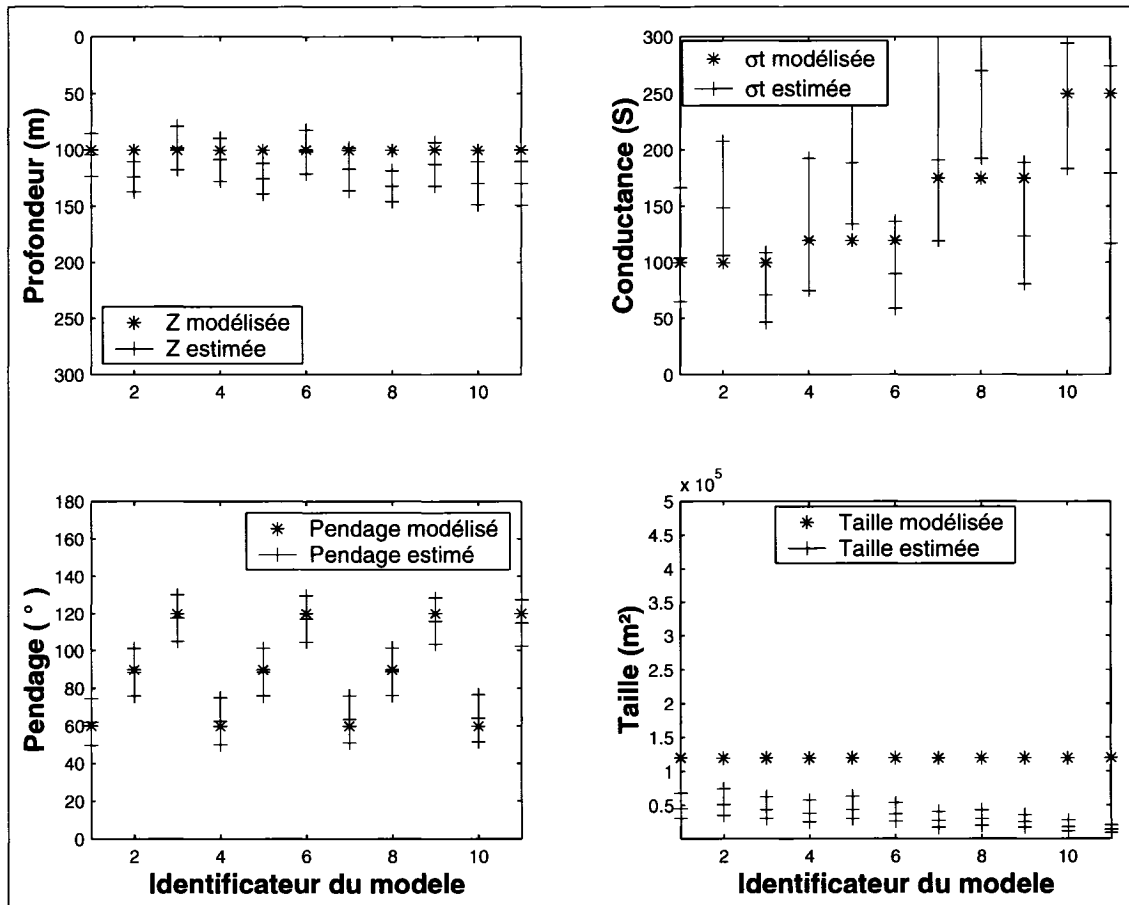


Figure C.10 : Estimation des paramètres pour les modèles 400 x 300m²,
 $z = 100m$, $\sigma t = 100 - 120 - 175 - 250S$ et $\theta = 60^\circ - 90^\circ - 120^\circ$

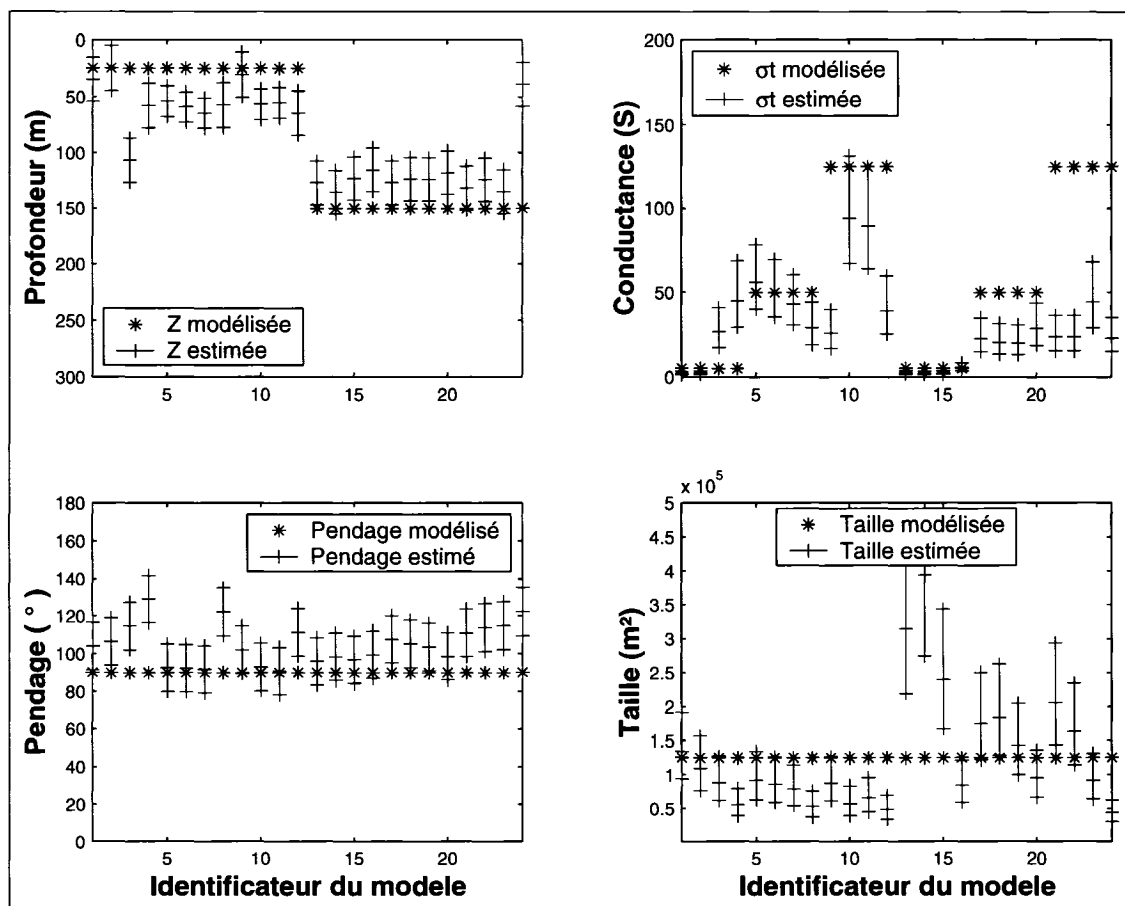


Figure C.11 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$, épaisseurs = 5 – 20 – 50 – 100m, $z = 25 - 150m$, $\sigma_t = 5 - 50 - 125S$ et $\theta = 90^\circ$

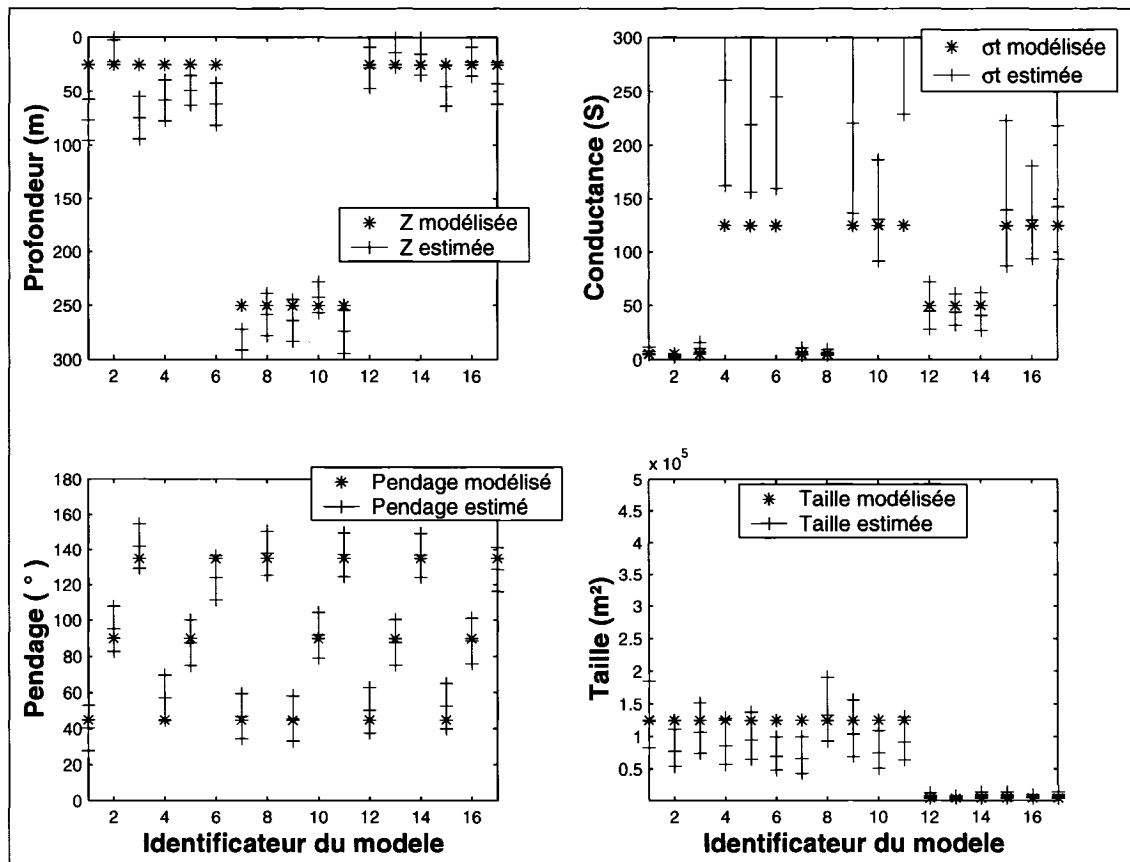


Figure C.12 : Estimation des paramètres pour les modèles 500 x 250m² et 100 x 50m², $z = 25 - 250m$, $\sigma t = 5 - 50 - 125S$ et $\theta = 45^\circ - 90^\circ - 135^\circ$, Fréquence d'émission = 30Hz.

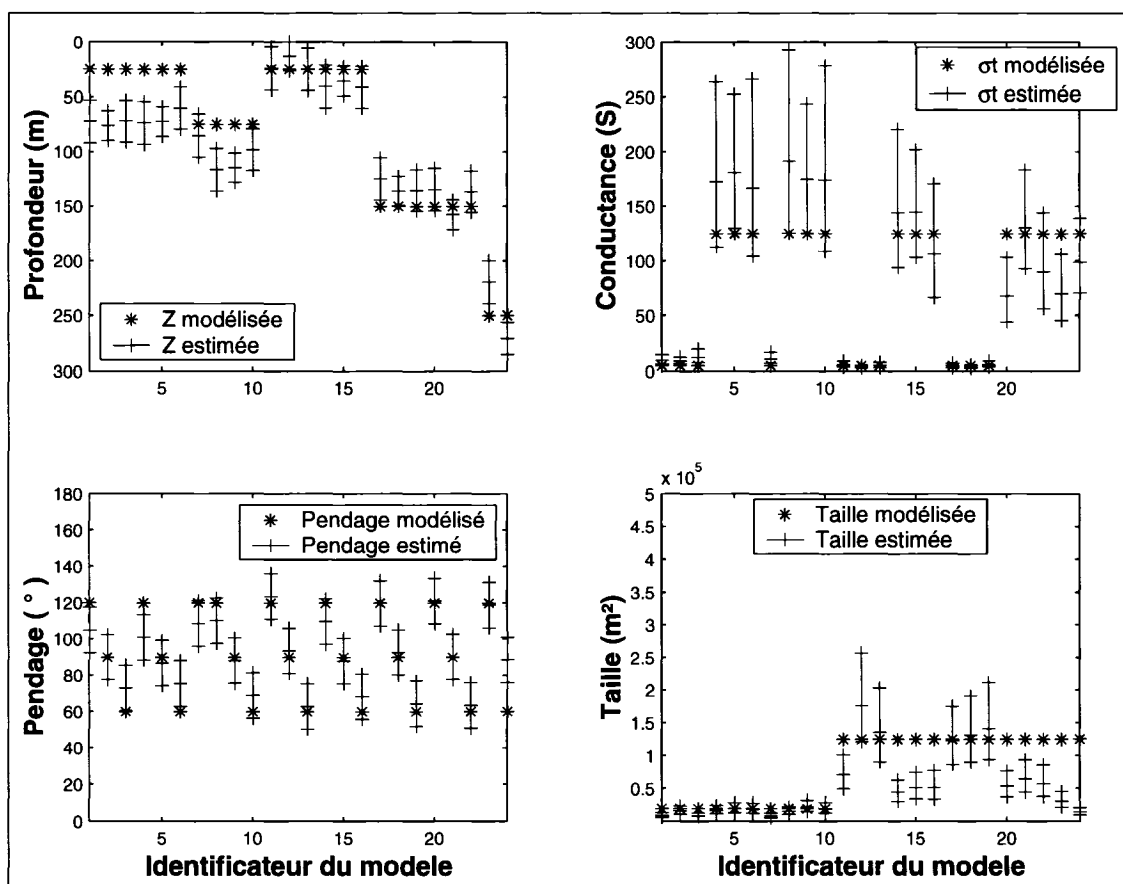


Figure C.13 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$ et $200 \times 100m^2$, $z = 25 - 75 - 150 - 250m$, $\sigma t = 5 - 125S$ et $\theta = 60^{\circ} - 90^{\circ} - 120^{\circ}$, Ligne de vol 2.

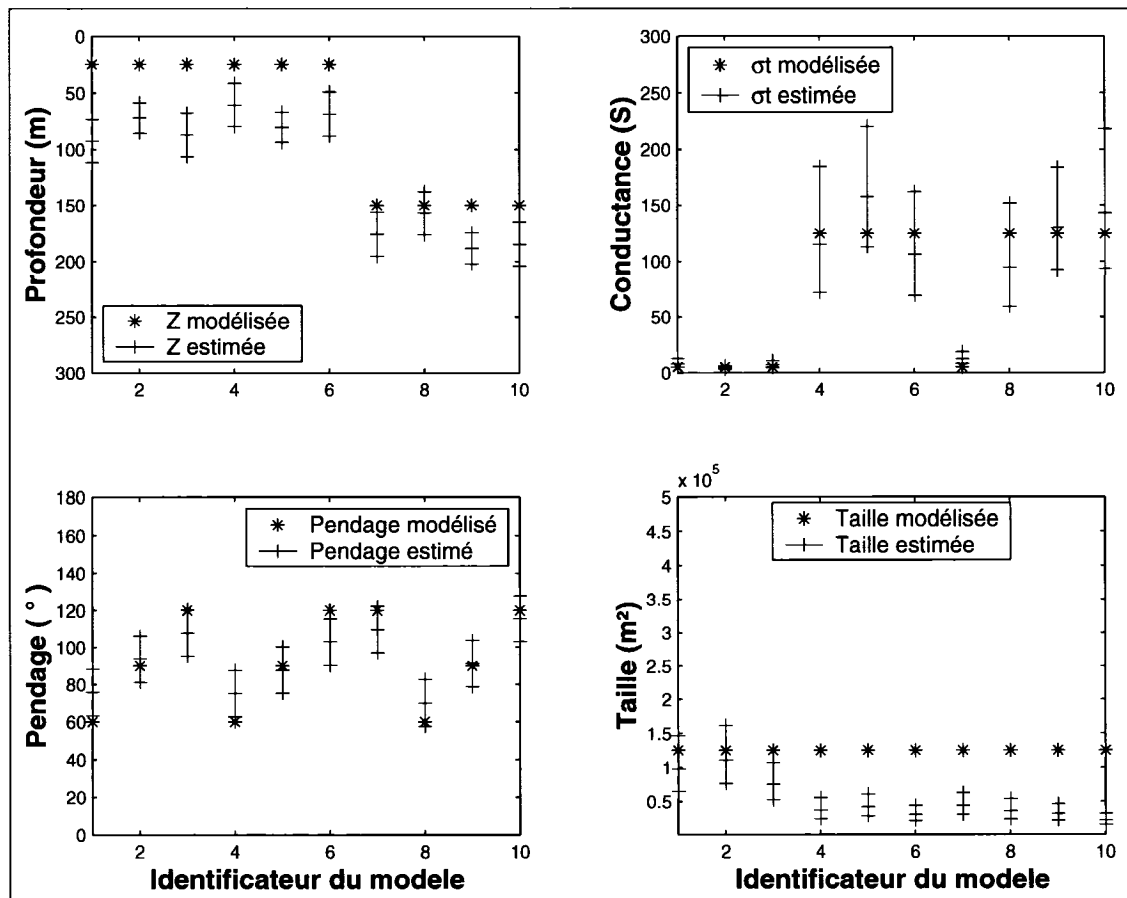


Figure C.14 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$ et $200 \times 100m^2$, $z = 25 - 75 - 150 - 250m$, $\sigma t = 5 - 125S$ et $\theta = 60^\circ - 90^\circ - 120^\circ$, Ligne de vol 3.

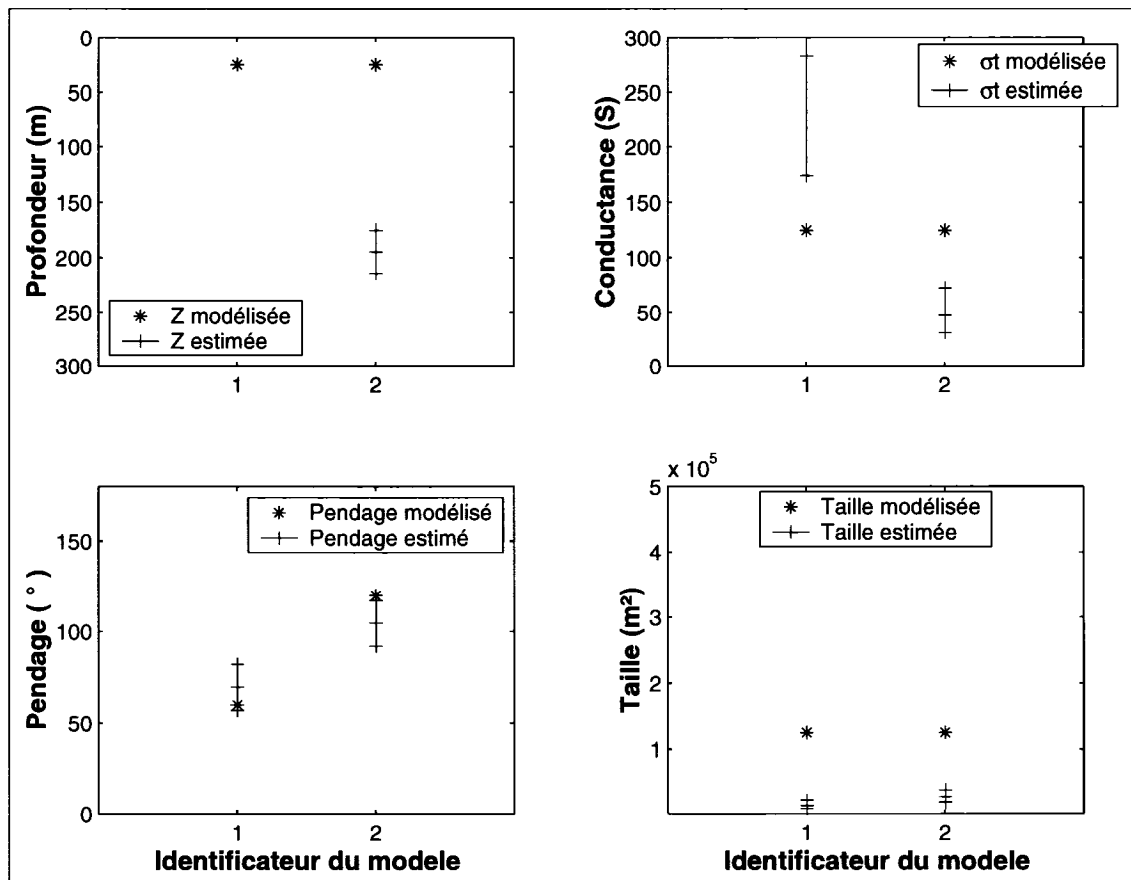


Figure C.15 : Estimation des paramètres pour les modèles $500 \times 250m^2$ et $200 \times 100m^2$, $z = 25 - 75 - 150 - 250m$, $\sigma t = 5 - 125S$ et $\theta = 60^\circ - 90^\circ - 120^\circ$, Ligne de vol 4.



Un cédérom accompagne ce mémoire de maîtrise

**Toute personne intéressée à se le procurer doit
contacter :**

École Polytechnique de Montréal

Service du prêt entre bibliothèques

B.P. 6079, Succursale Centre-Ville

Montréal, Québec H3C 3A7

Canada

Tél. : (514) 340-4846

Télécopieur : (514) 340-4026