

Développement d'un système émetteur – récepteur à géométrie fixe pour levés géophysiques à impulsion électromagnétique

Jean-Christophe Ricard

Thèse soumise à la
Faculté des études supérieures et postdoctorales
dans le cadre des exigences
du programme de Maîtrise en génie électrique et génie informatique

Institut de génie électrique et de génie informatique d'Ottawa-Carleton
Faculté de génie
Université d'Ottawa

© Jean-Christophe Ricard, Ottawa, Canada, 2013

Résumé

La méthode de levé géophysique à impulsion électromagnétique dans le domaine du temps (TDEM - Time-domain Electromagnetics) est couramment utilisée afin de détecter et caractériser la résistivité des couches du sol en fonction de la profondeur. Deux types de systèmes sont fréquemment utilisés dans le cadre de prospection et exploration minérale, soit les systèmes de surface et les systèmes aéroportés, ayant des caractéristiques et objectifs différents. Afin de caractériser les couches peu profondes et d'obtenir une résolution spatiale supérieure, il est préférable d'utiliser des systèmes de surface.

Dans le cadre de cette thèse, un système émetteur – récepteur à géométrie fixe porté par deux opérateurs est développé et utilisé afin de déterminer les caractéristiques électriques de cibles naturelles et de cibles culturelles (dus à l'activité humaine). Ce système propose l'avantage d'avoir une résolution spatiale très élevée puisqu'il est opéré près du sol, cependant les vibrations et changements d'orientation causés par son déplacement créent des faibles déformations au niveau de la géométrie émetteur – récepteur qui influencent la qualité des données acquises. Il est possible de remédier à ce problème en modifiant la structure du système ou en caractérisant les vibrations à l'aide de capteurs supplémentaires installés sur la plateforme. Une méthode de traitement du signal numérique comportant un filtre adaptatif est décrite dans cette thèse et est utilisée afin de corriger les signaux lors de prises de mesures sur le terrain. Les recherches ont démontré qu'il est possible d'améliorer la qualité des données de levés avec la méthode de traitement numérique présentée.

Abstract

The time-domain electromagnetics (TDEM) geophysical survey method is frequently used in order to characterize the resistivity of the layers of the ground as a function of depth. In the case of mineral exploration and prospection, TDEM systems are most often operated either on the surface or airborne. Both methods have different characteristics and objectives. In order to characterize the subsurface layers and to have a high spatial resolution, it is better to use systems operated on the surface.

In this thesis, a fixed geometry emitter – receiver system carried by two operators is developed and used in order to determine the electrical characteristics of natural targets and cultural targets (caused by human activity). This system has a very high spatial resolution since it is operated close to the ground, however, vibrations and changes in its orientation that are due to its operation create subtle deformations in the emitter – receiver geometry, which in turn influence the quality of the data acquired during the survey. It is possible to address this problem by modifying the structure of the supporting platform, or by characterizing the vibrations using different measuring instruments installed on the platform. A digital signal processing method using an adaptive filter is described in this thesis and is used in order to correct the signal acquired on a survey. The research has showed that it is possible to improve the survey data quality using the digital signal processing method presented.

Remerciements

Je tiens à remercier Martin Bouchard, mon directeur de thèse pour son dévouement à travers les années et pour sa patience envers ma conciliation travail – études qui n’a pas toujours été facile.

Merci à Marc Boivin, pour son soutien et ses connaissances en géophysique et géologie qui m’ont permis de passer d’idées à la réalité, grâce à nos nombreuses heures passées au téléphone. Un remerciement spécial à Frederick Carle qui a contribué de nombreuses heures au laboratoire et sur le terrain.

Le soutien de SOQUEM (Pierre Bertrand, Yvon Trudeau, Laury Schmitt) ainsi que leur partenaire Pan American Silver a été crucial afin d’analyser les méthodes de traitement de données géophysiques, puisque SOQUEM a permis l’acquisition de données sur des propriétés minières et a accepté que celles-ci soient présentées dans un cadre de recherche.

Finalement, I wish to thank my partner Kerrie ainsi que ma mère et mon père pour leur soutien moral. Je n’aurais pas pu passer au travers sans vous!

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Remerciements	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	xiv
Liste des acronymes.....	xv
Chapitre 1 Introduction.....	1
1.1 Survol.....	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs.....	3
1.4 Plan de la thèse	4
Chapitre 2 Revue de littérature.....	5
2.1 Contexte historique.....	5
2.2 Développements récents et contributions aux systèmes TDEM.....	8
2.3 Autres applications de la méthode TDEM	9

Chapitre 3 Développement du système de levé TDEM.....	12
3.1 La méthode TDEM.....	12
3.2 Caractéristiques du système développé.....	14
3.3 Émetteur TDEM.....	17
3.4 Récepteurs.....	19
3.4.1 Description des récepteurs TDEM	19
3.4.2 Méthode et système utilisés pour la réponse en fréquence des récepteurs	21
3.4.3 Réponse en fréquence des récepteurs lorsque la surface effective est modifiée.....	23
3.4.4 Réponse en fréquence des récepteurs lorsque le diamètre du fil est modifié	24
3.4.5 Réponse en fréquence des récepteurs en présence d'une résistance en parallèle	25
3.5 Acquisition et enregistrement des données géophysiques	26
3.6 Appareils de mesure périphériques installés sur la plateforme	27
3.7 Cibles utilisées pour caractériser le système	28
Chapitre 4 Traitement des données géophysiques de base	30
4.1 Moyenne et filtrage des impulsions	30
4.2 Filtrage des impulsions	32
4.3 Analyse des données par canaux et filtrage des canaux.....	33
4.4 Présentation des canaux.....	36
4.4.1 Canaux superposés sans remise à zéro	36
4.4.2 Canaux superposés avec remise à zéro	39
4.4.3 Canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles	41

4.4.4 Canaux superposés à l'imagerie satellite.....	43
Chapitre 5 Améliorations au système : traitement et mécanique.....	44
5.1 Remplacement de la plateforme de support en bois contre-plaqué par une plateforme construite de matériaux composites.....	44
5.2 Filtrage adaptatif.....	47
5.3 Corrélation croisée de récepteurs dans des positions longitudinales différentes.....	54
Chapitre 6 Levés en environnement de laboratoire et sur le terrain	60
6.1 Méthodologie de prise de mesures	60
6.2 Réponse aux cibles tests	63
6.3 Levé du Lac Pipe.....	68
6.4 Levé sur la propriété Copper	73
6.5 Levé sur la propriété Dussault	77
Chapitre 7 Conclusions et recommandations	82
7.1 Conclusions	82
7.2 Contributions	83
7.3 Travaux subséquents.....	83
Bibliographie	85

Liste des figures

Figure 3.1 Diagramme d'un système EM par induction typique, comprenant un émetteur et un capteur, au-dessus d'une cible culturelle ou naturelle à l'étude.....	13
Figure 3.2 Géométrie de l'émetteur et des récepteurs	15
Figure 3.3 Diagramme du système TDEM développé	16
Figure 3.4 Forme d'onde du courant émis par l'émetteur, pour deux cycles complets d'impulsions (à gauche) et agrandissement d'un demi-cycle d'impulsion (à droite).....	18
Figure 3.5 Forme d'onde du signal reçu par un capteur orienté dans le plan z, pour deux cycles complets d'impulsions (à gauche) et agrandissement d'un demi-cycle d'impulsion (à droite)..	19
Figure 3.6 Système de prise de mesure de la réponse en fréquence des capteurs.....	22
Figure 3.7 Appareil de laboratoire utilisé pour effectuer la prise de mesure de la réponse en fréquence des capteurs.....	22
Figure 3.8 Réponse en fréquence (gain) des capteurs R1, R2, R3 et R4.....	23
Figure 3.9 Réponse en fréquence (gain) des capteurs R1 et R5	25
Figure 3.10 Réponse en fréquence des capteurs de surface effective de 6 m ² , 12 m ² , 24 m ² et 40 m ² lorsque reliés à une entrée à haute impédance	26

Figure 4.1 Demi-cycle positif $c_i^+(t)$ (à gauche), demi-cycle négatif $c_i^-(t)$ et résultat de moyenne des demi-cycles $s_i(t)$	31
Figure 4.2 Demi-cycle positif $c_i^+(t)$ (à gauche), demi-cycle négatif $c_i^-(t)$ et résultat de moyenne des demi-cycles $s_i(t)$ lorsqu'un fort signal parasite à 60 Hz est présent.....	32
Figure 4.3 Moyenne des demi-cycles $s_i(t)$ en échelles horizontale et verticales logarithmiques (à gauche), moyenne des demi-cycles avec filtrage médian (au centre) et moyenne des demi-cycles avec filtrage médian et passe-bas	33
Figure 4.4 Échantillonnage de la courbe de décroissance du signal reçu par un capteur sous la forme de différents canaux	34
Figure 4.5 Présentation des profils superposés sans remise à zéro avec échelle verticale linéaire, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes.....	37
Figure 4.6 Présentation des profils superposés sans remise à zéro avec échelle verticale logarithmique, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes.....	38
Figure 4.7 Présentation des profils superposés avec remise à zéro avec échelle verticale linéaire, remise à zéro au-dessus d'un endroit résistif, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes	39
Figure 4.8 Présentation des profils superposés avec remise à zéro avec échelle verticale logarithmique, remise à zéro au-dessus d'un endroit résistif, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes	40

Figure 4.9 Canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes.....	41
Figure 4.10 Amplitudes représentées sur l'échelle de couleur selon les canaux, pour la méthode par canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles	42
Figure 5.1 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m ² , canal 30, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible.....	45
Figure 5.2 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m ² , canal 60, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible.....	46
Figure 5.3 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m ² , canal 90, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible.....	47
Figure 5.4 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés sans remise à zéro de récepteurs 40 m ² (à gauche) et de 12 m ² (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur – récepteur (à droite) lors de rotations de la plateforme de support.....	48
Figure 5.5 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés sans remise à zéro de récepteurs 40 m ² (à gauche) et de 12 m ² (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur – récepteur (à droite) lors d'une collision avec un obstacle dans l'axe longitudinal.	49
Figure 5.6 Filtre adaptatif en configuration de réduction de bruit adaptative (ANC)	50

Figure 5.7 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés avec remise à zéro d'un récepteur de 40 m ² sans filtre adaptatif (en haut), avec filtre adaptatif (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur – récepteur (en bas) lors d'un levé en forêt.....	53
Figure 5.8 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés avec remise à zéro de deux différents récepteurs 12 m ² placés à x=0.16m (en rouge, capteur avant) et x=-0.16m (en bleu, capteur arrière), lors de passages au-dessus de la cible PH à 30 cm (à gauche), au-dessus de la cible PH à 120 cm (au centre) et au-dessus d'une anomalie naturelle inconnue (à droite).....	55
Figure 5.9 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus de la cible PH à 30 cm (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière.....	57
Figure 5.10 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus de la cible PH à 120 cm (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière.....	58
Figure 5.11 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus d'une anomalie naturelle inconnue (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière	58
Figure 6.1 Transport du système au site de levé par véhicule tout terrain, camion ou motoneige	61
Figure 6.2 Décroissance complète observée par un récepteur de surface effective de 12 m ² , couvrant les canaux 50 à 105, lors du passage de la cible PH installée sous le système à différentes distances.....	64

Figure 6.3 Décroissance complète observée par un récepteur de surface effective de 40 m ² , couvrant les canaux 50 à 105, lors du passage de la cible PH installée sous le système à différentes distances	65
Figure 6.4 Décroissance complète théorique d'un récepteur formé d'une bobine de fil après la coupure du courant associée à un bon et mauvais conducteur, comme défini dans [Nabighian 1991].....	66
Figure 6.5 Canaux 60 à 90 superposés d'un capteur de 12 m ² avec remise à zéro du récepteur 12 m ² au-dessus des cibles tests choisies, enfouies dans le sol à des profondeurs différentes ..	67
Figure 6.6 Canaux 60 à 90 superposés d'un capteur de 12 m ² sans remise à zéro, levé Lac Pipe, aller (haut) et retour (bas).....	69
Figure 6.7 Canaux 60 à 90 d'un capteur de 12 m ² superposés sans remise à zéro, levé Lac Pipe, aller (haut) et retour (bas).....	69
Figure 6.8 Canaux 30 à 110 juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles, levé Lac Pipe (aller seulement), avec position des anomalies	70
Figure 6.9 Amplitudes représentées sur l'échelle de couleur selon les canaux, levé Lac Pipe (aller seulement).....	70
Figure 6.10 Canaux d'un récepteur de 12 m ² superposés à l'imagerie satellite, levé Lac Pipe, aller seulement, canaux 60 (haut, gauche), 75 (haut, droite), 90 (bas, gauche) et 105 (bas, droite) avec position des anomalies A, B et C.....	72
Figure 6.11 Décroissance complète de trois lectures sur le levé Copper (résistif, fausse anomalie créée par une rotation du système et anomalie naturelle).....	74

Figure 6.12 Canaux 60, 75, 90 et 105 du récepteur de surface effective 12 m ² superposés à l'imagerie satellite, L6N et L5N, sur la propriété Copper	76
Figure 6.13 Canaux 60, 75, 90 et 105 du récepteur de surface effective 12 m ² superposés à l'imagerie satellite, chemin forestier sur la propriété Dussault	78
Figure 6.14 Comparaison du levé FEM et TDEM, chemin forestier sur la propriété Dussault. FEM au fréquences 3 555 Hz, 1 777 Hz et 888 Hz, en phase (ligne continue) et en quadrature (ligne pointillée). TDEM acquis avec un capteur de surface efficace de 12 m ² , canaux 30 à 110 affichés.	80

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés du sol étudiées dans le cadre de la géophysique minière (modifié de [Allard 1999]).....	7
Tableau 3.1 Caractéristiques électriques des récepteurs.....	20
Tableau 3.2 Capacité parasite des récepteurs	24
Tableau 3.3 Appareils de mesure périphériques installés sur la plateforme.....	28
Tableau 3.4 Cibles utilisées pour caractériser le système.....	29
Tableau 4.1 Position des canaux après de l'impulsion, par rapport à la fin de l'impulsion	35

Liste des acronymes

Acronyme	Représentation	Traduction de l'auteur
ANC	Adaptive Noise Cancellation	Annulation de bruit adaptative
AWG	American Wire Gauge	Système américain de mesure de fil
DC	Direct Current	Courant continu
FDEM	Frequency-domain Electromagnetics	Électromagnétisme dans le domaine fréquentiel
FDHEM	Frequency-domain helicopter EM	EM par hélicoptère en fréquence
FEM	Frequency Electromagnetics	Électromagnétisme en fréquence
FPGA	Field Programmable Gate Array	Réseau pré-diffusé programmable par l'utilisateur
GPS	Global Positionning System	Système de positionnement global
HLEM	Horizontal Loop Electromagnetics	Électromagnétisme par boucles horizontales
IMU	Inertial Measurement Unit	Unité de mesures inertielles
KML	Keyhole Markup Language	Langage par balises
KMZ	Zipped KML File	Fichier KML compressé
LMS	Least Mean Squares	Moindres carrés
MEMS	Microelectromechanical systems	Systèmes micro-électromécanique
NLMS	Normalized Least Mean Squares	Moindres carrés normalisés
NMEA	National Marine Electronics Association	<i>Sans traduction</i>
PC	Personal Computer	Ordinateur personnel
PWM	Pulse Width Modulation	Modulation par largeur d'impulsion
RLC	Resistor, Inductor and Capacitor	Résistance, inductance et capacité
SPI	Serial Peripheral Interface	Interface périphérique série
TDEM	Time-domain Electromagnetics	Électromagnétisme dans le domaine temporel
TEM	Transient Electromagnetics	Électromagnétisme transitoire

UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter	Émetteur – récepteur asynchrone universel
USB	Universal Serial Bus	Bus série universel
UTM	Universal Transverse Mercator	Mercator transverse universel
UXO	Unexploded Ordnances	Obus non-explosés
WGS	World Geodesic System	Système géodésique mondial

Chapitre 1 Introduction

1.1 Survol

Dans le cadre de cette thèse, un système de levé géophysique de surface TDEM est développé, amélioré et utilisé dans le but d'analyser et de quantifier la conductivité des couches peu profondes du sol. Ce système est principalement composé d'un émetteur électromagnétique contrôlé par ordinateur et de plusieurs capteurs reliés à une carte d'acquisition numérique synchronisée avec l'ordinateur de contrôle, ainsi que d'appareils périphériques mesurant différents paramètres du système lors d'un levé.

Depuis 2008, un groupe dont je fais partie a travaillé à développer un tel système, basé sur l'expérience acquise à partir d'opération et de fabrication de systèmes de levés héliportés. C'est en 2011 que le premier prototype à échelle réelle a vu le jour et plusieurs levés tests ont été effectués en 2012 à Gatineau, Québec et à Fort-Coulonge, Québec. Les données de levés d'essai acquises lors de l'hiver et du printemps 2012 avaient un niveau de bruit élevé et les sondages étaient peu répétables, puisqu'il reste encore à ce moment de nombreux irritants techniques, tels qu'une plateforme de support de l'émetteur fait de bois contre-plaqué, lourde et déformable dû à l'humidité, ainsi qu'un manque de capteurs périphériques mesurant, par exemple, l'orientation du système et la température des capteurs et de l'émetteur. Il est toutefois possible d'opérer le système dans un environnement de laboratoire, afin d'augmenter la robustesse du logiciel d'acquisition et de mettre à l'épreuve l'émetteur, qui tend à chauffer. En novembre 2012, le premier levé commercial fut effectué

pour le compte de SOQUEM Inc., sur la propriété Copper près de la ville de Chibougamau, Québec, sur une période de 5 jours. L'objectif de ce levé visait la détection et la définition de conducteurs EM de type HLEM (à partir de prises de mesures avec l'instrument de levé géophysique MaxMin) précédemment identifiés par SOQUEM lors de levés géophysiques historiques. Le système utilisé lors de ce levé comportait une plateforme fait de matériaux composites légère et très robuste, sur laquelle de nombreux instruments de mesure étaient installés.

Tout au long du développement et des levés tests, plus de 100 heures d'enregistrement de données furent acquises et traitées. Cette thèse de recherche, en plus de décrire le fonctionnement du système TDEM et le traitement des données acquises, présente aussi des extraits de ces données, soit dans un environnement de laboratoire ou de terrain, à différentes phases du développement du système, et vise à résoudre plusieurs problèmes techniques issus de l'opération du système et qui peuvent être résolus par des méthodes de traitement du signal numérique.

1.2 Problématique

Le système TDEM à l'étude a joui d'un effort constant de recherche et développement au niveau logiciel et matériel, mais souffre encore d'irritants précis en ce qui concerne le traitement et la présentation des données acquises. Une routine de traitement du signal numérique a été mise en place afin d'analyser, filtrer et combiner les signaux des différents capteurs dans le but de présenter les résultats sous forme de profils sur une carte géographique. Comme le système est opéré à travers les forêts denses caractéristiques de l'environnement du sud du Québec et de l'Ontario, comprenant beaucoup d'arbres rapprochés, il est primordial de comprendre et d'analyser correctement les effets néfastes qui sont générés lorsque le système subi des collisions avec des arbres ou est incliné pour

passer entre des obstacles de façon temporaire. Les principaux enjeux de recherche et développement concernent le design, l'implémentation et l'évaluation de différentes méthodes de traitement du signal numérique afin d'obtenir des résultats qui proposent un niveau de bruit bas, tout en conservant la validité du signal au niveau géophysique, ainsi que la compréhension et l'analyse de sondages électromagnétiques dont les résultats proviennent de capteurs ayant des caractéristiques physiques et électriques différentes.

1.3 Objectifs

Le principal objectif de cette thèse de recherche est l'observation et l'analyse de données acquises lors de levés avec un système TDEM de surface, ainsi qu'une description de ce système et des principales étapes de son récent développement, en plus du développement de méthodes de traitement du signal numérique permettant l'amélioration de la qualité des données en éliminant des signaux parasites causés par les vibrations mécaniques de la plateforme de support du système. Les résultats obtenus pourraient permettre l'acquisition de données riches en information tout en augmentant le spectre de sensibilité de la méthode EM au sol. Trois objectifs secondaires précis en découlent donc:

1. Implémentation d'un filtre adaptatif de réduction d'interférence NLMS sur les canaux EM
2. Évaluation de la corrélation croisée de deux capteurs pour détecter des sources rapprochées
3. Analyse et discussion sur quatre levés effectués depuis le déploiement de la méthode.

1.4 Plan de la thèse

Cette thèse comporte sept chapitres, et est divisée comme suit :

Le premier chapitre comporte un survol du projet de recherche ayant mené à cette thèse, ainsi que la problématique associée à cette dernière et les objectifs y découlant.

Le deuxième chapitre présente une introduction des méthodes géophysiques utilisées dans le cadre d'exploration minérale, avec un focus particulier sur le développement des méthodes similaires à celles développées lors de ce projet.

Le troisième chapitre est consacré à la théorie régissant les interactions entre l'émetteur et les récepteurs du système développé, une description de ce système, et les enjeux associés à son développement.

Le quatrième chapitre présente les méthodes de traitement du signal numérique permettant de traiter les données acquises lors de sondages électromagnétiques, ainsi que les algorithmes de filtrage développés pour palier à la problématique.

Le cinquième chapitre consiste à présenter les améliorations apportées au système existant dans le cadre de ce projet de recherche.

Le sixième chapitre présente des exemples de levés effectués et compare les différents algorithmes de traitement de données dans le cas de mesures prises sur des propriétés minières.

Le septième chapitre fait la synthèse de la recherche et de l'étude, et propose des recommandations sur l'extension de la recherche.

Chapitre 2 Revue de littérature

2.1 Contexte historique

La demande sans cesse croissante de la planète en matière première et la pression exercée sur le secteur minier pour le renouvellement des ressources ont permis l'apparition de technologies visant à découvrir et caractériser les ressources minières déjà trouvées qui sont enfouies dans le sol ou en découvrir de nouvelles. Le contexte minier actuel démontre les besoins grandissants pour réduire les coûts d'exploration et d'exploitation. Dû à l'augmentation du prix des métaux de base, certains gisements considérés non rentables sont désormais exploités, et les rejets d'exploitation précédents sont réexaminés dans le but de récupérer des ressources qui n'avaient pas pu être traitées lors de campagnes précédentes ou étaient considérées non-économiques. Des exemples sont le site de l'ancienne United Keno Hills Mines près du village d'Elsa au Yukon, où les opérations ont cessé en 1989 et une nouvelle analyse a vu le jour en 2010 [SRK 2010] ainsi que sur les rejets de la Carolin Mine, à 150 km à l'est de Vancouver, où les opérations avaient cessé en 1984 alors que le prix des métaux était beaucoup plus bas qu'à ce jour [Daniel 2011].

L'arsenal d'outils utilisé par l'industrie de l'exploration minière couvre principalement trois champs de connaissance, soit la géologie, la géochimie et la géophysique. Au cours des 50 dernières années, les domaines de la géologie et de la géochimie ont évolué au rythme des connaissances académiques et techniques. Mentionnons l'amélioration des modèles géologiques, des méthodes de datation, des méthodes analytiques en géochimie et des

méthodes de forage. La géophysique minière a évolué de façon plus rapide que les deux précédentes, principalement grâce aux avancées technologiques dans le domaine de l'électronique et de l'informatique. Le secteur de la géophysique minière peut se subdiviser en trois champs d'application, soit la géophysique aérienne, la géophysique au sol et la géophysique en forage. Chaque champ vise un objectif différent et possède son propre facteur d'échelle. Ainsi la géophysique aérienne vise l'analyse rapide d'une grande surface de terrain afin de détecter l'environnement propice à la découverte d'indices révélateurs. Cette méthode souffre néanmoins d'un manque de résolution spatiale et doit faire l'objet d'un suivi au sol. La géophysique au sol est habituellement effectuée sur des secteurs jugés propices par une approche régionale ou par d'autres types d'information. L'objectif de la géophysique au sol est de détecter avec une grande résolution, la présence de propriétés physiques anormales et caractéristiques du type de gisement minier recherché. Ce champ d'application doit permettre de positionner des sondages de carottes rocheuses permettant d'expliquer les anomalies et idéalement de découvrir la matière première recherchée. Finalement, la géophysique en forage vise à résoudre des ambiguïtés ou des inconsistances quant aux explications obtenues par les sondages carottiers sur les anomalies géophysiques au sol. Le rayon d'investigation de cette approche est très limité, mais permet une haute résolution spatiale. Il nécessite évidemment la présence de sondages sur la zone visée.

La géophysique minière est donc une approche indirecte visant la détection et la caractérisation des roches par leurs propriétés physiques. Les principales propriétés physiques et méthodes couramment utilisées dans le domaine minier sont illustrées dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1 : Propriétés du sol étudiées dans le cadre de la géophysique minière
(modifié de [Allard 1999])**

PROPRIÉTÉ	MÉTHODE	OBJET D'ÉTUDE
Cisaillement et élasticité	Sismique	Vitesse des ondes sismiques
Densité	Gravimétrie	Champ gravimétrique terrestre
Susceptibilité magnétique	Magnétométrie	Champ magnétique terrestre
Radioactivité	Radiométrie	Rayonnement gamma
Conductivité électrique et perméabilité	Électromagnétique	Champ électromagnétique
Conductivité électrique	Électrique	Résistivité apparente
Constante diélectrique	Polarisation provoquée	Chargeabilité, déphasage

L'une des méthodes géophysiques qui a connu une évolution constante est la méthode électromagnétique. Cette méthode connaît de nombreuses variantes autant dans le support aérien, sol ou forage.

La méthode électromagnétique se définit comme la mesure de la conductivité électrique du socle rocheux dans un but de caractérisation et d'identification. Un champ magnétique artificiel est créé à partir d'une source émettrice. Le champ magnétique secondaire, crée par induction du matériau géologique conducteur est alors mesuré par une source réceptrice. La conductivité électrique du matériau géologique est déduite à partir de la réponse électromagnétique obtenue.

Cette méthode peut être appliquée dans le domaine temporel (Time Domain ElectroMagnetic, TDEM, ou Transient ElectroMagnetic, TEM) ou dans le domaine fréquentiel (Frequency Domain ElectroMagnetic, FDEM ou Frequency ElectroMagnetic, FEM).

Comme la méthode électromagnétique ne nécessite pas de contact direct avec le sol investigué, il est possible de l'utiliser à des distances verticales variables par rapport au sol. Certaines techniques EM au sol sont effectuées à quelques décimètres du sol tandis que les techniques EM aériennes sont appliquées à quelques dizaines ou centaines de mètres du sol [Sattel 2006, Vallée 2011].

Les systèmes EM aériens permettent l'utilisation de sources émettrices de forte puissance, mais souffrent d'un manque de résolution spatiale par rapport aux systèmes au sol. C'est dans ce contexte que le développement de techniques et l'amélioration du traitement des données se sont principalement concentrés sur les systèmes aériens.

À cause d'une plus grande proximité par rapport aux roches ciblées, les systèmes EM au sol offrent une plus grande résolution spatiale, mais souffrent d'un manque de puissance. Pourtant, en augmentant la qualité du signal et le rapport signal sur bruit, il serait possible de compenser la faible puissance des systèmes EM au sol tout en profitant d'une haute résolution spatiale.

2.2 Développements récents et contributions aux systèmes TDEM

La méthode TDEM a connu plusieurs développements récents, ayant divers objectifs tels que l'augmentation de la profondeur d'investigation, la réduction des sources de bruit, l'amélioration des modèles de résistivité ou l'augmentation de la résolution spatiale.

Parmi ces développements, notons l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières de la forme d'onde acquise [Reninger 2011] qui permet de reconstruire le signal obtenu après la coupure du courant à partir de composantes sélectionnées par l'utilisateur, afin de détecter des canaux corrompus par un bruit trop élevé. De plus, la combinaison de capteurs ayant des surfaces effectives très différentes permettant d'améliorer le niveau de bruit a été

étudiée [Nyboe 2009, Nyboe 2010] ce qui a permis d'augmenter la profondeur d'investigation d'un système TDEM tout en conservant une puissance d'émission constante. Plusieurs entreprises opérant des systèmes aéroportés ou héliportés ont quant à eux opté pour une augmentation de la puissance d'émission afin d'obtenir une profondeur d'investigation accrue [Killeen 2009, Killeen 2010, Vallée 2011]. Il est aussi fréquent de rencontrer des études détaillées combinant des données à haute résolution provenant d'autres méthodes géophysiques avec des données provenant de la méthode TDEM, comme dans le cas de données provenant de levés sismiques [Høyer 2011] où le levé TDEM offre de l'information supplémentaire sur la lithologie en 3D et permet d'améliorer l'interpolation des lignes de levé sismique. On retrouve même des améliorations récentes de nature opérationnelle, comme l'utilisation d'un ballon à hélium pour supporter le système TDEM lors d'opération dans des topographies difficiles tout en étant très près du sol [Stettler 2009]. Ce type d'opération, quoi que plus coûteuse, permet de conserver une résolution spatiale élevée et offre un niveau de bruit similaire aux méthodes traditionnelles au sol.

Bien que la technologie TDEM ait beaucoup évolué au cours des 50 dernières années, jusqu'au point où il est possible de faire des inversions 3D à partir de données acquises de façon linéaire, il reste encore beaucoup de travail à effectuer pour améliorer les niveaux de bruit et la stabilité de ces modèles afin d'obtenir une interprétation plus robuste des résultats.

2.3 Autres applications de la méthode TDEM

Bien qu'initialement développée afin de procéder à la détection, la localisation et la caractérisation de conducteurs dans le cadre d'exploration minérale, telle que la recherche de gisements aurifères [Aktarakçi 1997] ou de gisements de kimberlites ou de sulfures massifs [Power 2004, Unsworth 2012], la méthode TDEM connaît désormais de multiples

applications. Notons le cas où un levé TDEM hélicopté [Pryet 2011] a été effectué pour une étude hydrogéologique sur l'île Santa Cruz dans l'archipel des îles Galápagos. Ce levé a bénéficié de d'avancées récentes en traitement du signal numérique afin d'améliorer l'interpolation des lignes 1D pour permettre l'assemblage et la validation d'une base de données 3D très large. D'autres études hydrogéologiques ont aussi été effectuées en milieux urbains [Porsani 2012].

Plusieurs études de salinisation de cours d'eau ont été complétées récemment à l'aide de systèmes TDEM en combinaison avec d'autres instruments géophysiques. Une étude de la salinisation naturelle et culturelle de nappes phréatiques près de dépôts de pétrole a été effectuée [Paine 2010] où un levé TDEM au sol a été interprété en combinaison avec un levé FEM aéroporté en plus de plusieurs forages confirmant les résultats. En Australie Méridionale, une autre étude de salinisation d'une rivière en utilisant le système TDEM NanoTEM [Hatch 2010], le système FDHEM Resolve par hélicoptère de Fugro Airborne ainsi qu'un instrument de prise de mesures de résistivité DC, a permis de conclure que ces trois méthodes offrent des résultats similaires et complémentaires, tout en ayant des résolutions, profondeurs d'investigations et facilités d'utilisation totalement différentes. Il est aussi possible d'utiliser un système TDEM dans le but de connaître et de qualifier la contamination d'eaux sous-terraines [Buselli 2001].

On retrouve aussi la méthode TDEM à plus petite échelle et près du sol, pour faire la détection d'obus non-explosés (UXO - Unexploded ordnance). Les systèmes utilisés dans ce cas comportent habituellement un émetteur moins puissant et une boucle émettrice plus petite afin de localiser les cibles avec une grande précision [Bower 1999]. La méthode TDEM est aussi utilisée comme instrument de mesure dans des projets de construction ou de

maintenance en ingénierie, comme dans le cas où la fondation de barrages fut analysée de façon préventive en Californie [Hunter 2008].

Chapitre 3 Développement du système de levé

TDEM

3.1 La méthode TDEM

Un système TDEM induit un champ magnétique dans le sol à l'aide d'un émetteur, où un courant alternatif (I_p) circule dans un matériel conducteur formant une boucle ou une bobine. Ce champ magnétique, appelé champ primaire (B_p), est généré lorsqu'il y a variation du courant primaire en fonction du temps. Dans le cas des systèmes TDEM, les formes d'onde du courant habituellement utilisées sont carrées, triangulaires, exponentielles avec coupure abrupte ou semi-sinusoïdales. Le principe d'induction de Faraday indique qu'un champ magnétique qui varie en fonction du temps créera à son tour un champ électrique. Lorsque ce champ pénètre dans le sol, il génère des courants de Foucault (I_s) auxquels sont associés un champ magnétique secondaire (B_s), dont les caractéristiques varient en fonction de la conductivité, de la taille, du volume, etc. des couches formant le sol ainsi que des objets conducteurs avoisinants.

Un courant (I_R) est ensuite formé dans le récepteur, qui est lui aussi formé d'une boucle ou d'une bobine de matériel conducteur. Ce courant est généré à partir de la superposition des champs primaire et secondaire.

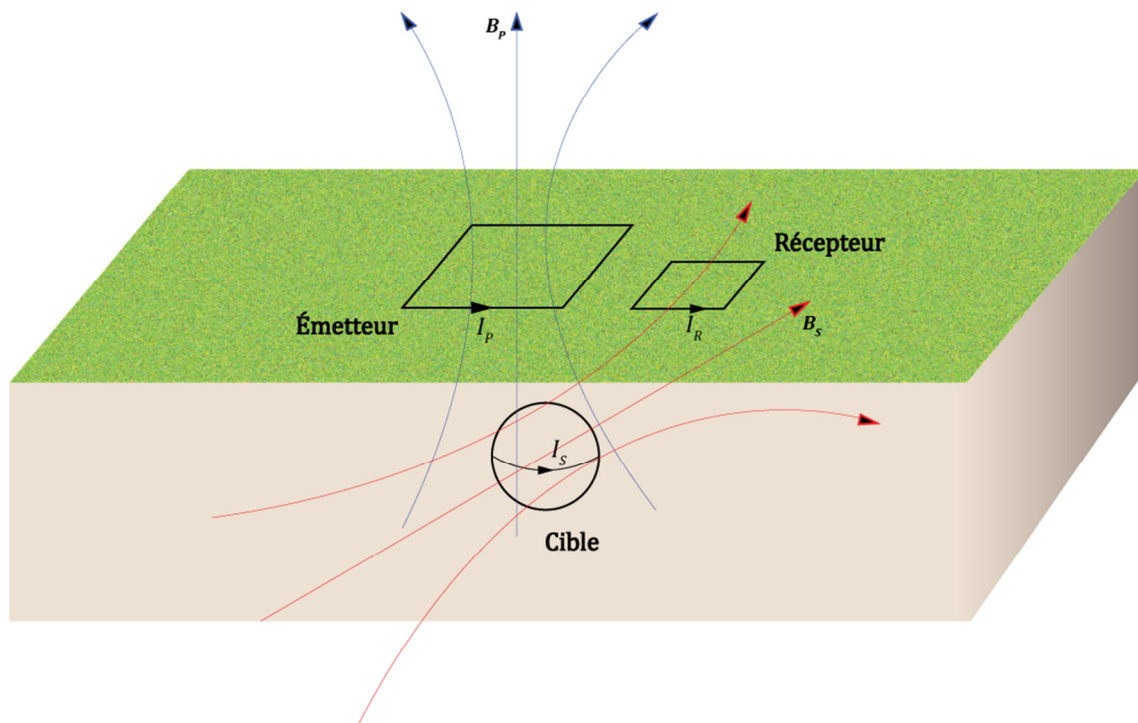


Figure 3.1 Diagramme d'un système EM par induction typique, comprenant un émetteur et un capteur, au-dessus d'une cible culturelle ou naturelle à l'étude

Bien que la méthode TDEM propose des caractéristiques et objectifs similaires à la FEM, les deux méthodes sont distinctes dans leur mode d'opération :

TDEM : Une impulsion de courte durée est émise, suivie d'un temps mort. Le résultat est habituellement observé après la coupure du courant, alors que le champ primaire n'existe plus. Il s'agit d'une façon simple d'observer le champ secondaire sans avoir la réponse du champ primaire. Typiquement, la courbe de décroissance du champ secondaire est échantillonnée à partir de quelques microsecondes après la coupure du courant et, selon la conductivité des couches du sol ou de la cible conductrice à proximité du système, peut durer plus de 10 millisecondes.

FEM : Cette méthode consiste à émettre un champ primaire à une fréquence précise, et d'observer la réponse du récepteur en phase et en quadrature. La réponse provient donc à la fois du champ primaire et du champ secondaire, ce qui requiert une connaissance parfaite de la géométrie émetteur - récepteur (distance et orientation relatives).

3.2 Caractéristiques du système développé

Afin d'être en mesure d'observer la conductivité des différentes couches du sol, ou de pouvoir détecter des zones anormales (avec anomalies) où la conductivité est plus élevée et pourrait indiquer un endroit où les ressources minérales auraient un intérêt à être mesurées davantage, un système TDEM au sol a été développé. Ce système a été développé à Gatineau, QC, en utilisant des développements technologiques empruntés aux systèmes TDEM héliportés, tout en étant adapté aux applications et enjeux reliés à la géophysique au sol. Un des objectifs de ce système est d'offrir une résolution spatiale d'environ un mètre, particulièrement importante dans le cadre d'exploration minérale pour obtenir des cibles de forage ou de décapage précises.

Ce système vise à obtenir des informations géophysiques comparables au système MaxMin, une méthode FEM HLEM au sol qui est utilisée depuis de nombreuses années. Deux différences fondamentales existent entre le système TDEM développé et le MaxMin, soient la géométrie de l'émetteur et du récepteur ainsi que le mode d'opération à fréquence fixe en comparaison avec une impulsion. En ce qui concerne la géométrie, dans le cas du MaxMin, l'émetteur du champ primaire se trouve à une distance horizontale de 25, 50 ou 100 mètres du récepteur, et le système est opéré en prenant des lectures à des stations prédéterminées à intervalle fixe. Dans un levé typique d'exploration minière au Québec [Mark 1985], une distance émetteur-récepteur de 100 mètres est habituellement utilisée. Toute anomalie

HLEM aura une largeur minimale de 100 mètres, soit la distance émetteur-récepteur, même si la source est très mince.

La méthode TDEM au sol développée prend cependant un nombre fixe de mesures par unité de temps (60 impulsions par seconde). La quantité de données acquises est donc très élevée lorsque le système est opéré par des marcheurs, ce qui permet d'obtenir une résolution spatiale très élevée. Cette résolution spatiale dépend aussi des dimensions de la boucle émettrice et des filtres numériques utilisés lors du traitement, qui eux-mêmes dépendent du ratio signal-sur-bruit obtenu lors d'un levé. Il est donc primordial de faire le traitement des données en utilisant des paramètres liés directement avec la taille et la profondeur des cibles géologiques visées.

Tous les composants du système sont positionnés sur la plateforme de support, qui elle-même est soutenue par deux longerons de fibre de verre ayant une longueur de près de 4 mètres afin d'accommoder deux opérateurs, à l'avant et à l'arrière de la plateforme.

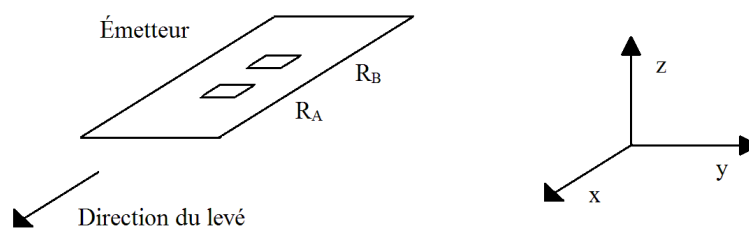


Figure 3.2 Géométrie de l'émetteur et des récepteurs

On définit l'axe longitudinal comme étant l'axe x, l'axe latéral comme étant l'axe y et l'axe vertical comme étant l'axe z. La figure ci-dessus présente le système dans une configuration possible, où les capteurs sont placés près du centre sur l'axe longitudinal. L'axe longitudinal

correspond aussi à la direction du levé, c'est-à-dire que les prises de mesures sont effectuées de façon linéaire sur cet axe.

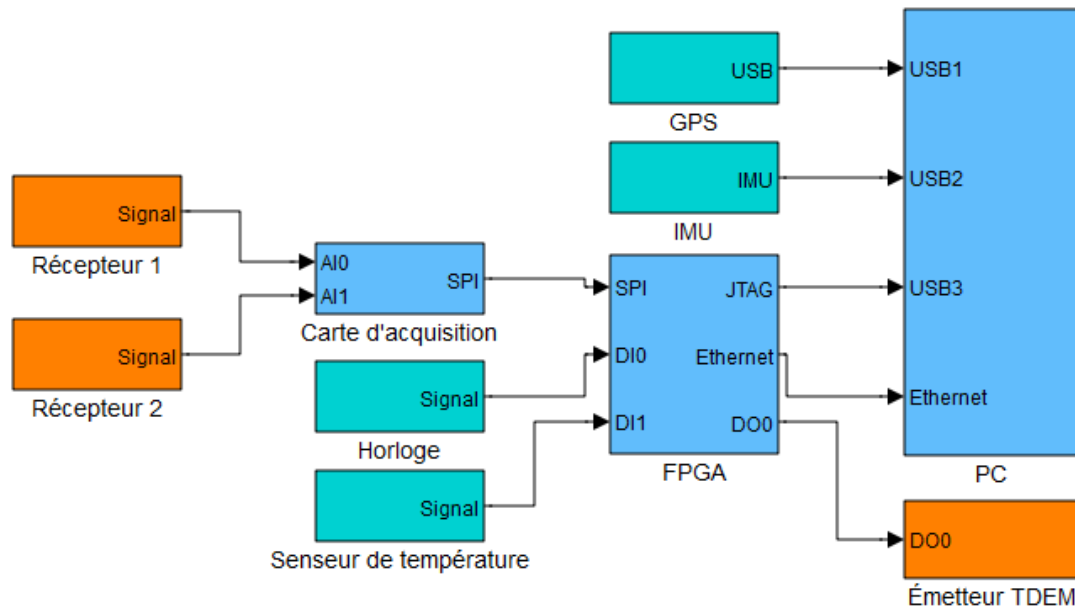


Figure 3.3 Diagramme du système TDEM développé

La figure 3.3 montre les sous-systèmes qui composent le système TDEM développé. Le système est composé des éléments suivants :

1. Ordinateur de contrôle et d'acquisition (PC et FPGA). Ces deux éléments se chargent de générer les signaux nécessaires à l'opération des autres sous-systèmes, de faire l'enregistrement des données, et servent aussi d'interface pour l'utilisateur.
2. Carte d'acquisition numérique 24 bits, 105 000 échantillons par seconde, 8 canaux. Cette carte convertit les signaux électriques provenant des capteurs en signaux numériques.
3. Émetteur TDEM. Cet élément permet de générer le courant demi-sinusoïdal nécessaire à l'émission du champ primaire. Il comporte aussi un fil d'aluminium

placé autour de la plateforme de support du système afin d'émettre le champ primaire.

4. Récepteurs. Les récepteurs servent à détecter le champ primaire et secondaire et génèrent une réponse qui varie en fonction des caractéristiques du sol ou des éléments conducteurs à proximité du système.
5. Système de positionnement GPS. Le GPS permet de positionner le système TDEM selon des coordonnées géographiques.
6. Capteur de température. Ce capteur permet de mesurer la température à un endroit particulier lors d'un levé. Il est habituellement placé près des composantes électroniques de l'émetteur EM afin de mesurer sa température.
7. Accéléromètres et gyroscopes MEMS (IMU). Ces éléments enregistrent l'accélération dans les axes longitudinal, latéral et vertical ainsi que l'orientation du système autour des mêmes axes.

3.3 Émetteur TDEM

Le courant émis dans la boucle de fil conducteur placé sur la plateforme est de forme d'onde demi-sinusoïdale, c'est-à-dire qu'il forme une « impulsion » positive (demi-cycle) qui est suivie par un temps mort, et ensuite d'une impulsion négative ayant la même amplitude et longueur d'onde, suivie d'un autre temps mort. Chaque impulsion a un courant crête de 700A, une durée de 486 μ s et les impulsions sont générées à une période de 16.6 ms, pour former un cycle complet en 33.3 ms. Afin d'atténuer le bruit causé par les lignes de transport d'électricité ou des appareils utilisant la tension du réseau électrique alternatif, la période de base de l'émetteur TDEM est synchronisée avec la fréquence du réseau électrique, tel que décrit à la section 4.1 de cette thèse (par exemple, 60 Hz en Amérique du Nord ou 50 Hz en Europe). De nombreux systèmes aéroportés opèrent donc à la fréquence de 30 Hz ou de 90

Hz (25 Hz ou 75 Hz en Europe), selon la profondeur d'investigation et la résolution spatiale ciblée. Une fréquence plus élevée permet d'améliorer la résolution spatiale, au détriment de la durée du temps mort après les impulsions. Le choix de la période de base de 33.3 ms du système développé provient d'un compromis entre la durée d'opération avec une pleine charge des batteries et la résolution spatiale lorsque le système est utilisé par des marcheurs. Il est toutefois possible d'opérer le système avec une période de base plus longue afin de placer des fenêtres d'analyse (ou « canaux » tel que définis à la Section 4.3) beaucoup plus tard après la coupure et d'augmenter l'autonomie du système, puisque la résolution spatiale de l'instrument est très élevée lorsque le système est opéré à une vitesse de marche d'environ 4 km/h.

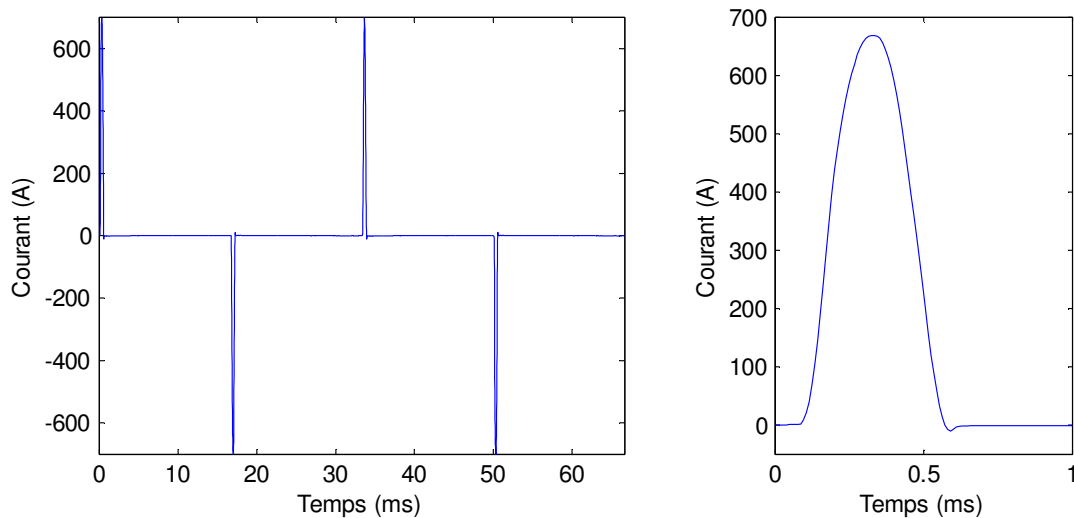


Figure 3.4 Forme d'onde du courant émis par l'émetteur, pour deux cycles complets d'impulsions (à gauche) et agrandissement d'un demi-cycle d'impulsion (à droite)

À la figure 3.4, on retrouve la forme d'onde du courant émis dans la boucle de fil afin de générer le champ primaire pour deux cycles complets (à gauche) ainsi qu'une vue rapprochée de l'impulsion de courant semi-sinusoïdale (à droite).

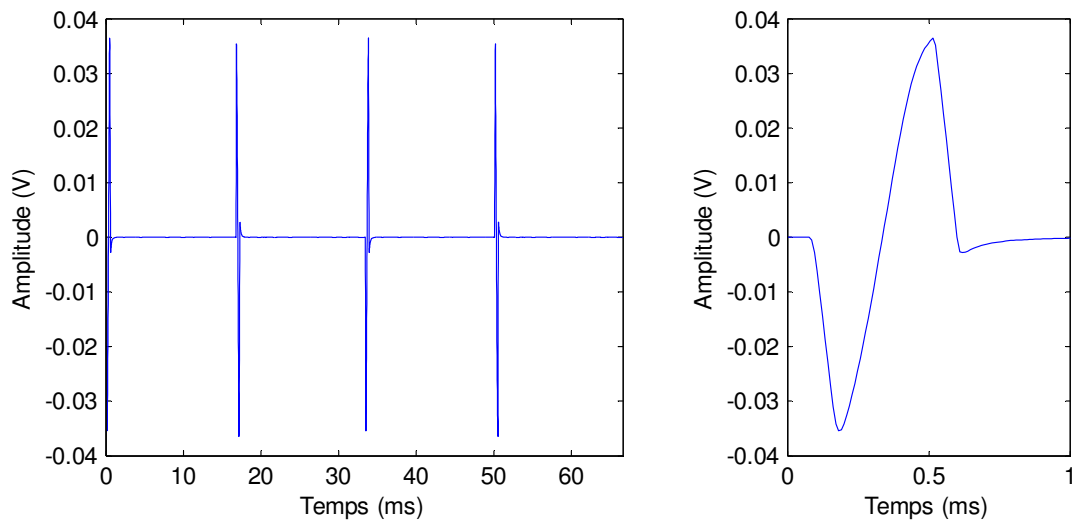


Figure 3.5 Forme d'onde du signal reçu par un capteur orienté dans le plan z, pour deux cycles complets d'impulsions (à gauche) et agrandissement d'un demi-cycle d'impulsion (à droite)

La figure 3.5 montre la forme d'onde obtenue par un récepteur placé à proximité de l'émetteur. L'amplitude du champ primaire observé dépend de la position relative du capteur par rapport à l'émetteur.

3.4 Récepteurs

3.4.1 Description des récepteurs TDEM

Les récepteurs électromagnétiques développés et utilisés dans le cadre de ce projet de recherche sont composés d'une bobine de fil de faible diamètre, enroulé autour d'un cadre de matériel non-conducteur. Les récepteurs peuvent être placés à différents endroits sur la plateforme de support; chaque récepteur comporte donc sa propre géométrie émetteur – récepteur.

Comme montré dans [Tumanski 2007], une bobine de fil ayant un cœur non-conductif aura un circuit électrique équivalent à un circuit RLC, c'est-à-dire qu'il aura une résistance et une inductance intrinsèque, en plus d'une capacité parasite.

Dans [Nyboe 2009], les bobines de fils utilisées comme récepteurs TDEM ont aussi les caractéristiques d'un circuit RLC. Ces valeurs sont affectés les caractéristiques physiques du récepteur, soit par exemple le diamètre et la composition du fil utilisé, la taille du support et le nombre de tours de fil. Toujours selon [Nyboe 2009], il est primordial d'ajouter une résistance en parallèle avec le récepteur et de l'ajuster afin que ce dernier agisse comme un filtre passe-bas de deuxième ordre et qu'il n'y ait pas de distorsion dans le signal.

Dans le cadre de cette thèse, cinq récepteurs ayant des caractéristiques électriques différentes ont été manufacturés. Quatre de ceux-ci utilisent un fil de cuivre d'un diamètre de 0.255 mm (30 AWG) alors que le cinquième utilise un diamètre de 0.127 mm (36 AWG). Les bobines de fil sont enroulées autour d'un cadre carré d'une surface de 0.04 m² de matériel non-conducteur.

Tableau 3.1 Caractéristiques électriques des récepteurs

RÉCEPTEUR	RÉSISTANCE (Ω)	INDUCTANCE (mH)	NOMBRE DE TOURS	SURFACE EFFECTIVE (m ²)	DIAMÈTRE DU FIL (mm)
R1	27.87	5.92	150	6	0.255
R2	83.4	49.07	300	12	0.255
R3	174.1	191.9	600	24	0.255
R4	306	564.5	1000	40	0.255
R5	343	57.81	300	12	0.127

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques électriques des différents récepteurs utilisés dans le cadre de ce projet de recherche. La résistance et l'inductance de chaque capteur sont mesurées à l'aide d'un appareil de mesure multifonction (modèle TH2821B).

On définit la surface effective d'un récepteur comme étant la multiplication du nombre de tours avec sa surface réelle. Il s'agit d'une mesure couramment utilisée dans les rapports de levés TDEM commerciaux, afin de décrire l'équipement utilisé.

Comme les effets des caractéristiques électriques sur la réponse TDEM n'étaient pas connus au début de ce projet, plusieurs prises de mesures ont été conduites afin de comprendre les interactions entre les caractéristiques électriques des récepteurs et la réponse du système TDEM aux différentes cibles culturelles et naturelles. Ces prises de mesures avaient comme objectif d'étudier trois paramètres physiques et électriques des capteurs :

1. Nombre de tours (section 3.4.3)
2. Diamètre du fil (section 3.4.4)
3. Résistance parallèle au récepteur (section 3.4.5)

3.4.2 Méthode et système utilisés pour la réponse en fréquence des récepteurs

Chaque récepteur est soumis à une prise de mesure qui permet d'obtenir son gain en fonction de la fréquence, en utilisant comme source une bobine de fil où un signal sinusoïdal de faible amplitude est présent et où la fréquence est augmentée de façon logarithmique en fonction du temps. Dans le cadre de cette thèse, la bobine utilisée comme émetteur est un récepteur identique au récepteur R2.

Le système utilisé afin de générer le signal d'entrée et d'acquérir le signal du récepteur à l'essai est une carte National Instruments USB-6216. Ce système comporte 8 entrées analogiques en configuration différentielle reliées à un convertisseur analogique-numérique

de 16 bits à une fréquence d'échantillonnage maximale de 400 kS/s. Deux sorties analogiques sont aussi disponibles à une résolution de 16 bits et une fréquence de 250 kS/s.

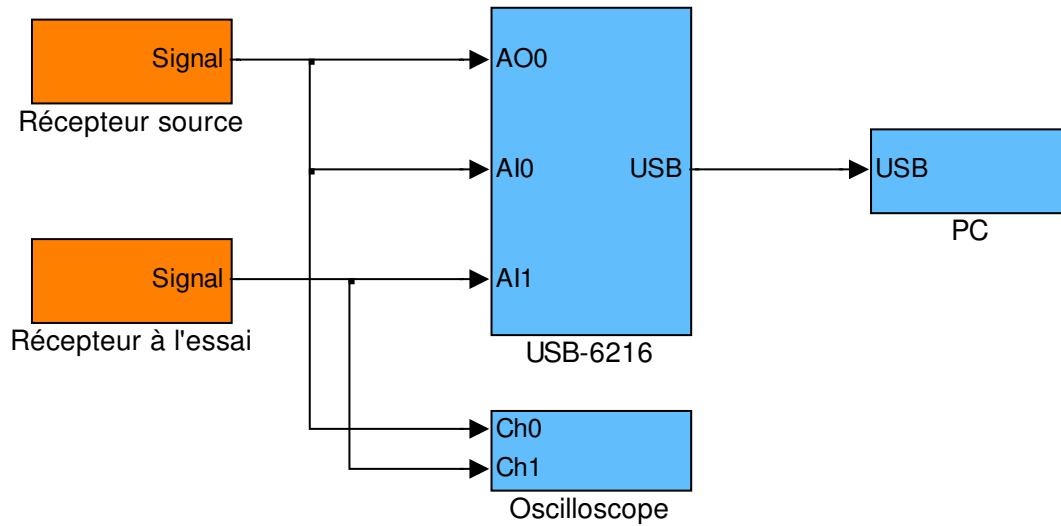


Figure 3.6 Système de prise de mesure de la réponse en fréquence des capteurs

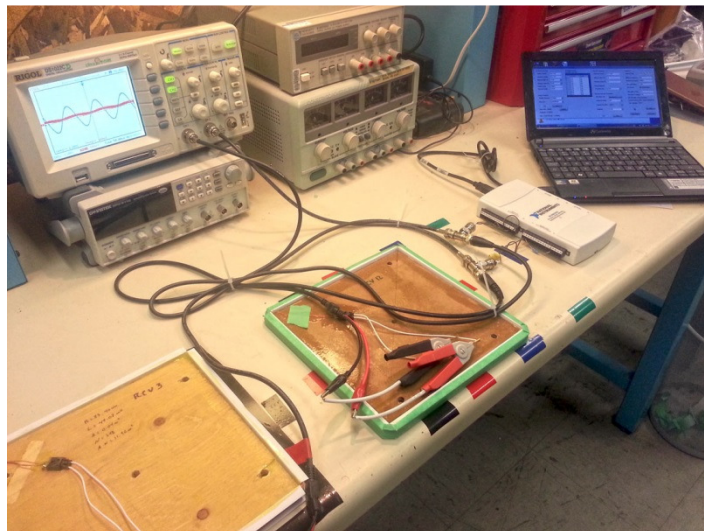


Figure 3.7 Appareil de laboratoire utilisé pour effectuer la prise de mesure de la réponse en fréquence des capteurs

La fréquence d'échantillonnage maximale pour une entrée analogique dépend du nombre total de canaux d'entrée utilisés. Dans le cas de la prise de mesures de la réponse en fréquence des récepteurs, deux entrées analogiques sont utilisées, ce qui limite la fréquence d'échantillonnage à 200 kS/s. Il est donc théoriquement possible d'obtenir la réponse en fréquence jusqu'à la fréquence de Nyquist, 100 kHz, sans obtenir un signal corrompu par le repliement spectral.

3.4.3 Réponse en fréquence des récepteurs lorsque la surface effective est modifiée

Cette prise de mesure consiste à comprendre l'effet de la surface effective sur la réponse en fréquence d'un récepteur. Les mesures sont prises entre 500 Hz et 100 kHz, avec un intervalle entre les fréquences qui augmente plus la fréquence est élevée, en utilisant un facteur multiplicatif de 1.02 à partir de la fréquence précédente.

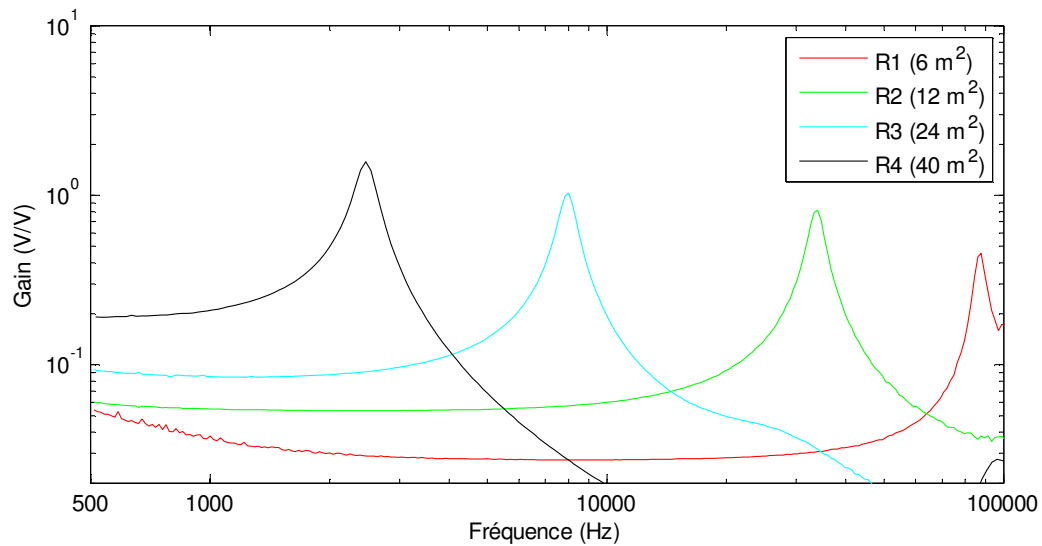


Figure 3.8 Réponse en fréquence (gain) des capteurs R1, R2, R3 et R4

On observe à la figure 3.8 que les réponses en fréquence des récepteurs R1, R2, R3 et R4 semblent correspondre à celle d'un filtre de second-ordre RLC en parallèle, puisqu'elle montre une fréquence de résonance bien précise. Si on se base sur cette théorie, il est possible de calculer la capacité parasite d'un récepteur, selon l'équation suivante :

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}$$

Tableau 3.2 Capacité parasite des récepteurs

RÉCEPTEUR	FRÉQUENCE DE RÉSONANCE (kHz)	INDUCTANCE (mH)	CAPACITÉ PARASITE (pF)
R1	87.82	5.92	555
R2	33.94	49.07	448
R3	7.99	191.9	2064
R4	2.40	564.5	7873

Ces résultats ne sont cependant pas vérifiés contre des mesures existantes d'autres récepteurs TDEM provenant de la littérature citée dans la bibliographie. De plus, le facteur de qualité Q ne semble pas varier en fonction de la résistance.

3.4.4 Réponse en fréquence des récepteurs lorsque le diamètre du fil est modifié

La deuxième prise de mesure du gain des récepteurs en fonction de la fréquence vise à observer quelle est la différence lorsque le diamètre du fil est modifié. Un fil d'un diamètre de 0.127 mm a été choisi afin d'effectuer la comparaison avec le fil habituellement utilisé ayant un diamètre de 0.255 mm.

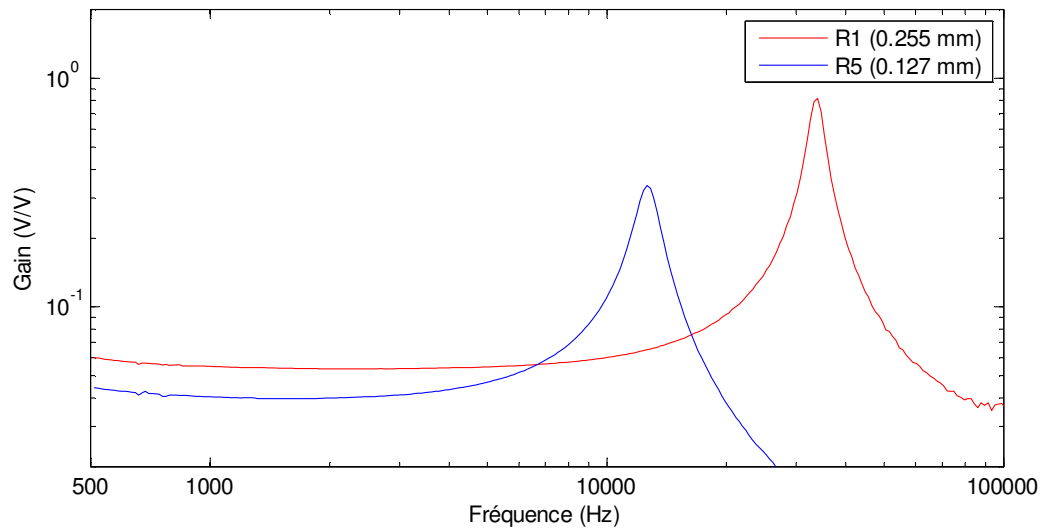


Figure 3.9 Réponse en fréquence (gain) des capteurs R1 et R5

La fréquence de résonance du récepteur R1 est de 33.94 kHz alors que celle du récepteur R5 est de 12.61 kHz. De plus, le gain à la fréquence de résonance passe respectivement de 0.82 V/V à 0.34 V/V, ce qui pourrait être attribué à une résistance plus élevée dû au diamètre du fil utilisé. Ces deux facteurs pourraient être très importants lors de l'analyse et l'interprétation des données TDEM, puisque même si la surface effective est identique, le signal acquis par les deux récepteurs pourrait être très différent. Cependant, tel qu'observé à la section 3.4.3, le facteur de qualité Q de la réponse en fréquence ne semble pas affecté par le changement de résistance causé par la diminution du diamètre du fil.

3.4.5 Réponse en fréquence des récepteurs en présence d'une résistance en parallèle

La troisième et dernière prise de mesures en fréquences consiste à observer la réponse en fréquence lorsqu'une résistance en parallèle est ajoutée aux bornes du récepteur.

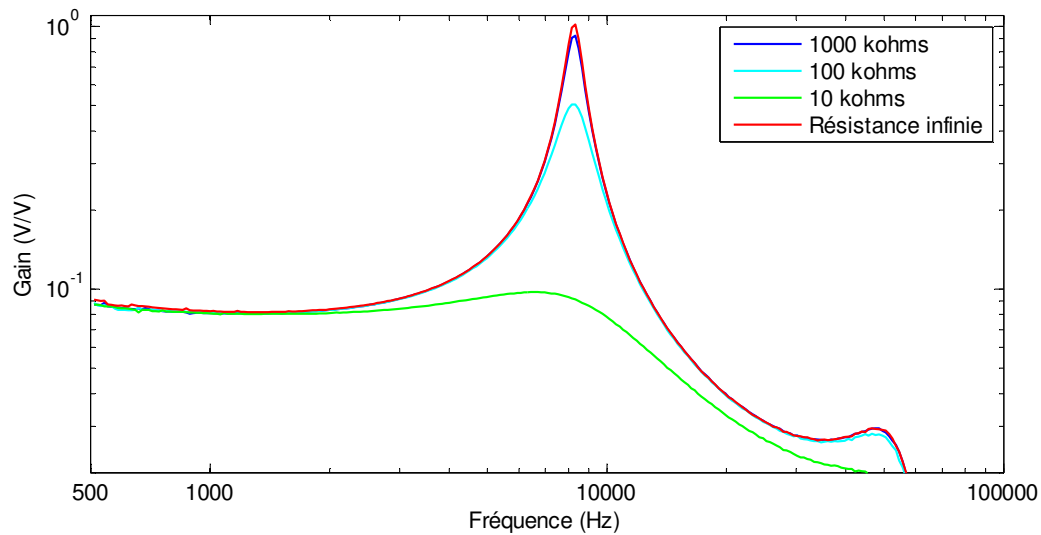


Figure 3.10 Réponse en fréquence des capteurs de surface effective de 6 m², 12 m², 24 m² et 40 m² lorsque reliés à une entrée à haute impédance

À la figure 3.10, on observe que la fréquence de résonance des récepteurs ne change pas en fonction de la résistance en parallèle ajoutée, mais qu'il s'agit plutôt d'un changement du facteur de qualité du circuit équivalent RLC.

3.5 Acquisition et enregistrement des données géophysiques

L'acquisition et l'enregistrement des signaux électriques provenant d'un capteur s'effectuent comme suit :

1. Le capteur est relié à l'entrée d'un amplificateur opérationnel différentiel, pour lequel la résistance d'entrée est fixe et ne dépend pas du capteur utilisé. L'amplificateur opérationnel agit comme filtre passe-bas anti-repliement spectral.
2. La sortie de l'amplificateur opérationnel différentiel est reliée à un convertisseur analogique – numérique Sigma Delta d'une résolution de 24 bits. L'échantillonnage est

effectué à 105 000 échantillons par seconde. Comme chaque demi-cycle a une durée de 33.3 ms, il y a donc 1750 échantillons par demi-cycle.

3. Les données numériques sont ensuite transférés via un protocole de communication série SPI (*Serial Peripheral Interface*) à un FPGA (*Field-programmable gate array*) qui se charge de rassembler les échantillons en trames réseau, pour ensuite les transférer à un ordinateur via un réseau par câble *Ethernet*.

4. L'ordinateur enregistre les données reçues dans un fichier binaire, sans effectuer de traitement numérique à priori, puisque la quantité de données numériques à traiter surchargerait l'ordinateur d'acquisition actuellement utilisé. L'ordinateur permet aussi de visualiser en temps réel les données EM acquises, non filtrées, afin de déterminer si le système fonctionne bien et si les niveaux de bruits sont consistants.

3.6 Appareils de mesure périphériques installés sur la plateforme

Les trames du GPS (format standard NMEA 0183), de l'instrument de mesures inertielles ainsi que des capteurs de température sont aussi enregistrées et synchronisées avec les données provenant de la carte d'acquisition numérique, dans des fichiers indépendants afin de les utiliser à des moments différents lors du traitement des données.

Tableau 3.3 : Appareils de mesure périphériques installés sur la plateforme

	GPS	IMU	Thermistor
Données acquises	Position géographique (longitude, latitude, altitude) et temps UTC, trames NMEA 0183 GPGGA et GPRMC utilisées	Accélération (x, y, z) et orientation (roulis, tangage)	Température des capteurs EM
Modèle	USGlobalSat BU-353	Pololu UM6-LT	Smartec SMT160-30-TO-92
Type de communication	Port série (UART)	Port série (UART) via module de connexion SPI vers UART	Modulation par largeur d'impulsion (PWM)
Fréquence d'échantillonnage	1 Hz	20 Hz	10 Hz

3.7 Cibles utilisées pour caractériser le système

Afin de mieux comprendre les interactions entre le système TDEM et les cibles naturelles ou culturelles, plusieurs cibles métalliques de petites tailles ont été sélectionnées. Bien que n'étant pas comparables à des cibles géologiques, qui seraient de plus grande taille et de différentes conductivités, ces cibles sont faciles à utiliser, et il est possible de répéter facilement une prise de mesure, particulièrement lorsqu'il s'agit d'observer l'effet d'une modification apportée au système TDEM. Les cibles ont été choisies en fonction de données précédemment acquises par un système TDEM de surface de petite taille, conçu pour la recherche de UXO [Everett 2005]. Les cibles PH, PV et CL utilisées dans le cadre de cette thèse sont exactement identiques aux cibles HP, VP et Clutter dans [Everett 2005].

Tableau 3.4 : Cibles utilisées pour caractériser le système

CIBLE	DESCRIPTION
TH	Tige d'acier Diamètre : 1.9 cm Longueur : 122 cm
PH	Plaque d'aluminium Épaisseur : 6.35 mm Largeur : 30 cm (carrée) Orientée horizontalement
PV	Plaque d'aluminium Épaisseur : 6.35 mm Largeur : 30 cm (carrée) Orientée verticalement dans le plan yz
CL	20 clous Diamètre : 6.35 mm Longueur : 10 cm

Chapitre 4 Traitement des données géophysiques de base

Les données EM acquises par le système d'acquisition numérique développé sont enregistrées sans être préalablement filtrées, combinées ou compensées. Il faut donc procéder à plusieurs étapes de traitement consécutives afin d'en extraire les informations géophysiques à partir de la réponse électrique des récepteurs.

Le traitement des données comporte une première partie non-supervisée qui consiste à combiner les demi-cycles acquis, effectuer un filtrage simple et extraire les canaux définis par l'utilisateur. La deuxième étape consiste à plusieurs autres méthodes de filtrage et de présentation de données, dont les paramètres sont dictés par la résolution spatiale souhaitée et les conditions de levé. Par exemple, la bande passante des filtres numériques pourrait être réduite si le système était opéré dans des topographies difficiles, afin d'atténuer le bruit causé par les rotations et accélérations subites du système.

4.1 Moyenne et filtrage des impulsions

On définit un cycle complet par deux impulsions EM consécutives de polarité opposée :

$$c_i(t) = [c_i^+(t) \ c_i^-(t)]$$

La fréquence de base du cycle complet couvrant les deux impulsions est de 30 Hz et l'impulsion négative est soustraite de l'impulsion positive, éliminant ainsi la composante à

60 Hz. Il est aussi possible de combiner plusieurs paires d'impulsions (moyenne) pour effectuer le traitement subséquent des données, ce qui crée un filtre passe-bas et réduit considérablement la quantité de données à être traitée par la suite :

$$\text{Moyenne de } N \text{ paires d'impulsions : } s_i(t) = \frac{\sum_{n=1}^N c_{i+n-1}^+(t) - c_{i+n-1}^-(t)}{2N}$$

Le système développé utilise une seule paire d'impulsions bipolaires à l'étape de la moyenne. Il s'agit cependant d'un paramètre qui peut être modifié par l'utilisateur au moment du traitement des données, au besoin.

$$\text{Moyenne d'une paire d'impulsions : } s_i(t) = \frac{c_i^+(t) - c_i^-(t)}{2}$$

La moyenne des paires d'impulsions élimine aussi le décalage DC, qui peut être causé par les amplificateurs opérationnels de la carte d'acquisition numérique.

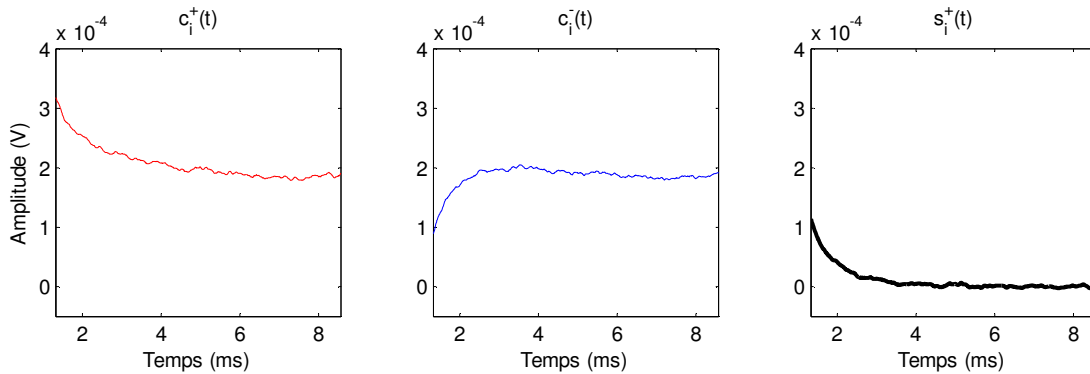


Figure 4.1 Demi-cycle positif $c_i^+(t)$ (à gauche), demi-cycle négatif $c_i^-(t)$ et moyenne des demi-cycles $s_i(t)$

La figure 4.1 montre la courbe de décroissance après la coupure du courant pour les deux demi-cycles positif et négatif, ainsi que la moyenne.

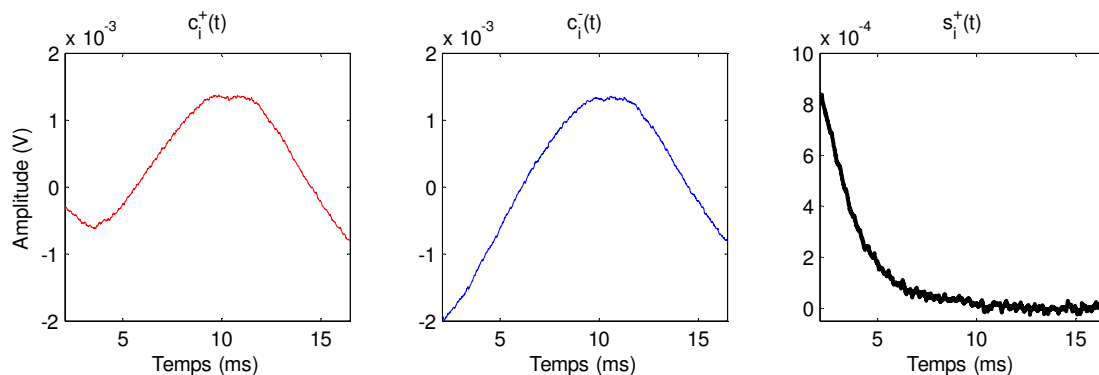


Figure 4.2 Demi-cycle positif $c_i^+(t)$ (à gauche), demi-cycle négatif $c_i^-(t)$ et résultat de moyenne des demi-cycles $s_i(t)$ lorsqu'un fort signal parasite à 60 Hz est présent

La figure 4.2 montre la courbe de décroissance après la coupure du courant pour les demi-cycles positif et négatif dans le cas où un fort signal parasite à une fréquence de 60 Hz est présent, provenant d'un appareil électrique situé à proximité du capteur. Le résultat est légèrement affecté, puisqu'il peut exister une faible différence de fréquence entre le système TDEM et la tension AC. Cette différence pourrait être due aux variations de la fréquence de la tension AC ou à la dérive de l'horloge interne du système TDEM générant le signal utilisé pour déclencher l'émetteur TDEM. Cet effet est cependant négligeable lorsque le système est opéré loin de lignes électriques ou d'appareils électriques.

4.2 Filtrage des impulsions

Une fois le calcul de la moyenne complétée, le signal doit ensuite être filtré. Le système développé utilise une étape de filtrage simple et rapide, qui consiste à un premier filtre médian à trois points, suivi d'un filtre passe-bas par moyenne glissante de 15 points. Il est aussi possible d'appliquer d'autres filtres permettant, par exemple, le rejet d'échantillons aberrants en présence de signaux atmosphériques parasites créés par des orages.

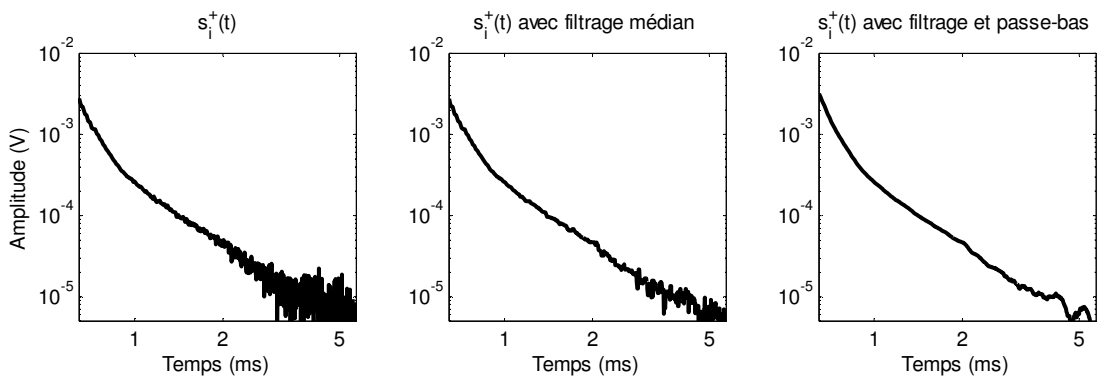


Figure 4.3 Moyenne des demi-cycles $s_i(t)$ en échelles horizontale et verticales logarithmiques (à gauche), moyenne des demi-cycles avec filtrage médian (au centre) et moyenne des demi-cycles avec filtrage médian et passe-bas

La figure 4.3 montre la courbe de décroissance non-filtrée, suivie du résultat obtenu après le filtre médian ainsi que le résultat après le filtre médian et passe-bas.

4.3 Analyse des données par canaux et filtrage des canaux

Une fois la courbe de décroissance filtrée, elle est ensuite échantillonnée à certains délais précis après la coupure du courant. Les échantillons correspondant à chaque délai respectif forment ensuite un canal, qui peut être observé en fonction du temps ou de la position géographique du système TDEM. Dans le cadre de ce projet de recherche, on observe les canaux en fonction du temps, c'est-à-dire que chaque courbe de décroissance, une fois filtrée, est appelée lecture. Des lectures sont générées 30 fois par seconde.

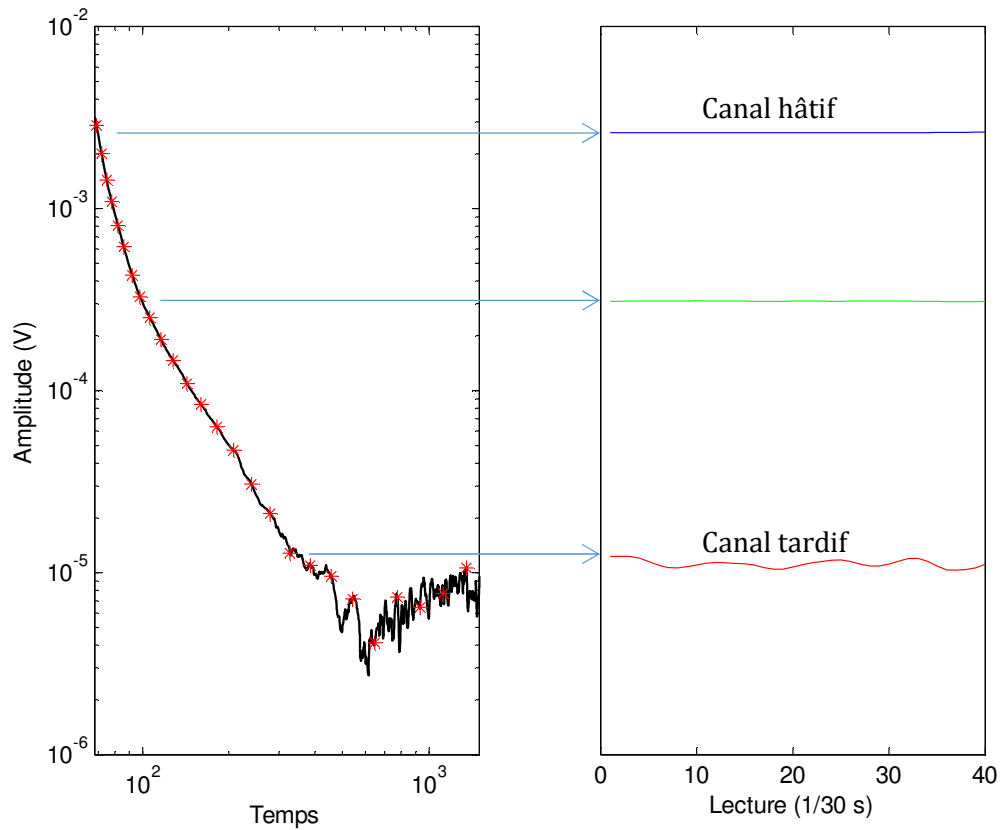


Figure 4.4 Échantillonnage de la courbe de décroissance du signal reçu par un capteur sous la forme de différents canaux.

La figure 4.4 montre la position des canaux sur la courbe de décroissance du signal reçu par un capteur. Les canaux sont distribués de façon logarithmique sur la courbe de décroissance, afin de conserver un échantillonnage dense tôt après la coupure et éliminer des valeurs moins utiles plus tard après la coupure. Cependant, comme la période immédiatement après la coupure du courant contient beaucoup d'information géophysique, des canaux sont distribués sur chaque échantillon possible pour les 16 premiers échantillons après la coupure, et le délai entre les canaux augmente de façon logarithmique par la suite. Chaque canal ne couvre qu'un seul échantillon, à la différence de la méthode *log-gating* [Munkolm 1996] qui dicte que les canaux plus tard après la coupure regroupent plusieurs échantillons,

et autant le délai après la coupure que le nombre d'échantillons par canal augmente en fonction du canal. Dans le cas du système TDEM développé, les méthodes de filtrage numérique décrites à la section 4.2 lissent suffisamment la courbe de décroissance pour ne pas avoir à regrouper de multiples échantillons.

Le tableau ci-dessous montre la position des canaux en position et en temps, par rapport à la coupure du courant de l'émetteur du système TDEM. Le premier canal porte le numéro 25, puisque 24 canaux sont distribués avant et durant l'impulsion, mais ne sont pas présentement utilisés dans le cadre du traitement de données de base, puisqu'ils ont un niveau de bruit plus élevé car ils sont influencés par le champ primaire et le champ secondaire.

Tableau 4.1 : Position des canaux après de l'impulsion, par rapport à la fin de l'impulsion

CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)	CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)	CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)
25	0	0	54	40	0.38	83	282	2.69
26	1	0.010	55	43	0.41	84	301	2.87
27	2	0.019	56	46	0.44	85	322	3.07
28	3	0.029	57	50	0.48	86	344	3.28
29	4	0.038	58	53	0.50	87	367	3.50
30	5	0.048	59	57	0.54	88	393	3.74
31	6	0.057	60	61	0.58	89	419	3.99
32	7	0.067	61	65	0.62	90	448	4.27
33	8	0.076	62	69	0.66	91	479	4.56
34	9	0.086	63	74	0.70	92	511	4.87
35	10	0.095	64	80	0.76	93	546	5.20
36	11	0.105	65	85	0.81	94	584	5.56
37	12	0.114	66	91	0.87	95	624	5.94
38	13	0.124	67	97	0.92	96	666	6.34
39	14	0.133	68	104	0.99	97	712	6.78
40	15	0.143	69	111	1.06	98	760	7.24

CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)	CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)	CANAL	POSITION (éch.)	POSITION (ms)
41	16	0.152	70	119	1.13	99	812	7.73
42	17	0.162	71	127	1.21	100	868	8.27
43	19	0.181	72	136	1.30	101	927	8.83
44	20	0.190	73	145	1.38	102	990	9.43
45	22	0.21	74	155	1.48	103	1058	10.08
46	23	0.22	75	166	1.58	104	1130	10.76
47	25	0.24	76	177	1.69	105	1207	11.50
48	27	0.26	77	189	1.80	106	1289	12.28
49	29	0.28	78	202	1.92	107	1377	13.11
50	31	0.30	79	216	2.06	108	1471	14.01
51	33	0.31	80	231	2.20	109	1571	14.96
52	35	0.33	81	247	2.35	110	1679	15.99
53	38	0.36	82	264	2.51			

4.4 Présentation des canaux

Dans cette section, nous décrivons les différentes méthodes utilisées afin de présenter les données acquises lors de levés avec le système TDEM développé. Comme chaque méthode propose ses avantages et ses inconvénients, il nécessaire de sélectionner une méthode permettant à l'utilisateur non-initié de bien comprendre le résultat obtenu.

Les trois premières méthodes décrites ci-dessous présentent en exemple toutes les mêmes données, qui ont été acquises lors du passage du système TDEM au-dessus de deux cibles PH installées respectivement à 60 cm et 90 cm sous le système, alors que plusieurs exemples utilisant la quatrième méthode sont présentés au chapitre 6 de cette thèse.

4.4.1 Canaux superposés sans remise à zéro

La première méthode de présentation des canaux EM consiste à faire un graphique d'un choix représentatif de canaux sur une échelle linéaire en fonction du temps.

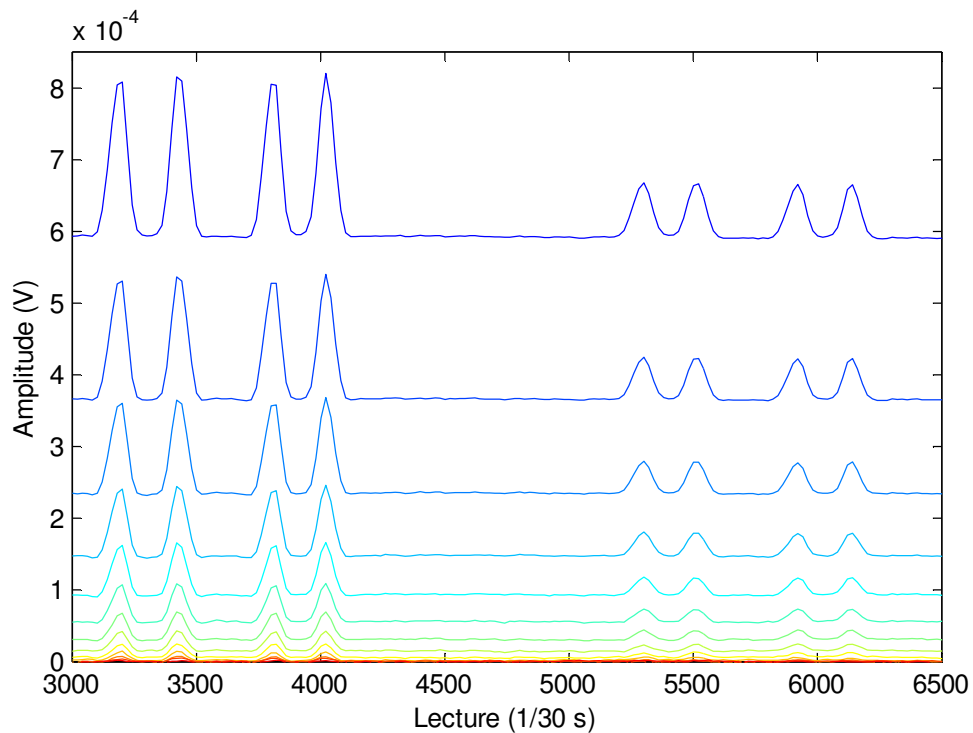


Figure 4.5 Présentation des profils superposés sans remise à zéro avec échelle verticale linéaire, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes

Tel que montré à la figure 4.5, chaque canal est représenté par une courbe ayant une couleur spécifique. La couleur bleue représente le canal le plus hâtif après la coupure du courant alors que la couleur rouge représente le plus tardif. L'avantage principal de cette méthode est la facilité à comprendre et interpréter les résultats, puisqu'il est possible de comparer directement deux anomalies selon leur amplitude ou leur longueur d'onde. Cette méthode offre cependant une mauvaise définition des canaux ayant des amplitudes faibles. De plus, les courbes n'utilisent qu'une faible partie de l'espace disponible sur une figure.

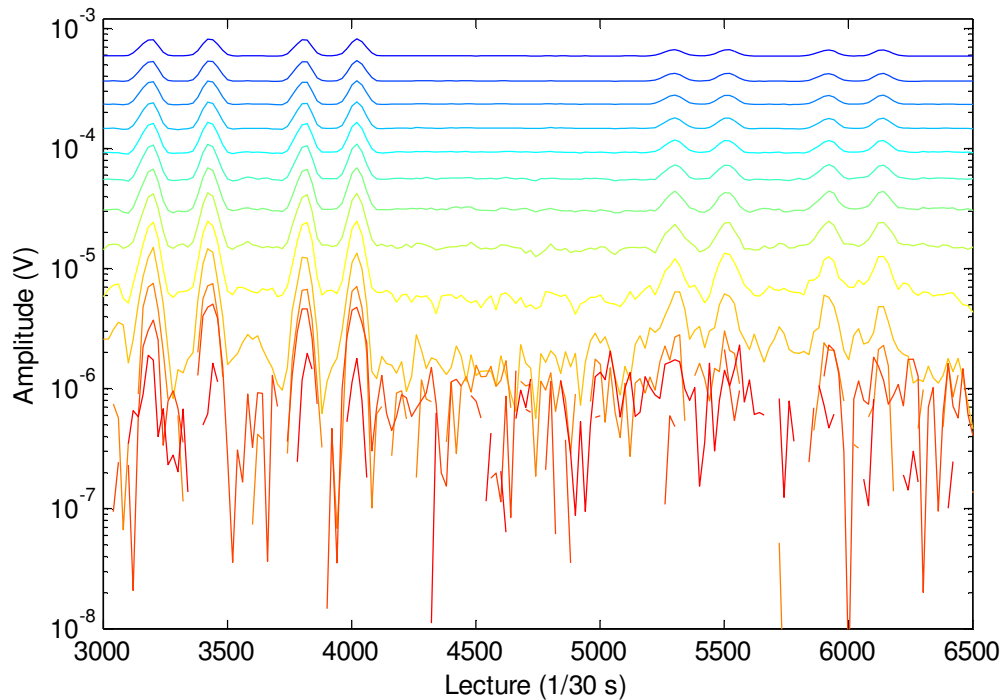


Figure 4.6 Présentation des profils superposés sans remise à zéro avec échelle verticale logarithmique, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes

Il est aussi possible d'afficher les résultats sur une échelle verticale logarithmique, tel que présenté à la figure 4.6, afin d'augmenter la définition des canaux ayant une amplitude plus faible. Cette méthode permet d'observer le niveau de bruit du capteur et offre une meilleure sensibilité aux faibles contrastes. Il est toutefois nécessaire de tenir compte de la polarité du signal, puisque les valeurs négatives ne peuvent être représentées sur l'échelle logarithmique. Dans ce cas, il est possible d'afficher les valeurs négatives sur un tracé pointillé ou de masquer les valeurs négatives. Il est préférable d'utiliser un tracé pointillé puisque certaines valeurs négatives peuvent être observées sur certaines anomalies (tel que comme présenté à la section 6.3, lors du levé du Lac Pipe).

4.4.2 Canaux superposés avec remise à zéro

La deuxième méthode des canaux EM requiert une opération mathématique de remise à zéro indépendante de chaque canal avant l’affichage. La remise à zéro peut être faite selon la moyenne, la médiane ou le minimum de toutes les valeurs obtenues sur chaque canal, ou il est possible d’utiliser les lectures de l’instrument à un endroit très résistif.

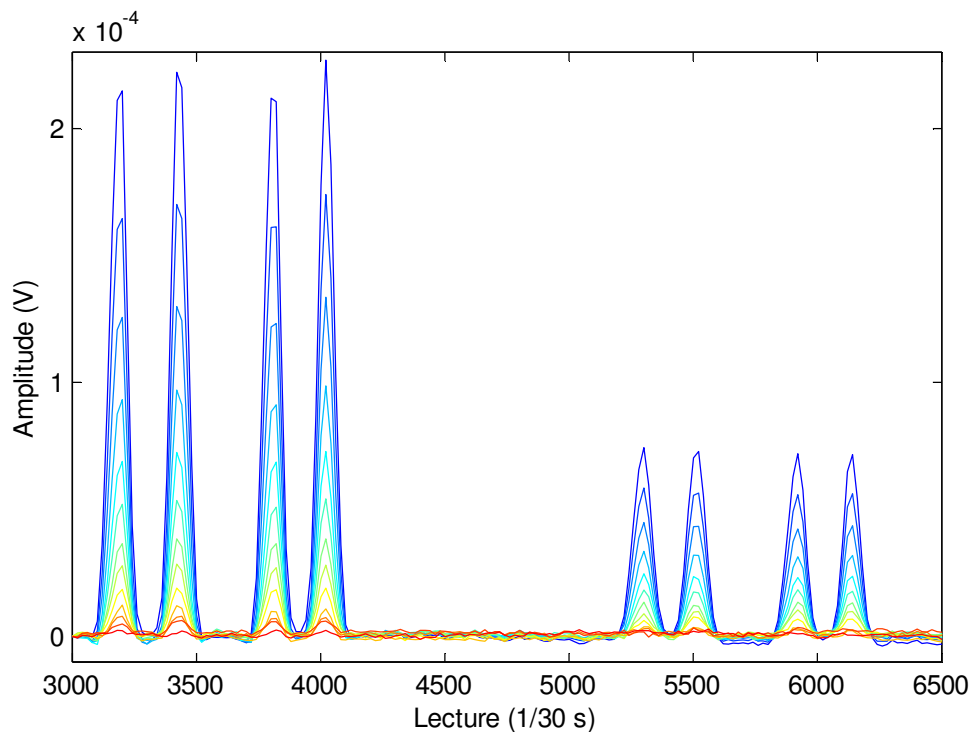


Figure 4.7 Présentation des profils superposés avec remise à zéro avec échelle verticale linéaire, remise à zéro au-dessus d’un endroit résistif, réponse d’un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes

À la figure 4.7, on observe que cette méthode est aussi facile à comprendre et à interpréter. Il s’agit d’ailleurs d’un résultat livrable standard lors de levés commerciaux pour de nombreuses entreprises. En comparaison avec la première méthode, celle-ci offre un

résultat visuellement plus attrayant, améliore la sensibilité aux faibles contrastes et offre une meilleure utilisation de l'espace disponible puisque l'échelle verticale est plus petite. Toutefois, la perte du décalage DC peut potentiellement éliminer une information géologique utile.

Comme pour la première méthode sans remise à zéro, cette méthode peut aussi être affichée en utilisant une échelle verticale logarithmique. Cette présentation des canaux est visuellement très attrayante, et offre un très bon compromis entre la définition des canaux à faible amplitude et ceux à plus haute amplitude, en plus de fournir une indication directe du niveau de bruit présent sur tous les canaux.

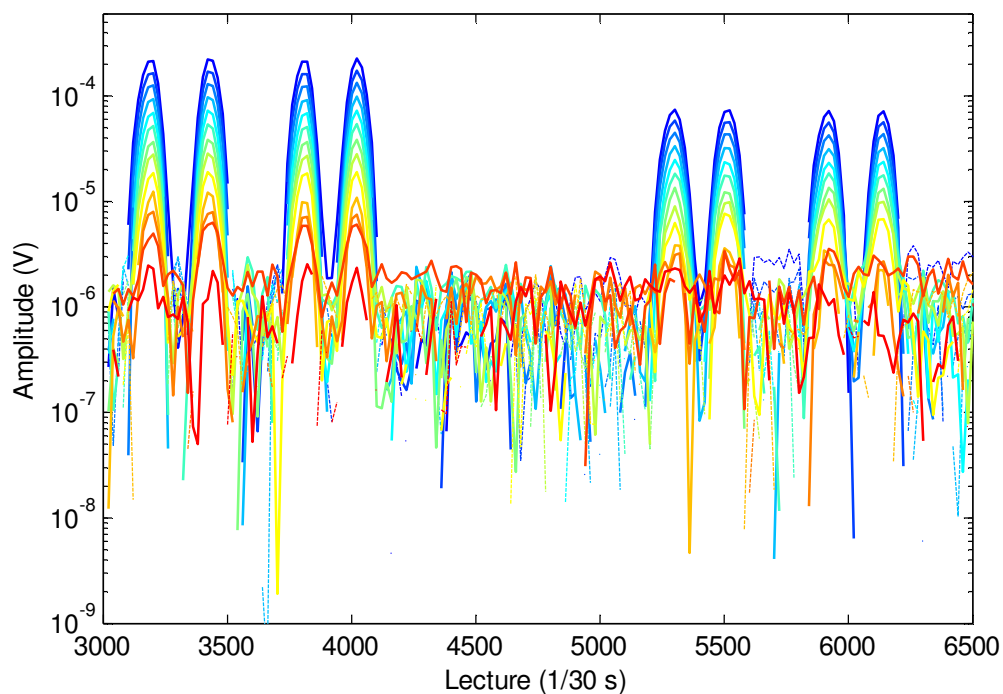


Figure 4.8 Présentation des profils superposés avec remise à zéro avec échelle verticale logarithmique, remise à zéro au-dessus d'un endroit résistif, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes

4.4.3 Canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles

Nous proposons dans cette sous-section une nouvelle méthode de visualisation dans le cadre de rapports de levés géophysiques. Elle consiste à afficher chaque canal sur une échelle de couleur propre à chaque canal en fonction du temps, les uns au-dessus des autres, tel que montré à la figure 4.9. Cette méthode permet une pleine utilisation de l'espace disponible dans une figure, ce qui offre une présentation de toute la courbe de décroissance avec une grande sensibilité aux faibles contrastes pour tous les canaux.

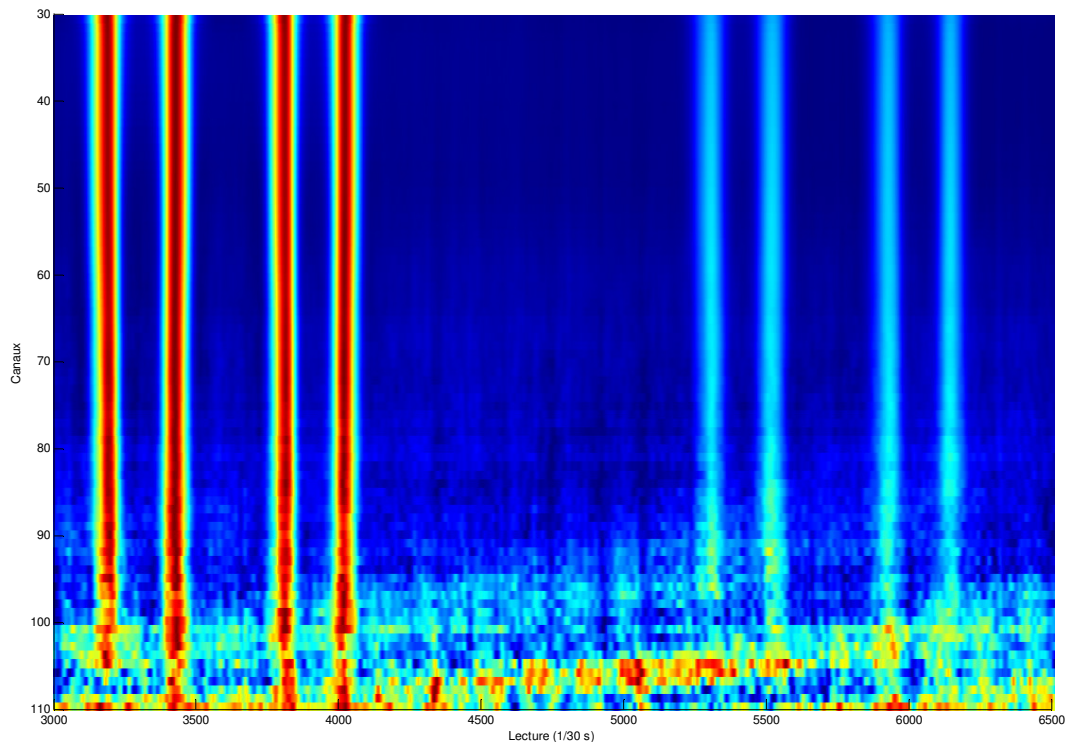


Figure 4.9 Canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles, réponse d'un capteur lors du passage du système TDEM au-dessus de cibles PH placées à deux profondeurs différentes

Cependant, chaque canal comporte sa propre échelle de couleur, ce qui rend l'interprétation quantitative du graphique impossible sans joindre un graphique de l'échelle de couleur utilisée en fonction du canal observé, tel que montré à la figure 4.10. Cette méthode est semblable à celle utilisée dans [Oldenburg 1998], mais cette dernière utilise une échelle constante pour tous les canaux, c'est-à-dire que chaque couleur représente une amplitude fixe, alors que la méthode décrite ci-dessus utilise plutôt une échelle variable afin de maximiser la plage de couleurs pour chaque canal.

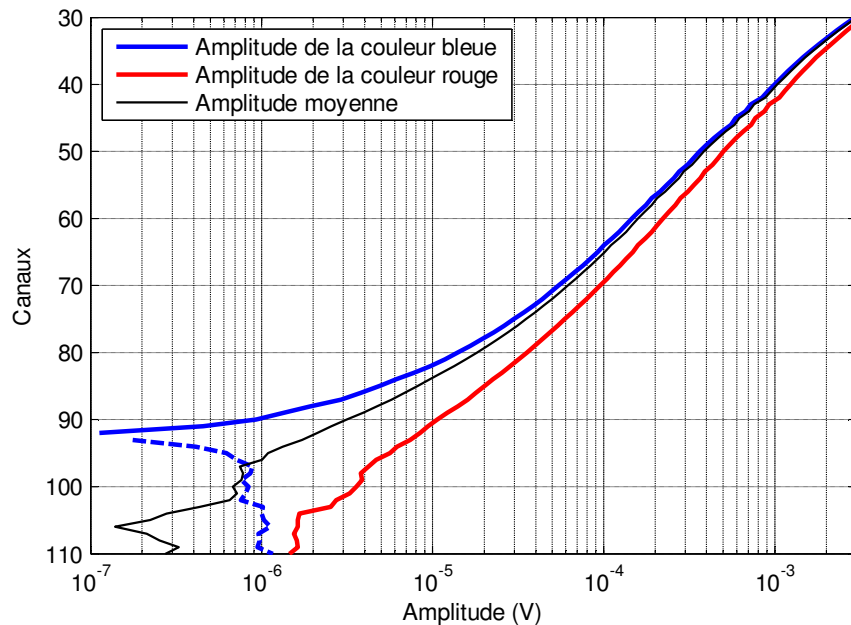


Figure 4.10 Amplitudes représentées sur l'échelle de couleur selon les canaux, pour la méthode par canaux juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles

La figure 4.10 montre les valeurs minimales (en bleu) et maximale (en rouge) de chaque canal de la courbe de décroissance obtenu par un capteur. La méthode peut déterminer la plage d'amplitude pour chaque canal selon son maximum et son minimum de façon automatique ou l'utilisateur peut déterminer les limites manuellement, dans le but de comparer plusieurs enregistrements.

4.4.4 Canaux superposés à l'imagerie satellite

La quatrième méthode d'affichage consiste à afficher un canal particulier sur une image satellite de l'endroit. Cette méthode est couramment utilisée dans les rapports de levés géophysiques commerciaux, qu'il s'agisse de superposer un canal sur une image satellite ou une carte topographique. Elle propose l'avantage d'être en mesure de localiser rapidement les anomalies sur le levé. Cependant, dans le cas d'un système à haute résolution spatiale comme le système TDEM développé dans le cadre de cette thèse, certaines anomalies à très faible longueur d'onde peuvent être très difficilement représentées (voir la figure 6.10, anomalie A).

Plusieurs logiciels commerciaux permettent d'effectuer cette méthode, en ayant comme paramètres les valeurs minimale et maximale à afficher ainsi que la résolution spatiale souhaitée. Un algorithme simple a cependant été développé et utilisé dans le cadre de cette thèse, puisque l'accès à ces logiciels n'était pas possible. Cet algorithme consiste à faire la moyenne de toutes les valeurs d'un canal dont la position géographique associée se trouve dans un rayon inférieur à un seuil prédéterminé (qui dicte la résolution spatiale souhaitée), pour une matrice rectangulaire de coordonnées géographiques couvrant la surface totale avoisinante au levé, soit de la coordonnée minimale jusqu'à la coordonnée maximale en longitude et similairement en latitude.

Chapitre 5 Améliorations au système : traitement et mécanique

5.1 Remplacement de la plateforme de support en bois contre-plaqué par une plateforme construite de matériaux composites

Comme il a été observé que les vibrations et les déformations de la géométrie émetteur - récepteur induites lors de l'utilisation du système affectent la qualité des données, particulièrement dans des topographiques plus difficiles ou durant le passage entre des obstacles, il a été décidé de consacrer une partie de l'effort de recherche au développement d'une nouvelle plateforme de support du système pour remplacer celle faite de contre-plaqué de taille 1.2 m par 2.4 m, d'épaisseur de 0.95 cm et de masse de 15 kg. Initialement, la plateforme de contre-plaqué était idéale puisque son coût était négligeable et qu'il était facile de la remplacer si elle était brisée. Cependant, son poids élevé et sa faible rigidité sont vite devenus problématiques une fois les premiers tests arrivés. Une plateforme de matériaux composites a été développée, composée de deux épaisseurs de fibre de verre à trois couches (style 7781), entre lesquelles se situe une couche de mousse à haute densité de 96 kg/m³ d'une épaisseur de 4.45 cm. Le poids total de cette plateforme est de 14.1 kg, soit près de 1 kg plus léger que le contre-plaqué et plus de 4 fois plus épais.

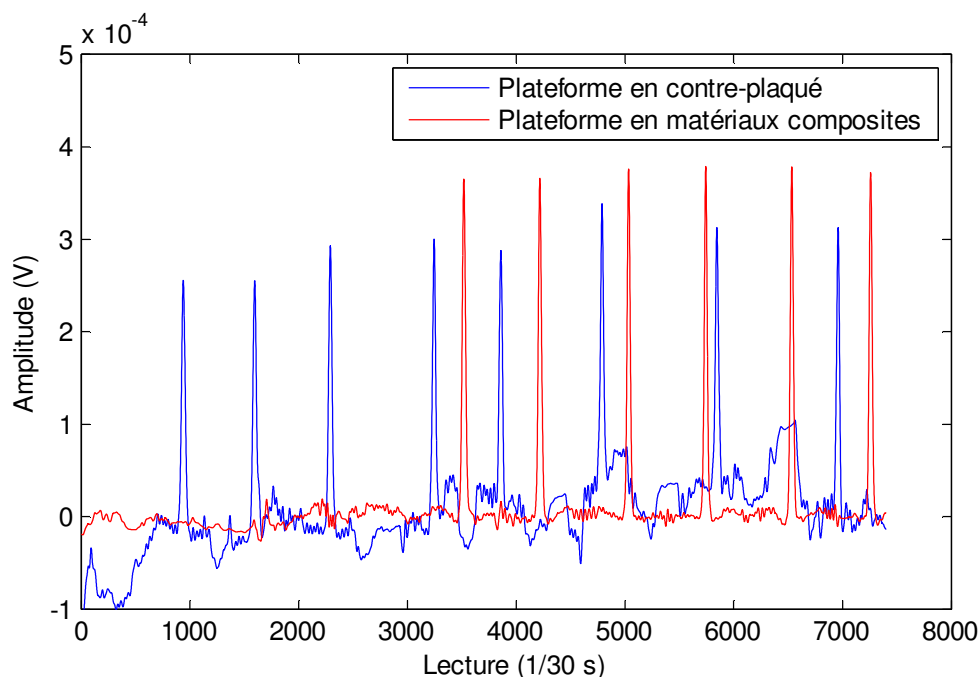


Figure 5.1 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m², canal 30, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible

La figure 5.1 compare deux lectures prises à partir du récepteur 24 m² au canal 30, qui est tôt après la coupure de courant, lors de plusieurs passages consécutifs au-dessus de la cible PH à la marche à une vitesse approximative de 4 km/h, pour la plateforme en contre-plaqué et la plateforme en matériel composite. Les deux profils superposés sur cette figure proviennent de deux enregistrements asynchrones distincts, c'est pourquoi les anomalies présentées sont décalées les unes par rapport aux autres. On observe que le niveau de bruit est réduit d'un facteur d'approximativement 2 ou 3 alors que l'anomalie créée par la cible PH à ce canal conserve un niveau similaire. L'utilisation de la plateforme en matériaux composite offre donc un avantage net face à la plateforme de contre-plaqué en ce qui concerne la qualité des données acquises.

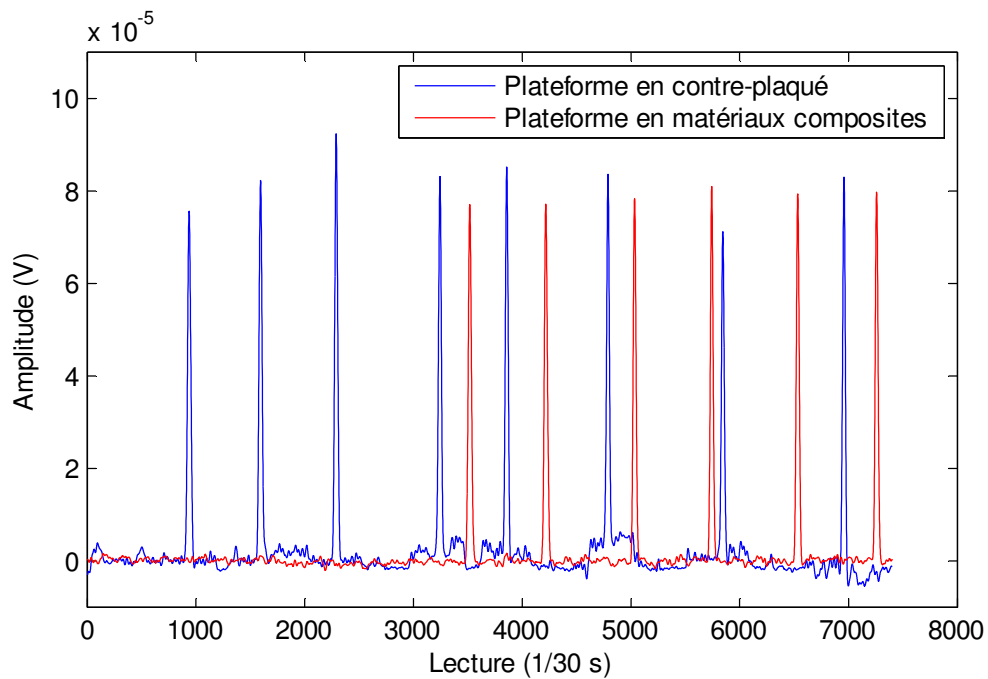


Figure 5.2 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m², canal 60, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible

La figure 5.2 montre l'effet du passage de la plateforme de contre-plaqué à la plateforme de matériel composite pour le canal 60. Bien que l'effet soit moins prononcé à ce moment après la coupure, la plateforme de matériaux composites performe quand même mieux lors du test de passage au-dessus de la cible PH.

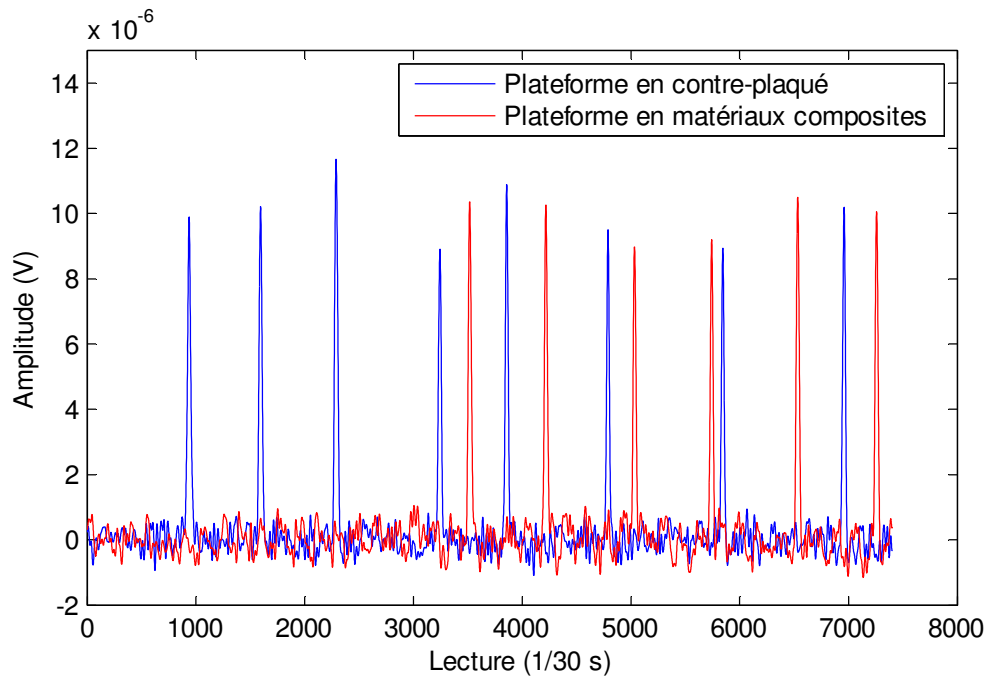


Figure 5.3 Profils superposés avec remise à zéro pour le récepteur 24 m², canal 90, réponse à l'excitation de la cible PH lors d'opération à la marche à une distance verticale approximative de 1 mètre de la cible

La figure 5.3 compare les deux plateformes à l'étude au canal 90, qui est tard après l'impulsion. À ce délai, on n'observe pas de différence évidente entre les deux plateformes.

Les déformations géométriques du système émetteur - récepteur créent un effet fort pour les canaux situés tôt après la coupure mais ne semblent pas créer d'effet direct pour les canaux ayant un plus grand délai. On peut donc s'attendre à ce que toute déformation de la plateforme de matériel composite, lors de forts impacts avec le sol ou des obstacles, se fera ressentir dans les canaux près de la coupure à la fin de l'impulsion.

5.2 Filtrage adaptatif

Lors de levés opérés dans des topographies difficiles, nécessitant de gravir ou passer à travers des obstacles, il est fréquent d'avoir à incliner le système d'un côté ou de l'autre de

façon temporaire, en plus de faire subir au système des collisions avec les obstacles. Afin de réduire l'effet des inclinaisons autour de l'axe longitudinal et les accélérations subites orientées le long de l'axe longitudinal, il est possible de combiner le signal d'un capteur avec les mesures inertielles.

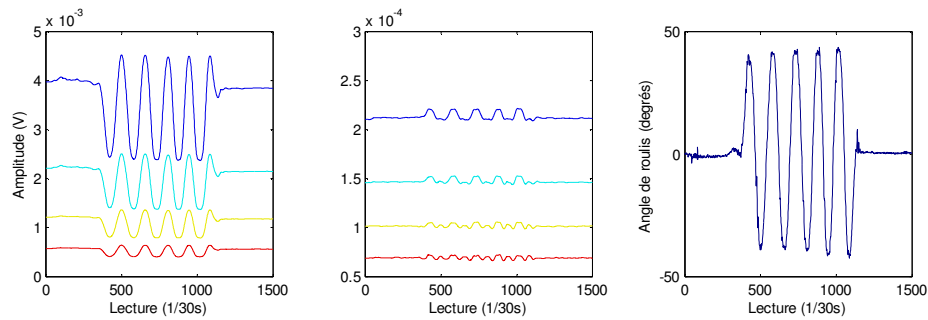


Figure 5.4 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés sans remise à zéro de récepteurs 40 m² (à gauche) et de 12 m² (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur - récepteur (à droite) lors de rotations de la plateforme de support

La figure 5.4 montre un exemple de lectures EM prises au-dessus d'un endroit résistif où le système a été incliné à gauche et à droite d'approximativement 45 degrés à partir de l'horizontale, à cinq répétitions. On observe que le résultat est visible sur tous les canaux, mais l'amplitude de l'effet dépend du canal visualisé. La rotation semble aussi créer des distorsions au niveau du capteur de surface effective de 12 m² dans les canaux tardifs.

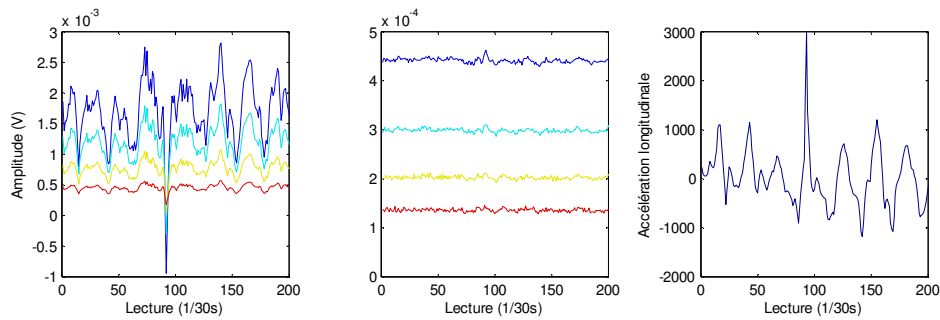


Figure 5.5 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés sans remise à zéro de récepteurs 40 m² (à gauche) et de 12 m² (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur – récepteur (à droite) lors d'une collision avec un obstacle dans l'axe longitudinal

À la figure 5.5, on observe l'effet d'un impact avec un obstacle dans l'axe longitudinal avec un arbre d'un diamètre d'approximativement 30 cm alors que le système est opéré à la marche à une vitesse approximative de 4 km/h. L'impact crée un effet de très courte durée et de haute amplitude sur les canaux hâtifs du récepteur de surface efficace de 40 m² mais s'estompe lorsqu'on observe les canaux tardifs. L'effet est cependant moins visible au mêmes canaux du récepteur de 12 m².

Comme il est difficile de prévoir quels seront les effets créés par les changements de rotations ou les accélérations subites, un filtre numérique a été étudié et implémenté, soit le filtre adaptatif NLMS (Normalized Least Mean Square) en configuration de réduction de bruit adaptative (ANC).

Une méthode similaire a été développée et appliquée dans [Dalgaard 2012] afin de filtrer les lectures de résonance magnétique dans le cadre d'études d'eaux sous-terraines. Dans ce cas, les auteurs ont comparé la performance d'un filtre adaptatif au filtre Wiener dans une implémentation multi-canal.

Une méthode simple pour obtenir l'estimation d'un signal corrompu par du bruit additif est d'insérer ce signal à l'entrée d'un filtre à coefficients fixes qui atténue le bruit, tout en affectant au minimum le signal original. Cette méthode est valide lorsque le signal original est stationnaire, c'est-à-dire que ses propriétés statistiques ne changent pas en fonction du temps. Lorsque les statistiques du signal original sont inconnues, par exemple dans le cas où le filtrage de ce signal est effectué en temps réel, il est possible d'utiliser un filtre adaptatif supervisé pour effectuer la réduction de bruit de façon adaptative si l'on a accès à un signal de référence qui est corrélé avec le bruit mais qui n'est pas corrélé avec le signal original. Les coefficients du filtre varieront donc en fonction du signal primaire (signal original corrompu par le bruit) et du signal de référence. L'avantage du filtre adaptatif est qu'il ne requiert que très peu d'information initiale du signal primaire et du signal de référence, en plus de pouvoir s'adapter à des conditions non-stationnaires [Haykin 2002].

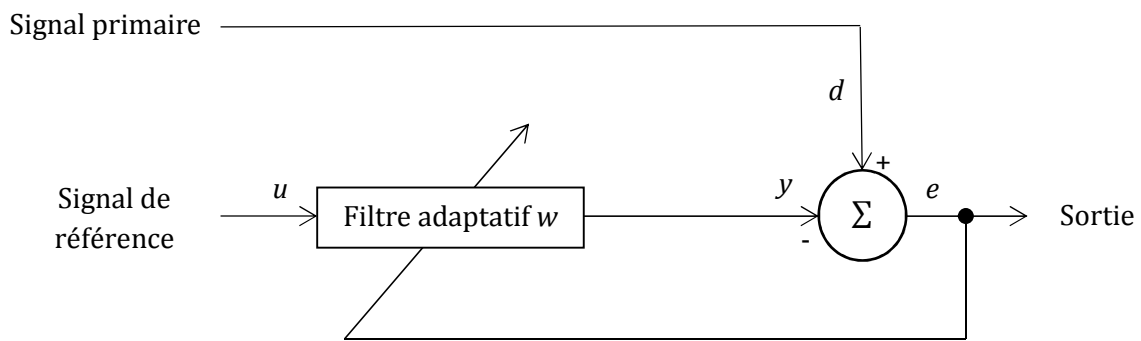


Figure 5.6 Filtre adaptatif en configuration de réduction de bruit adaptative (ANC)

Une des réalisations possibles d'un filtre adaptatif est par l'algorithme LMS. Cet algorithme peut être divisé en deux processus distincts :

1. Filtrage : Dans ce processus, l'entrée $u(n)$ est filtrée par un filtre linéaire non-récuratif et génère une sortie $y(n)$ en plus de l'estimation du signal d'erreur $e(n)$, qui est la différence entre le signal désiré $d(n)$ et la sortie du filtre $y(n)$.
2. Adaptation : Ce processus utilise le signal d'erreur $e(n)$ en combinaison avec le signal de référence $u(n)$ en vue d'ajuster les coefficients du filtre, en fonction d'un facteur d'adaptation μ .

L'algorithme NLMS (Normalized Least Mean Square) diffère de l'algorithme LMS en ce qui concerne le facteur d'adaptation. Ce facteur est normalisé en fonction de la puissance du signal de référence $\|u(n)\|^2$, ce qui permet un ajustement plus facile du facteur d'adaptation μ et une opération plus simple dans les environnements où la puissance du signal de référence fluctue. La méthode NLMS a été retenue dans le cadre du filtrage des données géophysiques, puisque le signal de référence provient d'accéléromètres ou de gyroscopes, qui peuvent fluctuer et avoir un niveau de bruit élevé. Le filtre pourrait aussi faire partie d'un processus de traitement de données en temps réel, puisque sa complexité de mise en œuvre est faible en comparaison avec d'autres méthodes telles que la méthode RLS [Haykin 2002].

L'algorithme de filtrage NLMS est décrit comme suit [Haykin 2002] :

M = nombre de coefficients du filtre

$\hat{\mathbf{w}}(n)$ = vecteur de M coefficients adaptatifs

μ = constante d'adaptation

$\mathbf{u}(n)$ = signal de référence, vecteur de taille $M \times 1$

$d(n)$ = signal primaire (signal original corrompu par le bruit)

$e(n)$ = signal d'erreur

$y(n)$ = sortie du filtre adaptatif

Pour chaque échantillon disponible :

$$y(n) = \hat{\mathbf{w}}^H(n)\mathbf{u}(n)$$

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

$$\hat{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}(n) + \frac{\mu}{\|\mathbf{u}(n)\|^2} \mathbf{u}(n)e^*(n)$$

Dans le cadre de cette thèse, il a été décidé d'implémenter le filtre en configuration de réduction de bruit adaptative avec l'algorithme NLMS en utilisant comme signal de référence l'angle de roulis de la plateforme de support du système émetteur – récepteur et, comme signal primaire, un canal spécifique d'un récepteur.

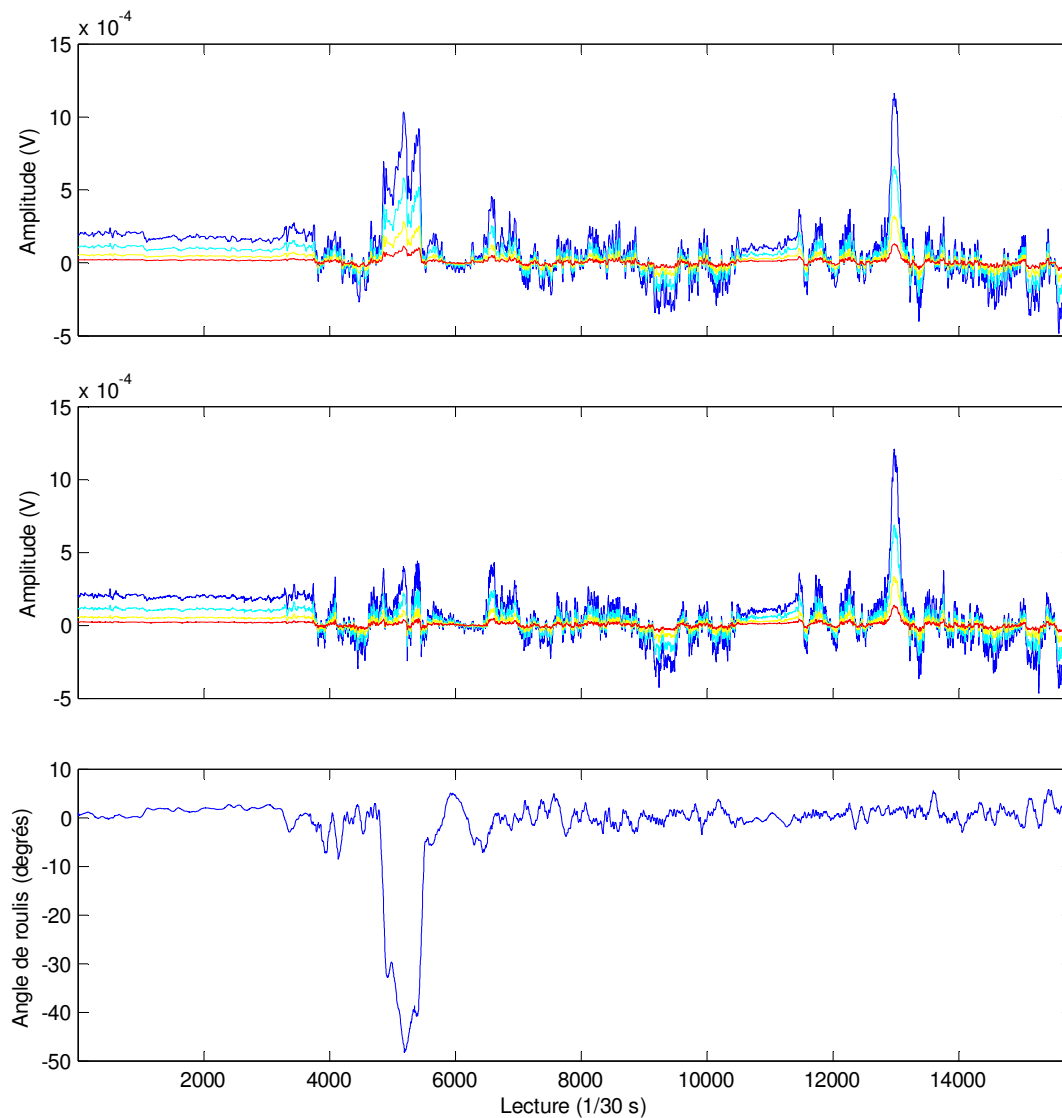


Figure 5.7 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés avec remise à zéro d'un récepteur de 40 m² sans filtre adaptatif (en haut), avec filtre adaptatif (au centre), comparés à l'angle de roulis de la plateforme de support de l'émetteur – récepteur (en bas) lors d'un levé en forêt

À la figure 5.7, on observe le résultat du filtre numérique de réduction de bruit adaptative utilisant l'algorithme NLMS avec une constante d'adaptation μ de 10^{-6} et avec un nombre de coefficients M de 10. Comme la constante d'adaptation utilisée est très basse, les coefficients

du filtre ne convergent pas après un premier passage du filtre sur l'enregistrement entier. Il est donc nécessaire de faire plusieurs passes consécutives, c'est-à-dire que les signaux u et d sont répétés plusieurs fois et le filtre est ensuite appliqué. La figure 5.7 montre le résultat après 200 cycles d'adaptation.

5.3 Corrélation croisée de récepteurs dans des positions longitudinales différentes

Comme le système comporte plusieurs capteurs installés dans un même plan horizontal à des positions différentes, il est possible de mettre à profit cette caractéristique dans le but d'estimer la profondeur d'une cible observée, afin de déterminer s'il s'agit d'une cible culturelle en surface ou d'une cible naturelle plus profonde, sans discriminer l'anomalie selon sa forme d'onde ou son amplitude. Ce résultat sert ensuite à identifier rapidement les réponses générées par des cibles potentiellement très proches du système, qui seront très probablement de nature culturelle.

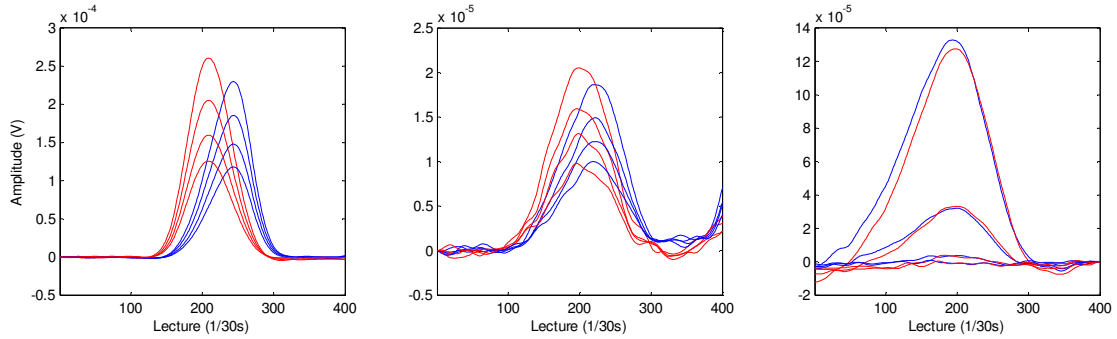


Figure 5.8 Canaux 56, 60, 64 et 68 superposés avec remise à zéro de deux différents récepteurs 12 m² placés à $x=0.16\text{m}$ (en rouge, capteur avant) et $x=-0.16\text{m}$ (en bleu, capteur arrière), lors de passages au-dessus de la cible PH à 30 cm (à gauche), au-dessus de la cible PH à 120 cm (au centre) et au-dessus d'une anomalie naturelle inconnue (à droite)

À la figure 5.8, on observe les canaux 56, 60, 64 et 68 lors de passages au-dessus de différentes cibles. Lorsque la cible est rapprochée, la réponse du capteur avant devance celle du capteur arrière. Plus la distance verticale avec la cible est grande, moins ce délai est élevé, indépendamment de l'amplitude des canaux observés. Il est donc utile de connaître le délai relatif entre les capteurs, pour un groupe de canaux prédéterminés, afin d'obtenir un estimé de la profondeur de la cible observée, lorsqu'il s'agit d'une anomalie simple. Pour ce faire, la corrélation croisée des canaux des deux récepteurs placés sur l'axe longitudinal ayant une distance relative d est calculée et le délai entre la réponse de chaque récepteur est estimée en déterminant la position de la valeur maximale de la mesure de corrélation croisée associée à chaque prise de mesure EM.

La corrélation croisée est une mesure de similarité entre deux signaux observés. Pour deux signaux réels discrets $u_1[m]$ et $u_2[m]$, la corrélation croisée $\phi_{u_1 u_2}[n]$ est définie comme suit :

$$\phi_{u_1 u_2}[n] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} u_1[m+n]u_2[m]$$

Si les deux signaux sont corrélés, un maximum pourra être observé dans le vecteur $\phi_{u_1 u_2}[n]$ et la position de ce maximum correspondra au délai entre les signaux :

$$\tau = \arg \max(\phi_{u_1 u_2}[n])$$

Si les signaux ne sont pas corrélés, le vecteur $\phi_{u_1 u_2}[n]$ aura une forme plate et le maximum ne correspondra pas à un délai entre les signaux. Il est donc important, pour chaque vecteur $\phi_{u_1 u_2}[n]$, d'associer la valeur maximale contenue dans le vecteur. On détermine ensuite s'il existe une corrélation suffisamment élevée pour procéder au calcul du délai si le maximum est supérieur à un seuil, qui est déterminé empiriquement en fonction de l'anomalie et du canal observé.

Comme les enregistrements EM peuvent contenir de nombreuses anomalies les unes après les autres (c'est-à-dire une superposition de plusieurs signaux provenant de plusieurs cibles espacées dans le temps), il est nécessaire de procéder à un calcul de la corrélation croisée sur un nombre plus restreint d'échantillons, plutôt que d'utiliser les signaux entièrement. Il a été déterminé empiriquement que la durée minimale des signaux doit être plus large que les anomalies elles-mêmes mais ne doit pas inclure tout autre anomalie qui pourrait être créée par une autre cible qui serait possiblement à une profondeur différente. La méthode est donc robuste dans le cas d'anomalies simples, mais perd son efficacité si, par exemple, deux cibles de tailles, conductivités et profondeurs différentes sont superposées à la même position géographique.

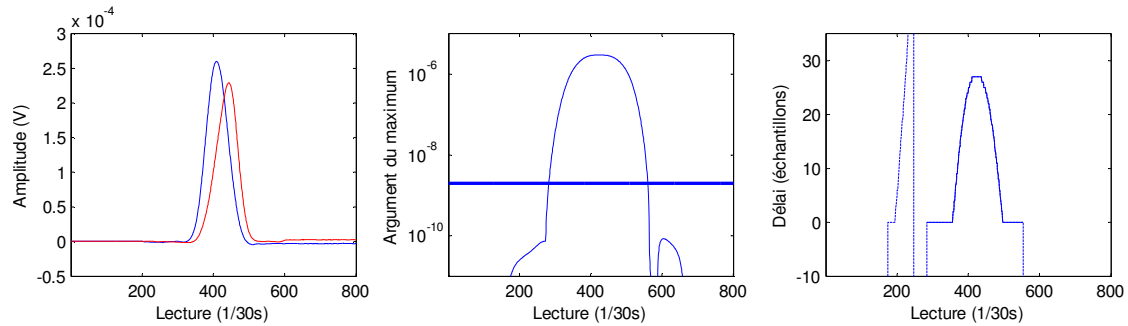


Figure 5.9 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus de la cible PH à 30 cm (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière

À la figure 5.9, on observe un cas où le délai entre les capteurs est très évident. Un calcul de corrélation croisée est effectué pour chaque échantillon EM et utilise des signaux à l'entrée d'une longueur de 151 échantillons, c'est-à-dire que chaque signal utilise les 75 échantillons précédents et suivants. Au centre, on retrouve la valeur maximale calculée pour chaque échantillon. Le seuil est déterminé empiriquement (ligne épaisse). On considère que tout maximum sous le seuil signifie que la corrélation n'est pas assez élevée entre les signaux, comme c'est le cas lorsque qu'aucune anomalie n'est présente et les signaux ne comportent que du bruit. À droite, on retrouve le délai observé pour tous les échantillons dont le maximum dépasse ou est égal au seuil (ligne continue) et dont le maximum est inférieur au seuil (ligne pointillé). Au centre de l'anomalie, le délai est de près de 26 échantillons.

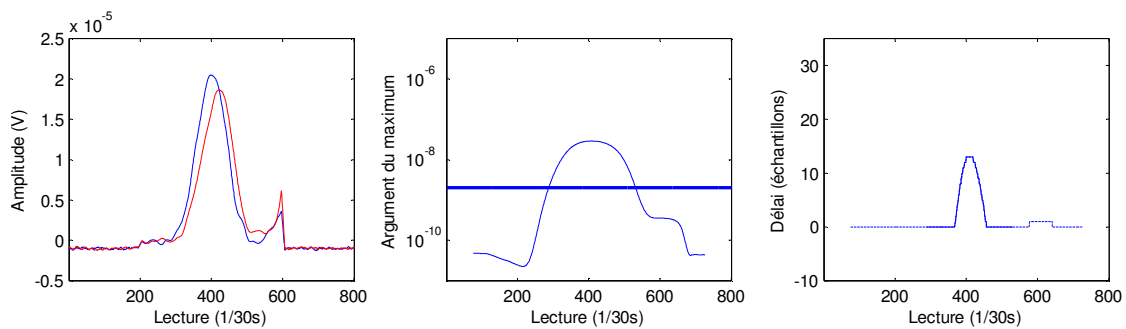


Figure 5.10 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus de la cible PH à 120 cm (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière

La figure 5.10 présente les résultats de corrélation croisée dans un cas où l'amplitude de l'anomalie est près d'un ordre de magnitude plus faible qu'à la figure 5.9, dû à la distance plus élevée entre le système et la cible. On constate que le délai entre les capteurs est aussi plus faible, à 14 échantillons au centre de l'anomalie. La valeur du maximum associé à chaque échantillon est plus faible, ce qui veut dire que la corrélation est moins forte entre les signaux.

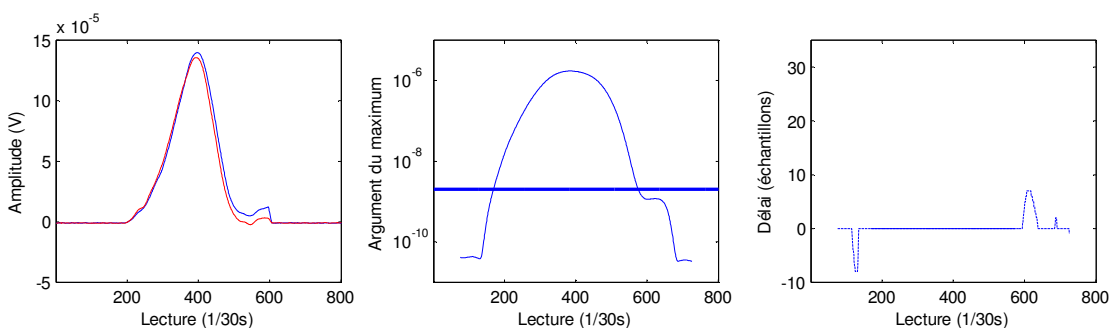


Figure 5.11 Canal 56 remis à zéro des capteurs avant et arrière (respectivement en bleu et en rouge), lors d'un passage au-dessus d'une anomalie naturelle inconnue (à gauche), valeur maximale de la corrélation croisée (au centre) et délai entre les capteurs avant et arrière

À la figure 5.11, on observe la réponse du système lors du passage au-dessus d'une anomalie inconnue. L'amplitude de l'anomalie se situe entre celles de la figure 5.9 et 5.10 et la corrélation entre les signaux est très forte, comme dans le cas de la figure 5.9. Cependant, le délai entre les capteurs est nul, c'est-à-dire que les deux capteurs perçoivent l'anomalie au même moment. On peut donc affirmer que cette anomalie n'est probablement pas reliée à une cible affleurante ou très près de la surface.

Chapitre 6 Levés en environnement de laboratoire et sur le terrain

6.1 Méthodologie de prise de mesures

Une prise de mesures typique de courte durée comporte de nombreuses étapes et nécessite une organisation de l'équipement et du personnel.

En premier lieu, une étape de planification et de préparation est nécessaire avant d'entreprendre tout levé, qu'il soit de nature expérimentale ou commerciale. La planification consiste à :

1. Évaluation des besoins du client / expérimentation
 - a. Zone à couvrir par le levé et coordonnées GPS de la position exacte des endroits où effectuer le levé
 - b. Méthode et coûts associés à la mobilisation, l'accès au terrain et la préparation du terrain
 - c. Permis et autorisations à obtenir (droits de surface et droits miniers)
 - d. Qualité et préparation requise du terrain
2. Préparation du projet et risques encourus
 - a. Étude du niveau de risque relié au personnel : formation, niveau d'expérience
 - b. Étude du niveau de risque relié au terrain : topographie, cours d'eau

- c. Plan d'urgence : contacts d'urgence, suivi quotidien

3. Livrables

- a. Profils à générer
- b. Précision / résolution spatiale requise des données

Une fois la planification du levé terminée, le système est assemblé à l'atelier et un essai d'émission et réception est conduit, afin de confirmer certaines caractéristiques critiques telles la température de l'émetteur et sa puissance, la forme d'onde reçue aux capteurs ainsi que les valeurs des périphériques (GPS, accéléromètres, gyroscopes). Une inspection complète des composantes construites à partir de matériaux composites est aussi conduite afin de déceler toute fissure.

Le système est ensuite transporté au site de test sur une remorque ou dans la boîte d'un camion. Il est possible de transporter le système entièrement assemblé, mais pour des mesures de sécurité, les longerons principaux sont enlevés, et l'émetteur et l'ordinateur d'acquisition sont transportés à l'intérieur du véhicule, ce qui permet aussi de conserver une température plus élevée, réduisant ainsi le risque de condensation des composantes électroniques près des éléments qui génèrent beaucoup de chaleur lors de l'émission.



Figure 6.1 Transport du système au site de levé par véhicule tout terrain, camion ou motoneige

Une fois arrivé près de l'endroit où le levé sera effectué, le système est assemblé et testé à nouveau. On installe et ajuste ensuite les harnais de support des deux opérateurs.

Les opérateurs se dirigent ensuite vers l'endroit où le levé est conduit. Dépendamment de la facilité d'accès au terrain, il est parfois nécessaire de marcher longtemps jusqu'au moment où le levé commence. Le système demeure éteint durant cette période afin de conserver une autonomie suffisante pour conduire le levé. Le levé est ensuite effectué en suivant des lignes qui sont normalement déjà défrichées et identifiées par des drapeaux de couleur rouge ou orange. La durée d'un levé est limitée par la tension des batteries ou l'état de fatigue des opérateurs. Il est donc possible de recharger les batteries de l'émetteur à partir d'une petite génératrice qui, par exemple, peut être placée au début ou à la fin d'une ligne pour éviter d'avoir à retourner à l'endroit où le véhicule est stationné. Cette période d'arrêt permet aux utilisateurs de se reposer et de planifier les prochaines étapes du levé.

Une fois le levé complété, le système est démonté et retourné à l'atelier. Les données sont copiées sur un disque dur externe et sont ensuite transférées à l'ordinateur où elles seront traitées. Le traitement initial est effectué de façon non-supervisé et le temps de traitement est approximativement le même que le temps d'enregistrement, dû à l'enregistrement de la forme d'onde complète des récepteurs. Les données sont ensuite présentées et analysées sous forme de canaux et, en fonction du niveau de bruit obtenu, des types de cibles, de la connaissance acquise de la géologie, de la longueur d'onde et de l'amplitude des anomalies, un traitement supplémentaire peut être complété, tel que décrit aux sections 4.2 et 4.3. Chaque canal peut être affiché sur une échelle de couleurs superposée à une carte topographique ou une image satellite géo-référencée en vue d'obtenir une meilleure compréhension du levé. Certains canaux ont été choisis (60, 75, 90 et 105) pour la visualisation sous forme de superposition à l'imagerie satellite puisqu'ils couvrent une large

partie de la courbe de décroissance, sont espacés de façon logarithmique et offrent une réponse suffisante lors d'une excitation aux cibles tests tel que décrit à la section 6.2.

6.2 Réponse aux cibles tests

Avec comme objectif de déterminer si le système répond correctement à une excitation due à la présence d'une pièce métallique près d'un capteur, un enregistrement a été effectué où la cible PH a été installée sous le système, en son centre ($x = 0, y = 0$) à des distances verticales variant de 60 cm à 120 cm. Le signal est observé en fonction du délai après la coupure à partir d'environ 300 μ s jusqu'à 11.5 ms, couvrant les canaux 50 à 105.

Objectifs :

1. Observer si le système répond aux excitations créées par le positionnement d'une cible métallique à proximité
2. Déterminer la distance maximale à laquelle le système répond pour une cible précise
3. Effectuer un enregistrement d'une durée de plus de 30 minutes et observer la stabilité du système d'enregistrement des données

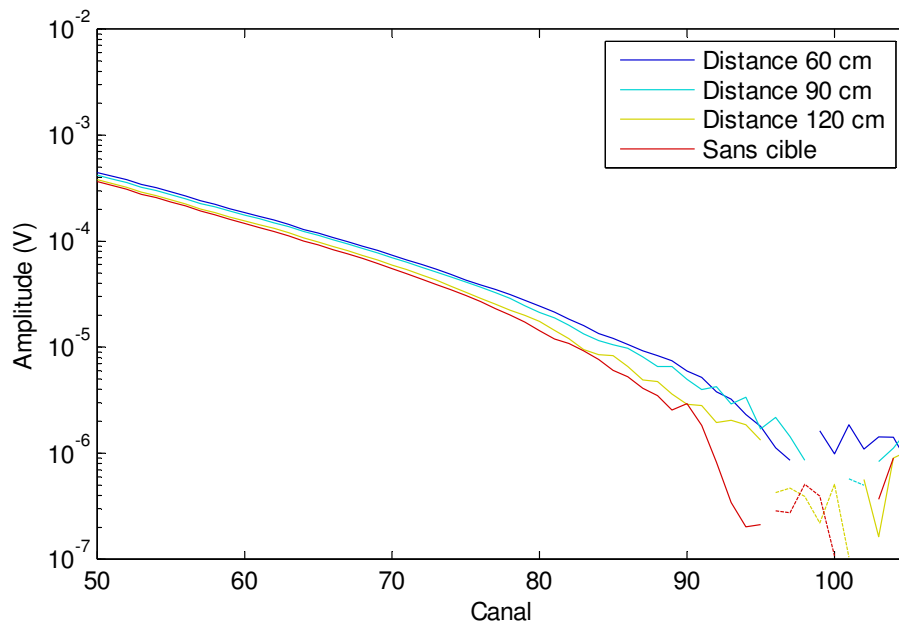


Figure 6.2 Décroissance complète observée par un récepteur de surface effective de 12 m², couvrant les canaux 50 à 105, lors du passage de la cible PH installée sous le système à différentes distances

On observe à la figure 6.2 que la réponse du capteur ayant une surface effective de 12 m² augmente en fonction de la proximité de la cible, et ce pour tous les canaux entre 50 et 95. La réponse est négligeable aux canaux 96 et supérieurs, et on observe d'ailleurs que la moyenne du bruit est près de zéro, ce qui cause l'impossibilité d'afficher ces points sur l'échelle logarithmique. De plus, la réponse de la cible PH à une distance de 120 cm du capteur n'est que légèrement supérieure à la réponse intrinsèque du système dans l'environnement de test, ce qui définit que la profondeur d'investigation du système pour ce type de cible, considérant les conditions de test définis au chapitre 3 (géométrie émetteur – récepteur, courant crête, dimensions de l'émetteur et des récepteurs, etc.) est marginalement supérieure à 120 cm lorsqu'on considère les canaux ayant un délai égal ou supérieur à 400 μ s.

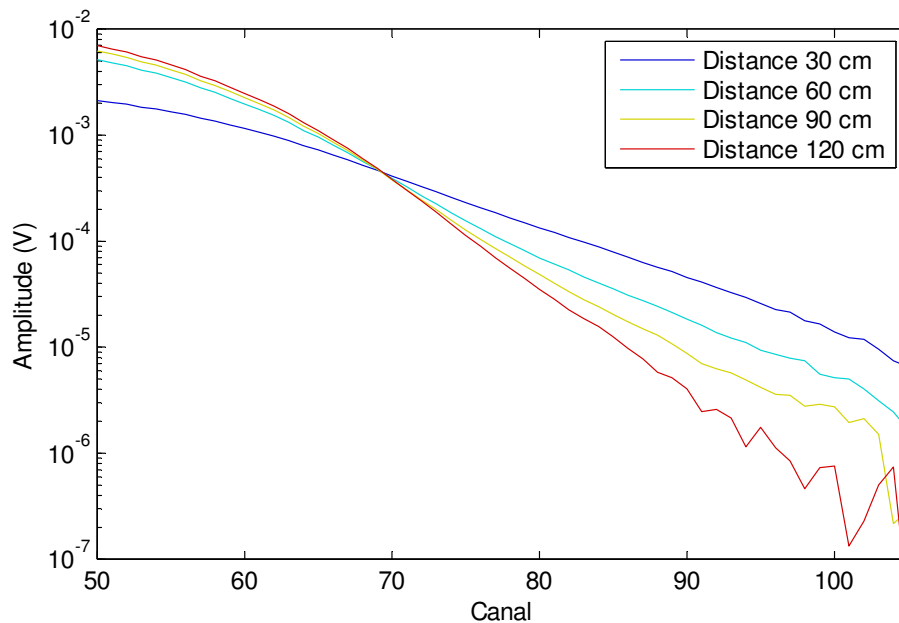


Figure 6.3 Décroissance complète observée par un récepteur de surface effective de 40 m², couvrant les canaux 50 à 105, lors du passage de la cible PH installée sous le système à différentes distances

À la figure 6.3, on observe que la réponse du capteur de 40 m² est modifiée en fonction de la distance de la cible PH de façon très différente qu'à la figure 6.2. L'amplitude des canaux 50 à 68 diminue lorsque la cible est rapprochée (jusqu'à passer du côté négatif lorsque la cible est très proche) alors que les canaux supérieurs à 70 agissent de façon similaire aux canaux du récepteur de 12 m². Un point d'inflexion existe au canal 69, qui n'est pas du tout sensible aux changements de distance de la cible PH dans le cadre de ce test. Ce phénomène pourrait être causé par la superposition de la réponse du champ primaire, qui serait plus élevé que le champ secondaire, dû à la conductivité très élevée de la plaque d'aluminium à proximité. On observe aussi que la courbe de décroissance conserve une amplitude supérieure dans les canaux tardifs, alors que la réponse du capteur de 12 m² est inférieure au niveau de bruit du système après le canal 90.

La différence entre les capteurs pourrait être attribuée à leurs différentes caractéristiques physiques et électriques (résistance, inductance, nombre de tours, etc.) tels que définis et analysés à la section 3.4.

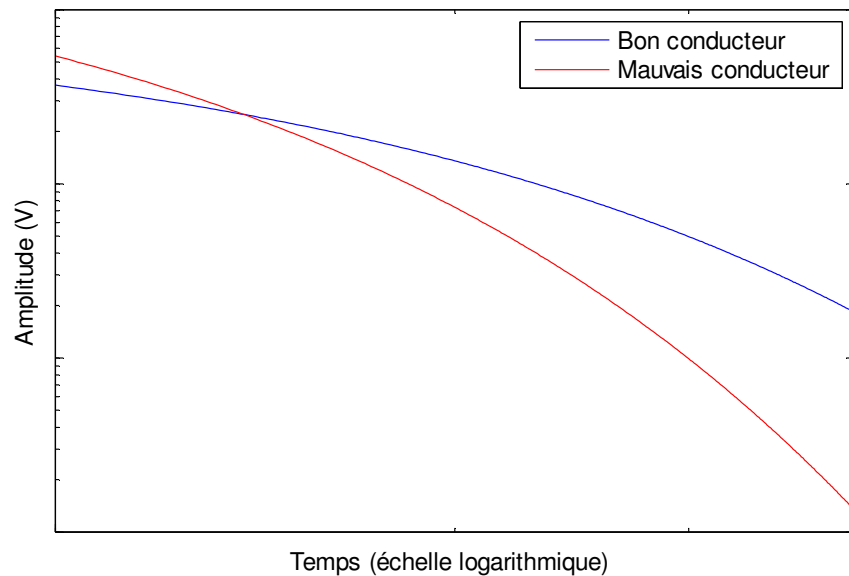


Figure 6.4 Décroissance complète théorique d'un récepteur formé d'une bobine de fil après la coupure du courant associée à un bon et mauvais conducteur, comme défini dans [Nabighian 1991]

La figure 6.4 présente la réponse (tension vue au récepteur TDEM) typique d'un bon et d'un mauvais conducteur, comme à la page 430 de [Nabighian 1991]. Les résultats obtenus lors des lectures avec la cible PH à différentes distances vus par le récepteur de 40 m² sont similaires, considérant que le conducteur rapproché du récepteur serait bon conducteur et deviendrait mauvais conducteur lorsqu'il y serait éloigné. Un enregistrement a aussi été effectué au-dessus des cibles métalliques décrites au tableau 3.4 afin d'observer le comportement du système.

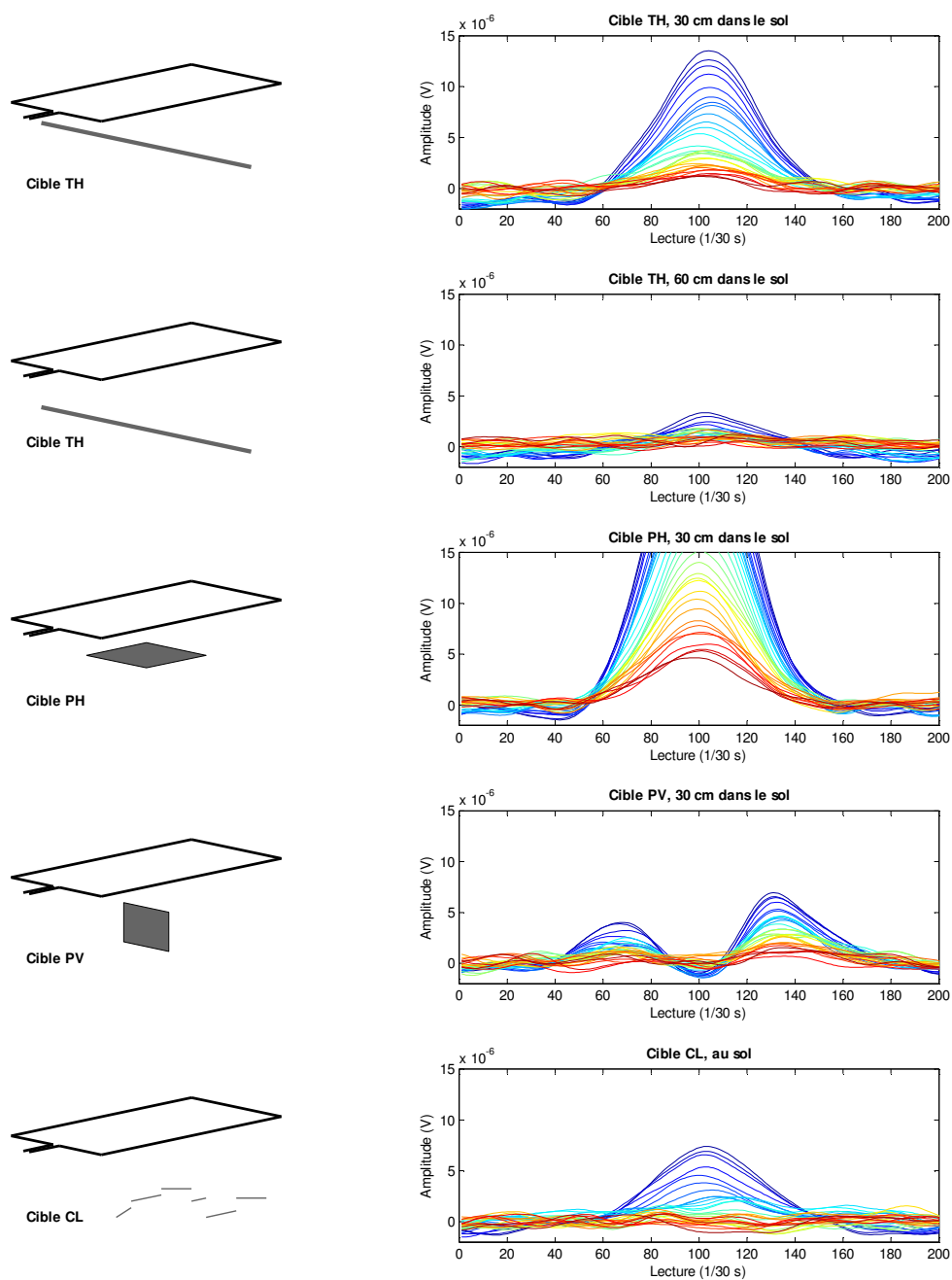


Figure 6.5 Canaux 60 à 90 superposés avec remise à zéro du récepteur 12 m² au-dessus des cibles tests choisies, enfouies dans le sol à des profondeurs différentes

La figure 6.5 présente les résultats obtenus par le récepteur de 12 m² lors du passage au-dessus de différentes cibles métalliques de petite taille. Cette vérification a permis de confirmer que le système émetteur – récepteur répond bien lorsque des pièces métalliques sont installées à proximité, et que la forme, l’amplitude et la largeur des anomalies dépendent de la taille, la distance et la conductivité de la cible.

6.3 Levé du Lac Pipe

Comme une prise de mesure de moyenne ou longue durée était nécessaire au cours du développement du système, un levé a été organisé, le 11 octobre 2012, à proximité de la ville de Fort-Coulonge, Québec, sur le chemin du Dépôt Davidson près du Lac Pipe, avec les objectifs suivants :

1. Observer la réponse du système sur un chemin où pourraient exister des anomalies conductrices ou magnétiques
2. Vérifier la répétabilité du système en faisant deux passes (allé et retour) au-dessus du même chemin
3. Vérifier le bon fonctionnement de l’émetteur, des récepteurs et périphériques lors d’une opération en condition réelle, hors du laboratoire
4. Obtenir un aperçu de la charge supportée par les opérateurs lors d’un levé

L’acquisition des données a été effectuée à l’aide d’un capteur de 12 m². Un chemin de près de 500 mètres a été levé dans les deux directions.

Les canaux montrés ci-dessous sont affichés en fonction du temps, non pas en fonction de la position GPS, puisque ce dernier a connu une défaillance au cours du levé, lors du retour. L’axe des abscisses a donc été ajusté manuellement pour que les profils de l’allé et du retour puissent être comparés.

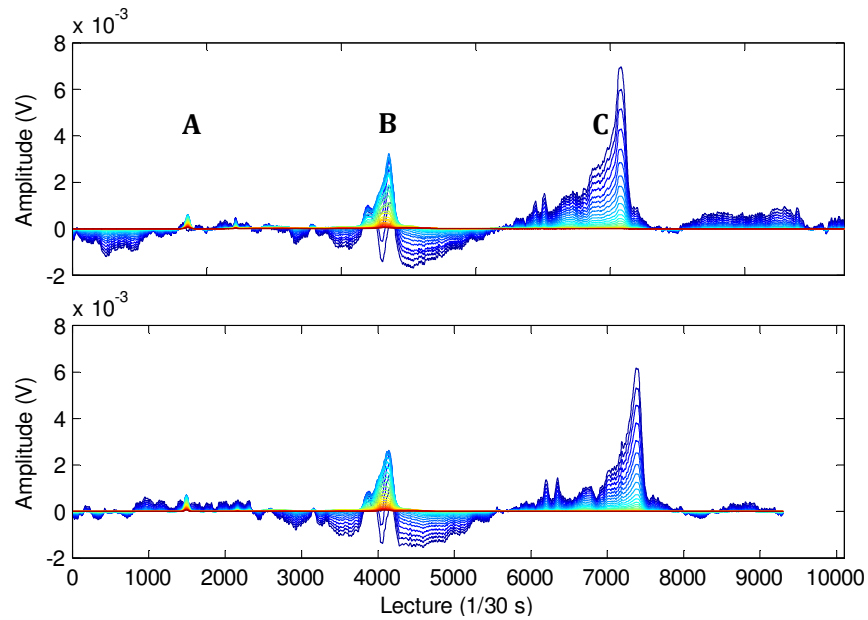


Figure 6.6 Canaux 60 à 90 superposés d'un capteur de 12 m² sans remise à zéro, levé Lac Pipe, aller (haut) et retour (bas)

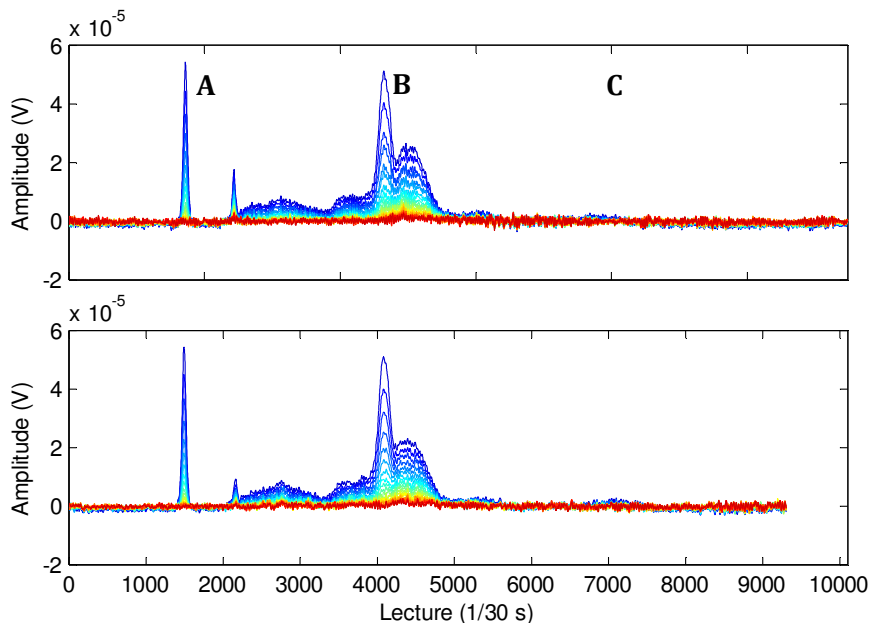
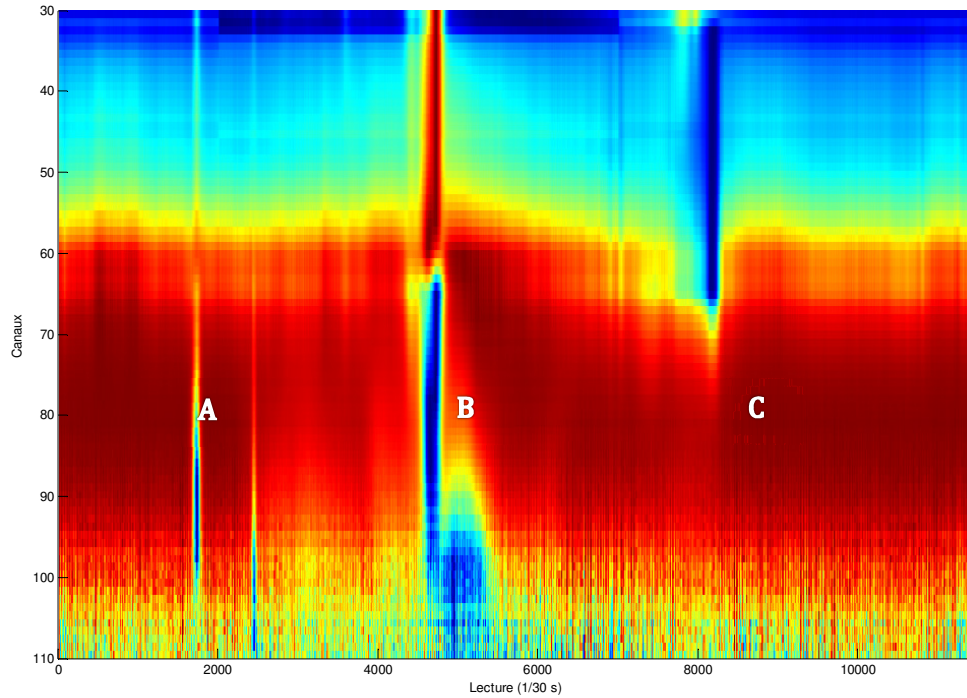
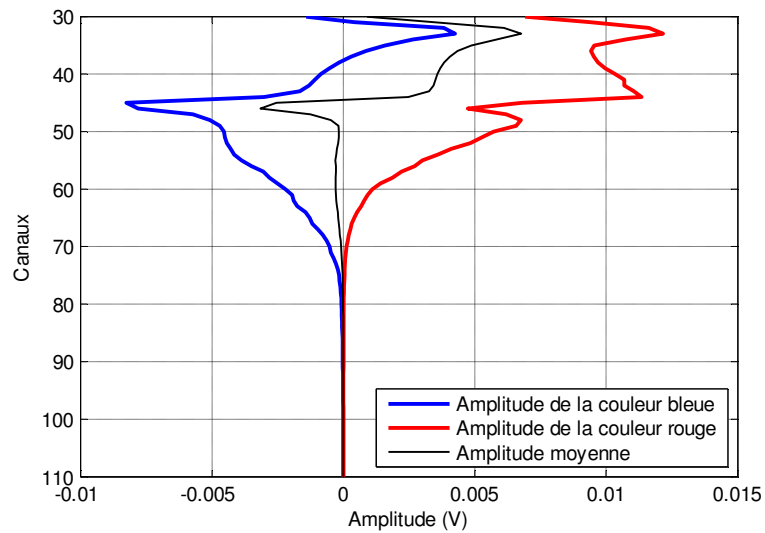


Figure 6.7 Canaux 90 à 110 d'un capteur de 12 m² superposés sans remise à zéro, levé Lac Pipe, aller (haut) et retour (bas)



**Figure 6.8 Canaux 30 à 110 juxtaposés avec échelles de couleurs individuelles, levé Lac Pipe
(aller seulement), avec position des anomalies**



**Figure 6.9 Amplitudes représentées sur l'échelle de couleur selon les canaux, levé Lac Pipe
(aller seulement)**

Il a été observé que trois fortes anomalies sont présentes au long du chemin, nommées A, B et C. L'anomalie A répond fortement dans les canaux ayant un grand délai après la coupure (90 – 110, figure 6.7), mais ne sort que peu du bruit dans les canaux plus près de la coupure (60 – 90, figure 6.6). On pourrait donc l'associer avec un bon conducteur. L'anomalie B répond autant dans les canaux hâtifs que tardifs, mais sa forme d'onde varie de canal en canal en fonction de la position au-dessus de l'anomalie, comme le démontre bien la figure 6.8. Ce phénomène pourrait être relié à un conducteur ayant un pendage dans une direction particulière, ou pourrait aussi être relié à deux conducteurs discrets ayant des profondeurs et des conductivités différentes. L'anomalie C répond fortement dans les canaux débutant tôt mais disparaît complètement à partir du canal 95, elle pourrait donc être associée à un mauvais conducteur.

Ces trois anomalies distinctes révèlent que le système utilisé et développé est sensible aux caractéristiques physiques des conducteurs (profondeur, volume et / ou conductivité) mais pourrait aussi être affecté par des effets paramagnétiques ou de polarisation électrique provoquée par le courant [Nabighian 1991, 450-453]. L'anomalie B présente aussi une amplitude de signe inverse dans les canaux 60 – 65, ce qui pourrait aussi être lié à l'effet de polarisation provoqué [Walker 1988].

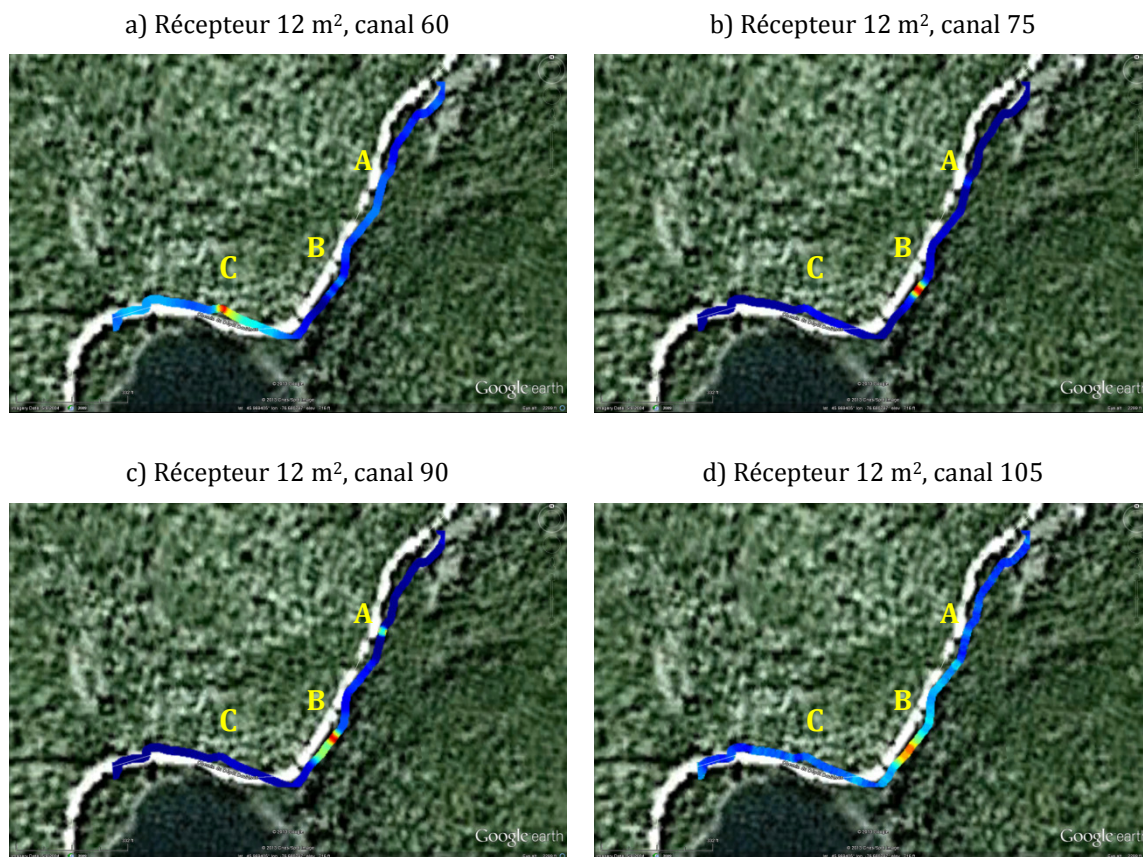


Figure 6.10 Canaux d'un récepteur de 12 m² superposés à l'imagerie satellite, levé Lac Pipe, aller seulement, canaux 60 (haut, gauche), 75 (haut, droite), 90 (bas, gauche) et 105 (bas, droite) avec position des anomalies A, B et C

La figure 6.10 présente l'amplitude des canaux 60, 75, 90 et 105 en fonction de la position GPS acquise lors du levé, surimposée à l'imagerie satellite obtenue par Google Earth™. L'échelle de couleur utilisée afin de représenter l'amplitude de chaque canal n'est pas la même et est définie par les minimums et maximums respectifs de chaque canal, puisque l'amplitude des anomalies varie considérablement en fonction du canal à l'étude. La couleur rouge signifie un maximum alors que la couleur bleue signifie un minimum.

Ce levé a permis de rencontrer les objectifs décrits au début de ce paragraphe, tout en identifiant un problème au niveau de l'enregistrement de la position GPS, qui a pu être résolu par la suite. De plus, il a été possible d'observer de fortes anomalies de différents types, toutes reliées à la géologie locale. Une étude plus avancée de l'endroit, à l'aide d'appareils de mesures géophysiques mesurant d'autres caractéristiques du sol (tableau 2.1) permettrait d'identifier la composition, le volume et la conductivité des anomalies avec plus de confiance.

6.4 Levé sur la propriété Copper

Entre le 4 et le 8 novembre 2012, un levé d'orientation a été effectué sur la propriété Copper, près de Chibougamau, Québec, à la demande de SOQUEM Inc. et de leur partenaire Pan American Silver Corp. L'aide du personnel de SOQUEM a été d'une grande utilité, que ce soit à partir de leur bureau principal ou directement sur le terrain afin de guider les travaux géophysiques.



L'objectif principal de ce levé était la détection et la caractérisation d'anomalies liées à des conducteurs HLEM, sur un réseau de lignes où d'autres méthodes de caractérisation du sol ont été utilisées. Le levé a permis d'observer et de positionner de nombreuses anomalies, en plus de les classer selon un critère simple (faibles ou fortes anomalies). À la suite de ce levé, un rapport d'interprétation a été produit par Marc Boivin, géophysicien, et a été soumis à SOQUEM. Le levé a permis l'acquisition de données géophysiques sur un trajet de 5.25 km linéaires distribué sur 10 lignes, et les deux premières lignes, couvrant un trajet approximatif de 1.4 km linéaire ont été sélectionnées pour être présentées dans le cadre de cette thèse.

L'acquisition des données sur la propriété Copper a aussi permis de cibler plusieurs objectifs de recherche :

1. Effectuer une mobilisation du système sur une grande distance
2. Opérer le système sur une propriété minière, où des lignes parallèles ont été précédemment défrichées
3. Opérer le système dans des conditions commerciales réelles, où la qualité du terrain, la topographie, les zones inondables, etc. pourraient affecter la qualité des données
4. Obtenir des données géophysiques où le bruit serait potentiellement élevé (rotations, collisions) afin d'implémenter les méthodes de filtrage adaptatives
5. Effectuer un contrôle de la qualité quotidien et s'assurer du bon fonctionnement du système lors d'une opération continue sur plusieurs jours

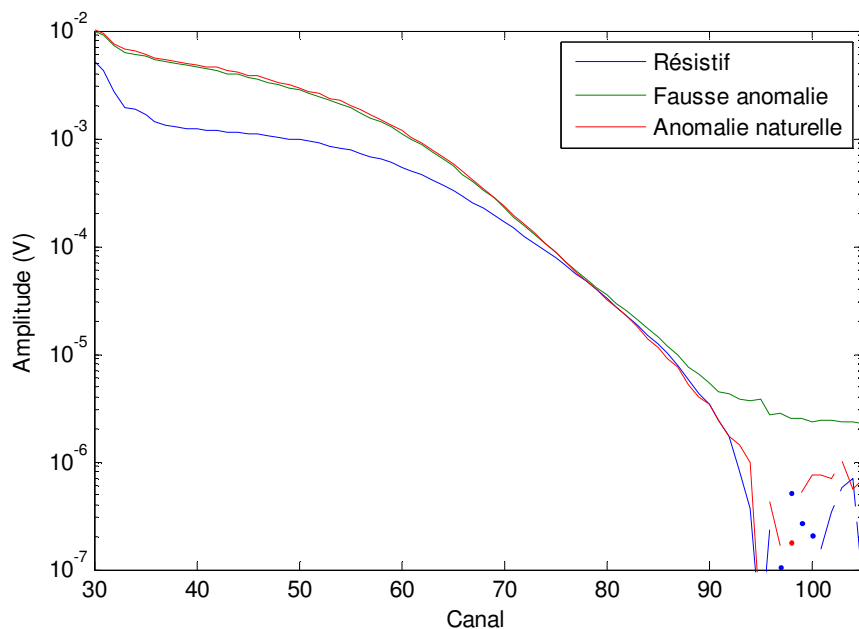


Figure 6.11 Décroissance complète de trois lectures sur le levé Copper (résistif, fausse anomalie créée par une rotation du système et anomalie naturelle)

On retrouve à la figure 6.11 la décroissance complète, couvrant les canaux 30 à 110, de trois réponses distinctes vues lors du levé Copper. En premier lieu, la courbe bleue représente la réponse du système à un endroit résistif, c'est-à-dire à un endroit où il n'y a pas de cible culturelle connue et où la réponse naturelle du sol semble faible. La courbe verte correspond à une lecture alors que le système est en rotation. Le niveau du signal est plus élevé pour tous les canaux entre 30 et 75, et de 85 à 110. La courbe rouge représente enfin une anomalie conductrice réelle, qui avait auparavant été détectée lors d'un levé HLEM précédemment effectué sur la propriété.

Il est difficile de distinguer facilement la fausse anomalie de l'anomalie conductrice naturelle en ce qui concerne les canaux 30 à 75. Le niveau de la décroissance où la mesure prise dans le cas de la courbe verte aurait dû être très similaire au niveau de la courbe bleue (résistif). Ce résultat peut être attribué à la déformation entre l'émetteur et le récepteur qui est causé lors de la rotation.

a) Récepteur 12 m², canal 60



b) Récepteur 12 m², canal 75



c) Récepteur 12 m², canal 90



d) Récepteur 12 m², canal 105



Figure 6.12 Canaux 60, 75, 90 et 105 du récepteur de surface effective 12 m² superposés à l'imagerie satellite, L6N et L5N, sur la propriété Copper

Le levé effectué sur la propriété Copper a permis d'en apprendre davantage sur le système TDEM, particulièrement en ce qui concerne son opération en condition réelles, puisque de nombreuses rotations du système ont dû être effectuées pour passer entre les arbres et de multiples collisions ont été inévitables.

Le levé a permis de cibler de nombreuses anomalies, dont une très forte, visible au centre de la ligne la plus au sud à la figure 6.12 aux canaux 60 et 75. Il a cependant été difficile de discerner, à l'aide du traitement de base des données TDEM, si une anomalie correspondait effectivement à une réponse à une excitation naturelle ou culturelle, ou plutôt à un signal parasite produit par une déformation de la géométrie émetteur – récepteur lors des

collisions avec les arbres et obstacles. Le traitement par filtrage adaptatif présenté au chapitre 5.2 a donc pu être utile afin de qualifier les anomalies créées par excitation électromagnétique de ceux créées par les déformations ou rotations.

6.5 Levé sur la propriété Dussault

Le 19 novembre 2012, un levé test a été effectué sur la propriété Dussault, dont le titre minier appartient à SOQUEM. Cette propriété a déjà fait l'objet de travaux d'exploration minière (géologie, géophysique et forages) qui a permis la découverte de nombreux indices minéralisés riches en zinc, cuivre et or. Trois objectifs particuliers étaient ciblés lors de ce levé :

1. Acquérir des données TDEM et FEM au-dessus d'un chemin où les travaux historiques indiquent la présence de conducteurs géologiques.
2. Faire une analyse comparative des résultats obtenus permettant une évaluation des données du système TDEM par rapport aux méthodes conventionnelles
3. Documenter un site pouvant être utilisé dans le futur afin de caractériser les chargements et modifications apportés au système TDEM.

Ce levé a été effectué sur un chemin forestier, où aucun obstacle n'était présent et où le relief était assez plat pour ne pas causer de grands changements d'orientations du système TDEM. Il était donc déjà connu que le niveau de bruit des canaux TDEM devait être plus faible que le levé sur la propriété Copper, où le nombre d'obstacles était élevé.

L'acquisition des données FEM a été obtenue avec l'aide d'un instrument MaxMin II construit par la firme Apex Parametrics. Une séparation émetteur-récepteur de 50 mètres a été utilisée avec des lectures stationnaires enregistrées à chaque 12.5 mètres selon 3 fréquences d'émission, 888 Hz, 3555 Hz, 1777 Hz. Les données ainsi obtenues représentent le

pourcentage du champ EM secondaire selon les composantes réelles (en-phase) et imaginaire (en quadrature).

L'acquisition des données TDEM a été effectuée à l'aide d'un capteur d'une surface effective de 12 m², selon la procédure décrite au chapitre 6.1. La vitesse moyenne lors de ce levé était d'environ 1.1 m/s, ce qui représente approximativement 3300 lectures TDEM par 100 mètres, en comparaison avec 8 lectures FEM par 100 mètres.

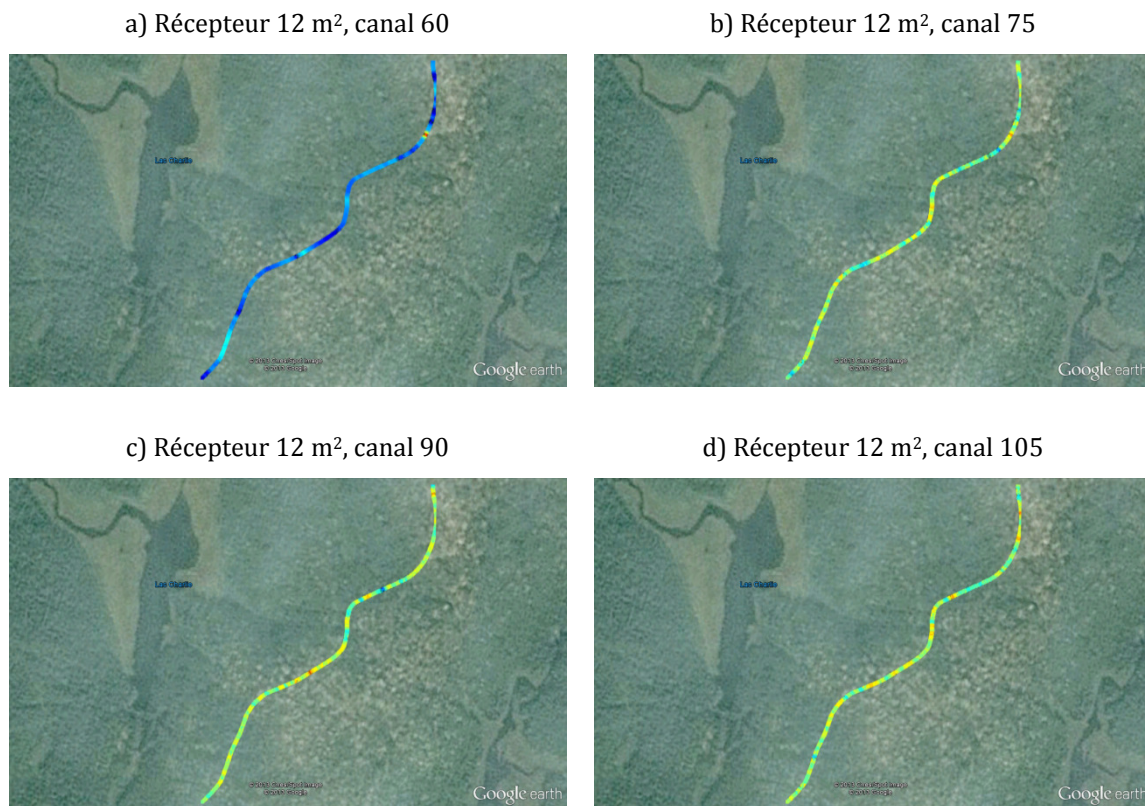


Figure 6.13 Canaux 60, 75, 90 et 105 du récepteur de surface effective 12 m² superposés à l'imagerie satellite, chemin forestier sur la propriété Dussault

La figure 6.13 présente le levé sur la propriété Dussault pour les canaux 60, 75, 90 et 105 du récepteur de 12 m². On observe une réponse forte au nord du levé, visible au canal 60, de très courte longueur d'onde. Cette réponse est cependant invisible dans les canaux tardifs.

Cette méthode de représentation des données permet de localiser facilement l'anomalie sur une carte géographique, mais n'offre cependant pas une vue de tous les canaux TDEM disponibles.

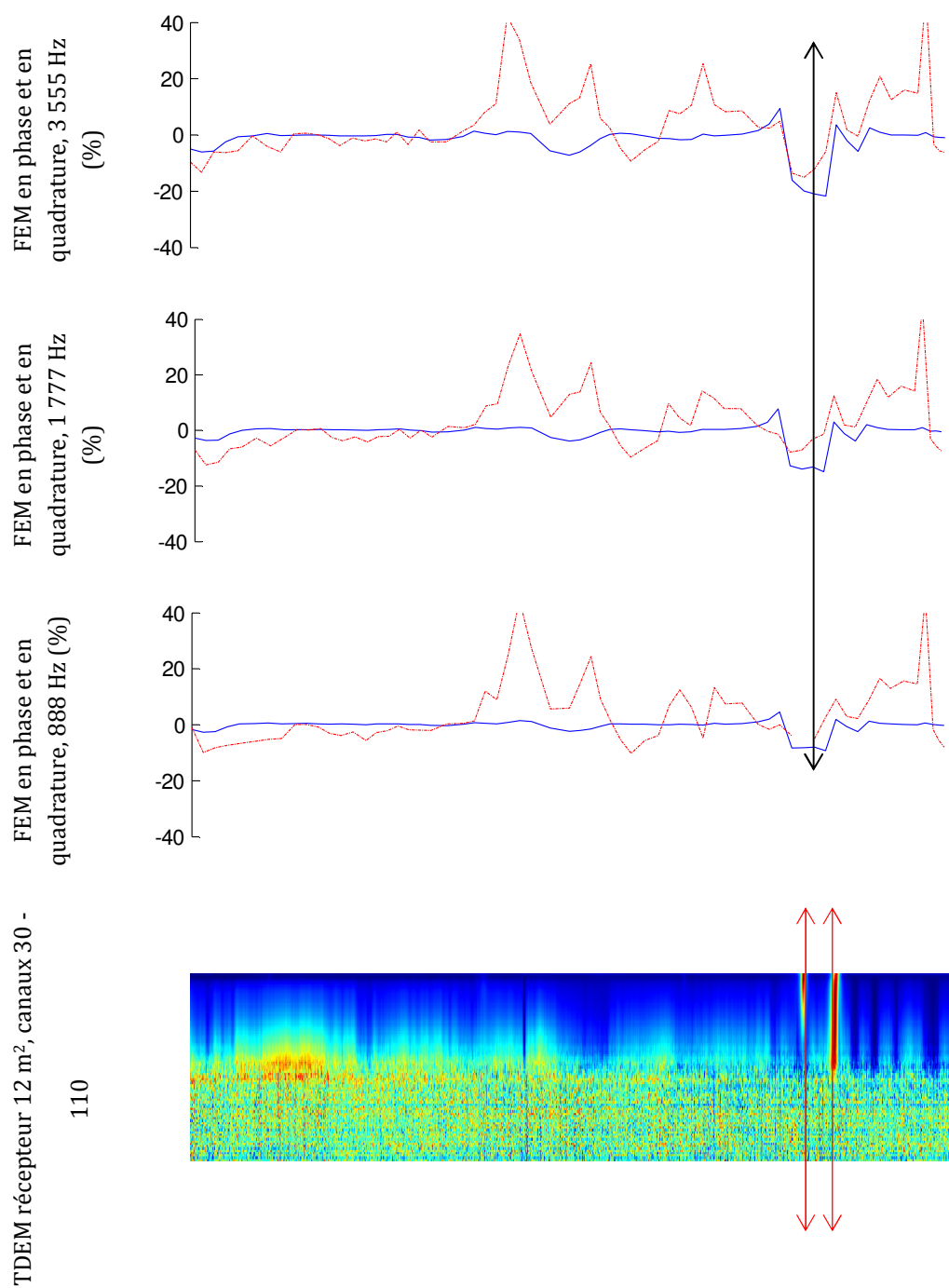


Figure 6.14 Comparaison du levé FEM et TDEM, chemin forestier sur la propriété Dussault. FEM au fréquences 3 555 Hz, 1 777 Hz et 888 Hz, en phase (ligne continue) et en quadrature (ligne pointillée). TDEM acquis avec un capteur de surface efficace de 12 m², canaux 30 à 110 affichés.

La figure 6.14 montre, respectivement de haut en bas, la réponse FEM en phase et en quadrature pour les fréquences 3 555 Hz, 1 777 Hz et 888 Hz ainsi que les canaux 30 à 110 des lectures TDEM du récepteur 12 m².

Les données du levé FEM montrent clairement une inflexion négative dans la partie droite du profil (flèche noire) dans les composantes en phase et en quadrature pour les trois fréquences utilisées. Ce type d'inflexion est caractéristique de la présence d'un corps conducteur de géométrie sub-verticale de qualité moyenne [Boivin 2013].

Les données TDEM montrent deux fortes augmentations des amplitudes sur les canaux 30 à 65. Ce type de réponse pourrait être attribué à la présence de deux corps conducteurs près de la surface, comme démontré dans [Nabighian 1991] à la page 460, ou au chapitre 6.2 de cette thèse, puisque leur réponse est similaire à celle rencontrée lors du passage au-dessus des cibles PH, PV, TH ou CL. Ces deux conducteurs coïncident d'ailleurs avec le conducteur FEM détecté. Notons cependant que la taille des cibles utilisées au chapitre 6.2 est beaucoup plus faible que les cibles géologiques recherchées, et que leur position est très rapprochée par rapport au système.

Ces deux corps conducteurs n'ont pu être bien définis avec le levé FEM à cause de la faible résolution spatiale de la méthode. Par contre, ils démontrent clairement la haute résolution spatiale du système TDEM.

Chapitre 7 Conclusions et recommandations

7.1 Conclusions

L'objectif de ce travail était de présenter le développement d'un nouveau système de prise de mesures géophysiques près du sol utilisant la méthode d'impulsion électromagnétique dans le domaine du temps, le traitement des données acquises lors de tests et sur des propriétés minières, ainsi que le développement de nouvelles méthodes de traitement du signal numérique permettant d'améliorer la qualité du signal tout en conservant la validité au niveau géologique.

Les prises de mesures effectuées dans le cadre de cette recherche ont permis de confirmer que le système répond bien, de façon répétable, à des excitations naturelles et culturelles. Il a été observé que la qualité des données dépend directement des facteurs externes, particulièrement lorsque le système est opéré dans des conditions de terrain réelles, impliquant des changements topographiques, des collisions avec des obstacles et des changements d'orientations afin de passer entre des obstacles. Cette recherche n'a cependant pas permis d'interpréter tous les résultats eux-mêmes, car ce champ d'application relève plutôt de la géophysique et de la géologie et n'était pas le but de cette thèse de maîtrise en génie électrique et en génie informatique.

7.2 Contributions

Le développement des méthodes de traitement numérique (sections 5.2 et 5.3) ont permis d'identifier et de filtrer certains signaux culturels, issus de l'opération même du système ou de cibles métalliques à la surface du sol. Ces méthodes pourront être intégrées aux méthodes standards déjà existantes afin d'améliorer la qualité des données. De plus, les effets créés par les changements des caractéristiques physiques et électriques des capteurs (section 3.4) ont été étudiés et quantifiés dans le cadre de cette thèse, et pourront servir afin de poursuivre la recherche dans ce sens.

7.3 Travaux subséquents

Plusieurs travaux subséquents pourraient être effectués afin de poursuivre la recherche :

1. Acquisition de données supplémentaires, au-dessus d'anomalies où un forage existe afin de lier le résultat obtenu par le système à une ressource connue et confirmée
2. Fabrication de capteurs ayant des bandes passantes autres que ceux à l'étude, et comparaison sur les levés tests du Lac Pipe ou Dussault afin d'observer la sensibilité aux différents types d'anomalies naturelles.
3. Identification d'autres sources de bruit potentielles, principalement pour améliorer la détection de signal dans les canaux ayant un délai élevé après la coupure
4. Changement des paramètres fondamentaux de l'émetteur, tels la longueur d'onde et la puissance d'émission, afin de mieux comprendre l'effet de ces paramètres.

L'expérience acquise lors de la mobilisation et l'opération du système, du traitement des données et du développement de nouvelles méthodes ainsi que l'analyse de données sur des propriétés minières sont aussi un résultat important de cette recherche. Des travaux futurs en recherche et développement permettront d'analyser les résultats acquis depuis le début

du développement du système TDEM, de façon à comprendre et interpréter les résultats de levés afin de pouvoir, dans un avenir rapproché, générer des coupes de résistivité en fonction de la profondeur sur un tracé.

Bibliographie

[Aktarakçi 1997] Aktarakçi, H. K., Harthill, N., Blohm, M. W., "Time-domain electromagnetic survey for gold exploration, Nevada", *Geophysics*, vol.62,no.5:1409-1418, 1997.

[Allard 1999] Allard, M., Bois, D., "La géophysique appliquée à l'exploration minérale", Centre collégial de développement de matériel didactique, 1999.

[Boivin 2013] Boivin, M., Conversation téléphonique, le 15 mars 2013, sur l'interprétation des résultats obtenus par l'appareil de levé Maxmin (méthode FEM) sur la propriété Dussault

[Bower 1999] Bower, R. J., Bidwell, B. A., "Geophysics and UXO detection", *The Leading Edge*, vol. 18:1389-1391, 1999.

[Buselli 2001] Buselli, G., Lu, K., "Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48:11-23, 2001.

[Dalgaard 2012] Dalgaard, E., Auken, E., Larsen, J. J., "Adaptive noise cancelling of multichannel magnetic resonance sounding signals", *Geophysical Journal International*, vol.191:88-100, 2012.

[Daniel 2011] Daniel, A., Downing, B., W., "Investigating the Reprocessing of Carolin Mine Tailings", *Proceedings of Tailings and Mine Waste*, 1-12, 2011.

[Everett 2005] Everett, Mark E. et al., "An experimental study of the time-domain electromagnetic response of a buried conductive plate", *Geophysics*, Vol.70:G1-G7, 2005.

[Hatch 2010] Hatch, M., Munday, T., Heinson, G., "A comparative study of in-river geophysical techniques to define variations in riverbed salt load and aid managing river salinization", *Geophysics*, vol.75,no.4:WA135-WA147, 2010.

[Haykin 2001] Haykin, S., "Adaptive Filter Theory", 4^{ième} édition, Prentice Hall, 2001.

[Høyer 2011] Høyer, A.-S., Lykke-Andersen, H., Jørgensen, F., Auken, E., "Combined interpretation of SkyTEM and high-resolution seismic data", *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.36:1386-1397, 2011.

[Hunter 2008] Hunter, L. E., Powers, M. H., "Geophysical Investigations of Earthen Dams: An Overview", *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, vol.21:1083-1096, 2008.

[Killeen 2009] Killen, P. G., "Exploration Trends & Developments in 2009", *Supplément au The Northern Miner*, vol.96, 2010.

[Mark 1985] Mark, D. G., "Geophysical Report on MaxMin EM, Induced Polarization & Resistivity Surveys on the Congress Property, Gold Bridge Area, Lillooet Mining Division, British Columbia", 1985.

[Nyboe 2009] Nyboe, N. S., Jørgensen, F., "Increased Penetration Depth in TDEM Measurements Using a Segmented Receiver Coil Setup", *Near Surface Geophysics*

[Nyboe 2010] Nyboe, N.S., Jørgensen, F., Sørensen, K., "Integrated inversion of TEM and seismic data facilitated by high penetration depths of a segmented receiver setup", *Near Surface Geophysics*, vol.8,no.6:467-473, 2010.

[Oldenburg 1998] Oldenburg, D. W., Li, Y., Farquharson, C. G., Kowalczyk, P., Aravanis, T., King, A., Zhang, P., Watts, A., "Applications of geophysical inversions in mineral exploration", *The Leading Edge*, vol. 17:461-465, 1998.

[Paine 2010] Paine, J. G., Collins, E.W., "Characterizing oil field salinization using airborne, surface, and borehole geophysics: an example from the upper Colorado River Basin, Texas", *Environmental Geosciences*, vol.28,no.4:193-207, 2010.

[Porsani 2012] Porsani, J. L. et al., "TDEM survey in urban environmental for hydrogeological study at USP campus in São Paulo city, Brazil", *Journal of Applied Geophysics*, vol.76:102-108, January 2012.

[Power 2004] Power, M., Rockel, E., "Geophysical methods for kimberlite exploration in northern Canada", *The Leading Edge*, Vol.23:1124-1129, 2004.

[Pryet 2011] Pryet, A., Ramm, J., Chilès, J.-P., Auken, E., Deffontaines, B., Violette, S., "3D resistivity gridding of large AEM datasets: A step toward enhanced geological interpretation", *Journal of Applied Geophysics*, vol.75:277-283, 2011.

[Reninger 2011] Reninger, P.-A., Martelet, G., Deparis, J., Perrin, J., Chen, Y., "Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 75:264-276, 2011.

[Sattel 2006] Sattel, D., "A brief discussion of helicopter time-domain EM systems", *AESC*, 2006.

[SRK 2010] SRK Consulting (Auteurs inconnus), "Mineral Resource Estimation, Elsa Tailings Project, Yukon, Canada". Rapport préparé pour Alexco Resource Corporation, 2010. URL visité le 12 Janvier 2013 : <http://www.alexcoresource.com/i/pdf/Elsa-Tailings-Tech-Report.pdf>.

[Stettler 2009] Stettler, E. H., "Airborne TDEM by He-filled ballon", *11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition*, 118-121, 2009.

[Tumanski 2007] Tumanski, S., "Induction-coil sensors – A review". *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no.3:R31-R46, 2007.

[Unsworth 2012] Unsworth, M. "Geophysics 424F Course notes on Time-domain EM methods", *University of Alberta*, 2012.

[Vallée 2011] Vallée, M. A., Smith, R. S., Keating, P., "Metalliferous mining geophysics - State of the art after a decade in the new millennium", *Geophysics*, vol.76,no.4:W31-W50, 2011.

[Walker 1988] Walker, G. G., Kawasaki, K., "Observation of Double Sign Reversals in Transient Electromagnetic Central Induction Soudings", *Geoexploration*, vol.25:245-254, 1988.