

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENTS	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1. CADRE DE L'ÉTUDE	2
1.2. PROBLÉMATIQUE	3
1.2.1. Les modèles électrochimiques	3
1.2.2. Champs électromagnétiques	8
1.2.3. Mobilité des ETM	10
1.3. OBJECTIFS	12
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE	14
2.1. LOCALISATION ET ACCÈS	14
2.2. TRAVAUX ANTÉRIEURS	15
2.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	16
2.3.1. Géologie régionale	16
2.3.2. Géologie de la région du Lac Chambois	17
2.3.3. Géologie des dépôts meubles	19
2.4. PHYSIOGRAPHIE	20
CHAPITRE 3 POLARISATION SPONTANÉE	23
3.1. MÉTHODOLOGIE	23
3.2. RÉSULTATS	25
CHAPITRE 4 PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	28
4.1. MÉTHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE	29
4.1.1. Prélèvement des échantillons	29
4.1.2. Séchage et tamisage	30
4.1.3. Contrôle de qualité	31
4.2. MESURES D'EH, DE PH ET DU ΔPH	32
4.2.1. Méthodologie	34
4.2.2. Contrôle de qualité	35
4.2.3. Résultats	37
4.3. POURCENTAGE DE MATIÈRE ORGANIQUE	41
4.3.1. Méthodologie	42
4.3.2. Contrôle de qualité	42
4.3.3. Résultats	43
4.4. CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE EFFECTIVE	44

4.4.1.	Méthodologie	44
4.4.2.	Contrôle de qualité	45
4.4.3.	Résultats	46
4.5.	COULEUR	47
4.5.1.	Méthodologie	47
4.5.2.	Contrôle de qualité	47
4.5.3.	Résultats	47
CHAPITRE 5	ANALYSES GÉOCHIMIQUES	48
5.1.	DIGESTION AU PYROPHOSPHATE DE SODIUM	49
5.1.1.	Contrôle de qualité	50
5.2.	DIGESTION MULTI-ACIDES	53
5.2.1.	Contrôle de qualité	53
5.3.	ANALYSE À LA FLUORESCENCE X	54
5.3.1.	Contrôle de qualité	55
5.4.	VARIABILITÉ LOCALE	56
5.5.	RÉSULTATS DES ANALYSES GÉOCHIMIQUES	57
5.5.1.	Les 3 transects	57
5.5.2.	Les 3 méthodes	62
CHAPITRE 6	ANALYSES STATISTIQUES	64
6.1.	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)	66
6.1.1.	CP1	70
6.1.2.	CP2	77
6.1.3.	CP3	85
6.1.4.	Résumé de l'ACP	93
CHAPITRE 7	INTÉGRATION DES RÉSULTATS	95
7.1.	CONTRÔLES SUR LA MOBILITÉ DES ETM DANS LES SOLS	95
7.2.	APPLICATION DU MODÈLE DE HAMILTON	97
7.2.1.	Indice du lac Chambois	98
7.2.2.	Ligne électrique	100
7.2.3.	Autres contrôles	101
CHAPITRE 8	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	104
8.1.	ÉCHANTILLONNAGE D'HUMUS	107
8.2.	MANIPULATIONS DE LABORATOIRE	108
8.3.	ANALYSES GÉOCHIMIQUES	110
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		112
ANNEXE 1	FICHE D'ÉCHANTILLONNAGE	119
ANNEXE 2	PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	121
ANNEXE 3	ANALYSES GÉOCHIMIQUES	129
ANNEXE 4	PROFILS DES ETM	158

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Modèle de Sato et Mooney (1960) présentant des directions d'écoulement sous-entendues par un centre négatif situé sur le sommet d'un corps minéralisé..... 5
- Figure 2 : Le développement des anomalies cationiques dans les horizons du sol par diffusion vers le haut par de forts courants cationiques. Le modèle est basé en partie sur les interprétations, de Govett (1973) et de Bolviken et Logn (1975), du champ de potentiel d'oxydoréduction qui se développe autour d'un conducteur de sulfures dans le substratum rocheux (tiré de Smee, 1983). 6
- Figure 3 : Modèle de dispersion électrochimique de Hamilton (1998). Les lignes tiretées représentent les gradients d'oxydoréduction, la zone plus foncée au centre correspond à la « colonne réduite » et les « + » sont les cations tandis que les « - » évoquent les anions. Modifié de Hamilton (1998). 8
- Figure 4 : Carte de localisation de la région du lac Chambois à la Baie-James et localisation de l'indice du lac Chambois (étoile grise). La carte géologique provient de Furic et Girard (2008a)..... 15
- Figure 5 : Mise en plan des 3 transects sur fond de polarisation provoquée et de résistivité (Dubois, 2006; Dubois, 2007; Malo-Lalande, 2007). L'indice du lac Chambois est représenté par l'étoile rouge..... 24
- Figure 6 : Graphiques montrant la polarisation spontanée (PS) en mV pour les trois transects en fonction des stations en mètres. L'indice du lac Chambois est représenté par un parallélogramme gris. 26
- Figure 7 : Graphiques montrant a) à droite : le potentiel d'oxydoréduction (Eh) en mV et à gauche : le potentiel hydrogène (pH); b) le pouvoir tampon ΔpH ; et c) le pourcentage de matière organique (%MO) des échantillons des trois profils en fonction des stations en mètres. L'indice du lac Chambois est représenté par un parallélogramme gris. Les deux extrémités des barres d'erreur correspondent aux deux mesures des échantillons d'une même station..... 33
- Figure 8 : Position des échantillons sur le diagramme Eh-pH du système Fe-O-H. $\sum \text{Fe} = 10^{-10}$, 25°C , 10^5Pa (Takeno, 2005). Notez que les échantillon se situent près de la ligne de partage entre le Fe[2+] et le $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ 41
- Figure 9 : Représentation des trois transects par une superposition des teneurs (ppb) obtenues par PYRO-MS (trait rouge), TD-MS (trait bleu) et XRF(trait vert) pour Pb, Zn, Cd, As, Sb et Bi. L'absence de trait indique que cet élément n'est pas détecté par la méthode ou que les mesures se situent sous la limite de détection. 59

- Figure 10 : Mise en plan du profil de l'indice du lac Chambois sur fond de polarisation provoquée et de résistivité (Dubois, 2006; Dubois, 2007). Les lignes grises parallèles orientées à N335° représentent les lignes de coupe qui ont été utilisées pour faire le levé de géophysique au sol. L'indice du lac Chambois est représenté par l'étoile rouge. L'anomalie en Zn analysée par PYRO-MS est représentée par la courbe bleue, les résultats de PS au-dessus du profil d'échantillonnage correspondent à la courbe rose et la topographie est illustrée par le trait noir. 61
- Figure 11 : Projection des 20 variables sur les deux plans factoriels : a) CP1 / CP2; et b) CP1 / CP3. 69
- Figure 12 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP1 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur. 72
- Figure 13 : Teneur des ETM en fonction du pH. Sont illustrés : a) Mn^{2+} ; b) Zn^{2+} ; c) Zr^{4+} ; et d) Th^{4+} 74
- Figure 14 : Classement des ions selon leur potentiel ionique (z/r). Sont représentés les cations solubles ($z/r < 3$), les hydrolysats ou hydroxydes insolubles ($3 < z/r < 10$) et les oxyanions solubles ($z/r > 10$). Les lignes bleues représentent les périodes du tableau périodique des éléments. Les données proviennent de Goldschmidt (1934) et l'image est de Thiry (2010). 76
- Figure 15 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP2 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur. 78
- Figure 16 : Ensemble de diagrammes expliquant la CP2 : a) Concentration de Rb (ppb) versus la CP2; b) Concentration de Rb (ppb) versus la profondeur des échantillons; c) Concentration de Rb (ppb) versus le pourcentage de matière organique; d) Pourcentage de matière organique versus la profondeur; e) Concentration en Fe (%) versus la profondeur; f) Concentration de V (ppb) versus la profondeur; et g) Concentration de V (ppb) versus le pourcentage de matière organique. 81
- Figure 17 : Mise en plan de la CP2 avec le pôle négatif (points bleu pâle) et le pôle positif (points bleu foncé) sur fond de photographie aérienne. Les coordonnées sont en UTM Nad83, Zone 18. Le pôle négatif de la CP2 réunit principalement les échantillons du TL, situé dans une tourbière, tandis que le pôle positif de la CP2 correspond aux échantillons récoltés sur le TT, dans les sols podzolisés. 83
- Figure 18 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP3 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur. 86
- Figure 19 : Ensemble de diagrammes expliquant la CP3 : a) CEC effective versus le %MO; b) CEC effective versus la concentration de Pb et Ce (ppb); c) %MO versus la concentration de Pb et Ce (ppb); d) CEC effective versus la concentration de Mo (ppb); e) %MO versus la concentration de Mo (ppb); et f) Concentration en Fe (%) versus la concentration de Mo (ppb). 89

Figure 20 : Projection sur fond de photographie aérienne de : a) La CEC effective avec les valeurs les plus faibles en bleu pâle et les plus fortes en bleu foncé); et b) La CP2 avec le pôle négatif (points bleu pâle) et le pôle positif (points bleu foncé). Les coordonnées sont en UTM Nad83, Zone 18. La similarité des profils de CEC et CP3 pour le TT et le TI traduit la forte corrélation entre ces deux facteurs..... 91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyenne des statistiques de base des paires d'échantillons d'une station pour l'Eh, le pH, le Δ pH et le %MO, en fonction des 3 transects : TI (transect de l'indice), TL (transect de la ligne électrique) et TT (transect témoin).....	37
Tableau 2 : Guide d'interprétation des valeurs de CEC, tiré de Metson (1956).	46
Tableau 3 : Synthèse du contrôle de qualité pour les analyses PYRO-MS, TD-MS et XRF.....	52
Tableau 4 : Coefficients de variation moyenne pour chaque ETM des deux analyses XRF.	56
Tableau 5 : Coefficients de variation moyenne des paires d'échantillons pour chaque ETM et pour les 3 méthodes d'analyse.	57
Tableau 6 : Analyse en composantes principales des analyses PYRO-MS effectuées sur les données en log-ratio centré. Le poids des facteurs pour chaque ETM, la variance expliquée et la variance cumulative sont présentés pour les composantes principales (CP).	68
Tableau 7 : Sommaire des facteurs de l'analyse en composantes principales.	94

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP	Analyse en composantes principales
ATDEM	Méthode électromagnétique dans le domaine du temps
CEC	Capacité d'échange cationique
CEM	Champ électromagnétique
CP	Composante principale
CP1	Première composante principale
CP2	Seconde composante principale
CP3	Troisième composante principale
CV	Coefficient de variation
Eh	Potentiel d'oxydoréduction
HFSE	Élément à fort effet de champ (<i>High field strength element</i>)
LFH	Litière-Fermentation-Humification (<i>Litter-Fermenting-Humified</i>)
LC	Logratio centré
LD	Limite de détection
MNRF	Ministère des Ressources naturelles et de la faune
MO	Matière organique
O	Organique
ORP	Potentiel d'oxydo-réduction (<i>Oxydation reduction potential</i>)
PS	Polarisation spontanée
PYRO-MS	Digestion au pyrophosphate de sodium
QC	Contrôle de qualité
SMV	Sulfure massif volcanogène
TDEM	Méthode électromagnétique dans le domaine du temps
TD-MS	Analyse multi-acides
TI	Transect de l'indice Chambois
TL	Transect de la ligne électrique
TT	Transect témoin
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
UTM	Transverse universelle de Mercator
VLF	Très basse fréquence (<i>Very low frequency</i>)
XRF	Fluorescence X
%MO	Pourcentage de matière organique
Δ pH	Pouvoir tampon

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Durant la Seconde Guerre mondiale, le Canada devient un important fournisseur de métaux et d'autres ressources ayant une importance stratégique pour l'effort de guerre des Alliés. Durant cette période, les activités d'exploration étant au ralenti, beaucoup de gisements s'épuisaient sans être remplacés. Après 1945, le pays manifeste alors un regain pour le développement de nouvelles ressources minérales, c'est le début de la première ère moderne d'exploration minérale au Québec. Facilement accessibles, plusieurs grandes minéralisations sont alors découvertes en surface puis exploitées (MRNF, 2012).

Dorénavant, les défis liés à l'exploration sont de taille puisqu'une épaisse couverture de dépôts glaciaires recouvre une bonne partie du territoire jugé favorable à contenir de nouvelles minéralisations. Considérant l'augmentation constante des coûts de découverte en milieu recouvert, il devient impératif de développer de nouvelles techniques pour permettre de détecter des cibles d'exploration sous cette couverture.

L'intérêt pour la pédogéochimie d'exploration s'est développé suite à la découverte de plusieurs anomalies de sols au-dessus de minéralisations enfouies sous une couverture de dépôts meubles (Alekseev et al., 1996; Antropova et al., 1992; Cameron et al., 2004; Goldberg, 1998a; Govett and Pwa, 1981; Mann et al., 2005). Par contre, les processus à

l'origine de la formation de ces anomalies et la façon d'interpréter ces dernières sont encore mal compris. La compréhension de la relation entre la genèse des anomalies pédogéochimiques et les corps conducteurs du socle rocheux pourrait permettre le développement d'une approche plus ciblée dans la réalisation des levés géochimiques. Une augmentation de l'efficacité de la méthode et une diminution des coûts des levés sont anticipés, ainsi que la possibilité de discriminer les corps conducteurs causés par la présence de minéralisation d'intérêt économique (cuivre, zinc ou nickel) versus les zones de sulfures de fer ou de graphite stériles. De plus, l'avènement des appareils d'analyse chimique utilisant des méthodes spectrales permet d'augmenter le nombre d'éléments dosés. Toutefois, le comportement de ces éléments demeure peu étudié. Il convient donc d'améliorer la compréhension des processus sous-jacents à la captation des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols.

1.1. CADRE DE L'ÉTUDE

Ce projet a été développé dans le cadre d'un programme de recherche et développement, initié par l'entreprise IOS Services Géoscientifiques Inc. Les questionnements entourant les processus de dispersion métallique dans l'environnement secondaire ont justifié trois projets aux cycles supérieurs, en partenariat université-entreprise. Deux autres projets viennent ainsi appuyer cette étude : la maîtrise de M. Pierre-Luc Gaudreault (UQAC) qui se concentre sur les processus de fixation des métaux dans le cycle végétal et dans l'humus, et la maîtrise de M. Jordi Turcotte (UQAC) qui vise à préciser la distribution et la source des métaux dans les sédiments de fond de lac.

1.2. PROBLÉMATIQUE

La formation d'anomalies géochimiques dans les sols requiert, outre la présence d'enrichissement des dits métaux dans la roche source, la capacité de libérer les métaux, de les faire migrer, et de les fixer dans le milieu récepteur. Pour que l'anomalie se développe à l'apex de la source métallique, un processus de migration verticale des cations est requis, à l'encontre de l'écoulement vertical vers le bas des eaux de ruissellement et latéral des eaux souterraines. Plusieurs phénomènes de polarisation spontanée (ou potentiel spontané, PS) ont été observés en relation avec des minéralisations sulfurées (Brant, 1948; Sato and Mooney, 1960; Schlumberger and Schlumberger, 1922). Un concept relativement répandu est que la PS générée par l'oxydation des sulfures présents dans le socle rocheux constitue la force motrice de la diffusion des ETM à travers la couverture de dépôts meubles vers le milieu récepteur, du socle rocheux jusqu'au sol. Ainsi, il devrait y avoir correspondance entre la géométrie des zones conductrices détectées par les méthodes électromagnétiques (TDEM, VLF, etc.) ou électriques (résistivité, polarisation spontanée, polarisation provoquée) et l'empreinte pédogéochimique du milieu récepteur (Bolviken and Logn, 1975; Govett, 1973; Hamilton, 1998; Smee, 1983). Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir un modèle électrochimique permettant d'expliquer le mouvement des ETM dans la couverture superficielle.

1.2.1. Les modèles électrochimiques

Plusieurs auteurs (Bolviken and Logn, 1975; Govett, 1973; Sato and Mooney, 1960; Smee, 1983) ont relaté la présence d'anomalies géochimiques attribuées à des processus

électrochimiques au-dessus de corps minéralisés. Des modèles ont ainsi été développés pour expliquer le potentiel électrique lié aux minéralisations, mais aucun n'explique entièrement le phénomène. Une des premières théories suggérait que la PS résultait de la remontée des électrons à travers la minéralisation conductrice causée par un plus grand potentiel d'oxydation près de la surface qu'en profondeur (Sato and Mooney, 1960). Ce modèle dipôle, illustré à la figure 1, impliquait un courant d'électrons entre la zone anaérobie du sol, où il y a une oxydation des agents réducteurs, et la zone oxygénée du sol, où une réduction des agents oxydants s'effectue. Le résultat étant un mouvement net d'ions positifs vers le haut du conducteur (cathode), accompagné du mouvement vers le bas du conducteur (anode) des ions négatifs. Cependant, ce modèle considère un corps de sulfure comme étant un conducteur inerte et ne permet pas d'expliquer le mouvement des ions à travers la couverture post-minéralisation.

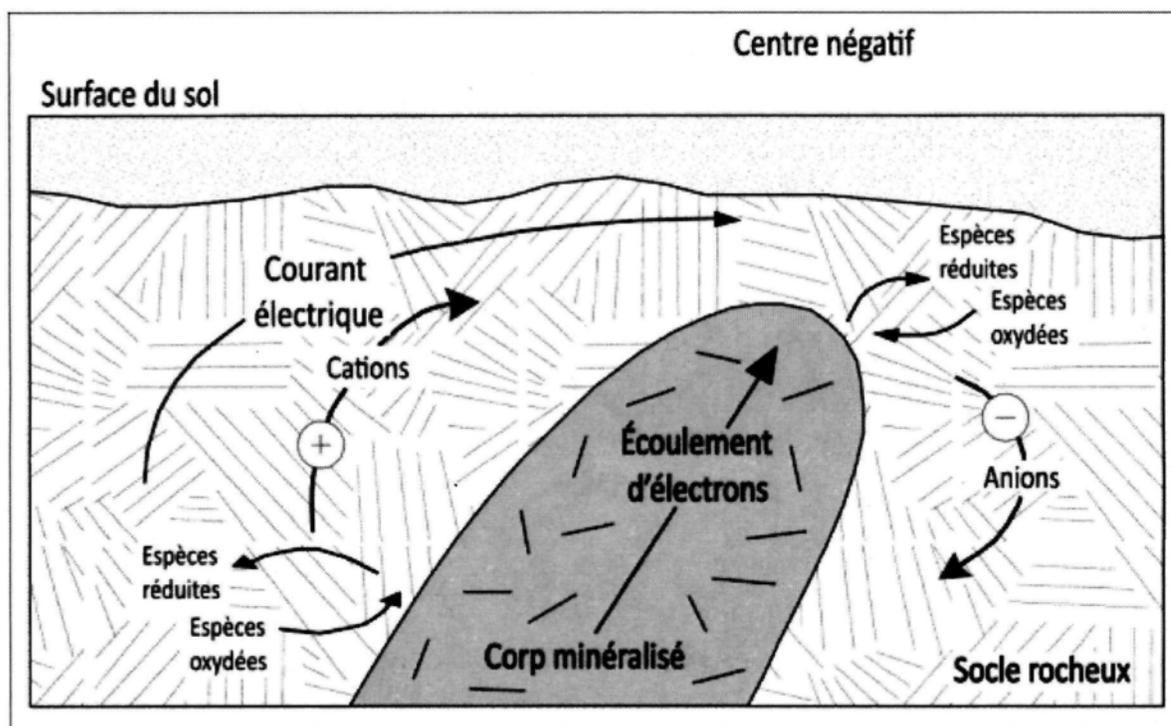


Figure 1 : Modèle de Sato et Mooney (1960) présentant des directions d'écoulement sous-entendues par un centre négatif situé sur le sommet d'un corps minéralisé.

Govett (1973), puis Bolviken & Logn (1975) ont élargi le modèle dipôle de Sato et Mooney (1960) pour y inclure des lignes équipotentielles autour du conducteur. Ces gradients électrochimiques permettent d'expliquer la diffusion chimique des ions vers le haut, du socle vers la surface. Le modèle dipôle de Govett explique les plus fortes concentrations d'ions retrouvées près des flancs du conducteur par une plus grande densité de courant située à ces endroits (Govett, 1976). Le modèle dipôle fourni ainsi une explication aux anomalies symétriques doubles « en oreilles de lapin » fréquemment reportées en marge des corps minéralisés. Smee (1983) a étendu le modèle de cellule électrochimique en suggérant que la résistivité beaucoup plus faible de la plupart des dépôts

meubles par rapport au socle silicaté a pour effet de concentrer le courant ionique dans les unités basales à proximité du substratum rocheux (Fig. 2).

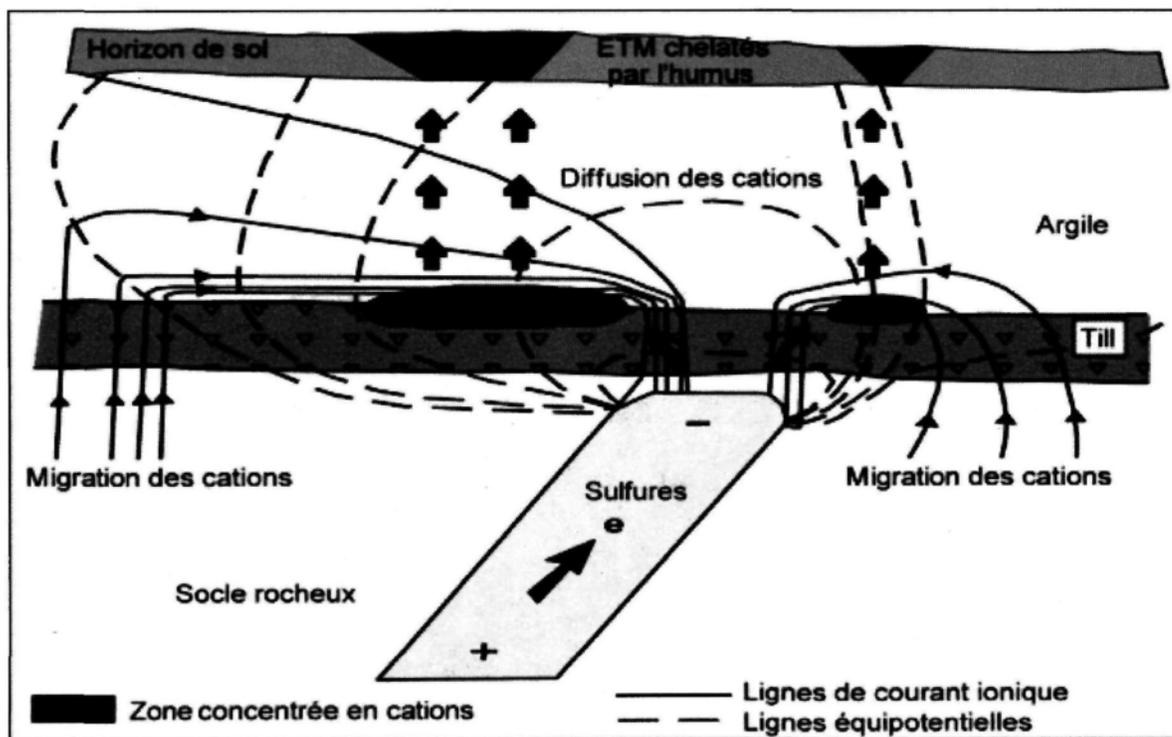


Figure 2 : Le développement des anomalies cationiques dans les horizons du sol par diffusion vers le haut par de forts courants cationiques. Le modèle est basé en partie sur les interprétations, de Govett (1973) et de Bolviken et Logn (1975), du champ de potentiel d'oxydoréduction qui se développe autour d'un conducteur de sulfures dans le substratum rocheux (tiré de Smee, 1983).

Toutefois, dans ces modèles dipôles, la diffusion vers le haut invoquée est peu probable puisque d'après une étude de Smee (1979), le processus de diffusion n'est pas susceptible de créer des anomalies dans des dépôts meubles de plus de 5 m. Cependant, on reporte des anomalies continues au-dessus de dépôts glacio-lacustres de plusieurs dizaines de mètres (Antropova et al., 1992; Ryss et al., 1987). Par ailleurs, la diffusion à travers une épaisse couverture de dépôts de surface aurait tendance à produire des anomalies larges et

diffuses et non des anomalies apicales, centrées sur le conducteur, ou des anomalies symétriques doubles « en oreilles de lapin », centrées sur les flancs du conducteur.

Hamilton (1998) a présenté un modèle de transport des ions à travers les dépôts meubles par diffusion électrochimique (Fig. 3). Ce modèle implique un transport ascendant des ions à travers le sol, le long d'un gradient redox plutôt que le transport dans un champ électrique dipôle induit par les sulfures. Un environnement réduit est ainsi créé par la consommation des agents oxydants dans le sol saturé en eau souterraine, au-dessus d'un corps réducteur présent dans le socle rocheux. Entre le sommet du corps réduit et la table d'eau, un gradient électrochimique vertical existe. Les espèces réduites et oxydées migrent le long de celui-ci. Les réactions d'oxydoréduction se produisent entre les deux et, puisque les oxydants sont limités à la zone phréatique, ils sont préférentiellement consommés provoquant des espèces réduites, et donc une charge négative, pour se propager vers l'extérieur et vers le haut. Ceci s'interrompt à la table d'eau, au-dessus de laquelle les agents oxydants sont abondants.

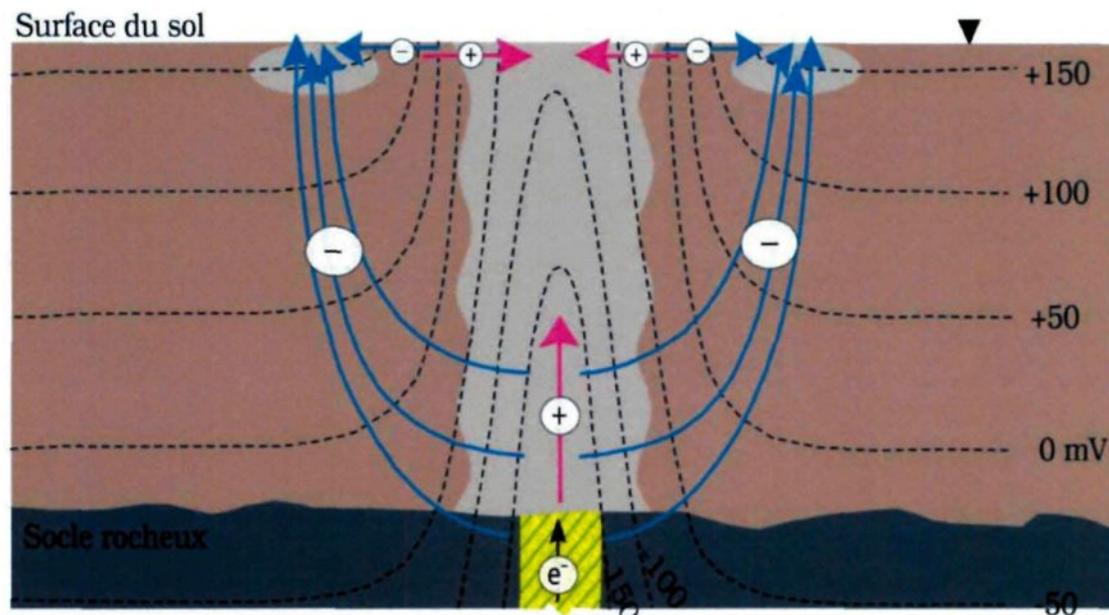


Figure 3 : Modèle de dispersion électrochimique de Hamilton (1998). Les lignes tiretées représentent les gradients d'oxydoréduction, la zone plus foncée au centre correspond à la « colonne réduite » et les « + » sont les cations tandis que les « - » évoquent les anions. Modifié de Hamilton (1998).

1.2.2. Champs électromagnétiques

Les lignes à haute tension sont également associées à des champs électriques et magnétiques (ou champs électromagnétiques, CEM). Ces champs électriques sont produits par des charges électriques, tandis que les champs magnétiques sont produits par l'écoulement du courant à travers les fils.

Au Québec, l'électricité est habituellement livrée dans les résidences en courant alternatif de 60 Hz. L'exception est la ligne Radisson-Nicolet-Des Cantons qui est à 450 kV et en courant continu. Cette ligne de 450kV traverse la zone d'étude et a été essentiellement conçue pour l'exportation d'électricité vers les États-Unis. Le transport d'électricité en courant continu facilite le transit de grandes quantités d'énergie sur de longues distances à

des tensions élevées. Les deux paires de câbles montrent une tension continue par rapport à la terre de plus ou moins 450 kV, soit une différence de potentiel entre les deux conducteurs de chaque paire égale à 900 kV.

Les CEM provenant des lignes à haute tension à courant alternatif peuvent notamment être utilisés pour effectuer des levés de cartographie de la résistivité par méthode aéroportée (Labson and Medberry, 1989). Ces champs peuvent être détectés jusqu'à 20 km de leur source et leur faible fréquence (50 ou 60 Hz) permet une pénétration de la couverture post-minéralisation comparable à la profondeur d'exploration réalisée par les transmetteurs de forte puissance lors de levés électromagnétiques aéroportés. De plus, Vallée *et al.* (2008) utilisent ces mêmes champs pour acquérir des renseignements supplémentaires lors des levés électromagnétiques dans le domaine du temps (ATDEM). L'utilisation des CEM provenant des lignes électriques pourrait théoriquement permettre de repérer des conducteurs géologiques de grande taille et plus profonds que ceux détectés par l'ATDEM, principalement conçu pour détecter les conducteurs superficiels.

C'est sous la ligne à haute tension à courant continu que les champs électriques sont les plus forts, et leur force diminue graduellement en s'éloignant de la ligne. Ainsi, de façon analogue à un courant de PS dans les dépôts meubles, est-ce que les champs électriques d'une ligne à haute tension à courant continu pourraient créer une fausse anomalie pédogéochimique en effectuant une concentration des ETM? Et vice-versa, est-ce que la présence d'une anomalie géochimique associée à un champ électrique anthropique corroborerait la genèse des anomalies sur les corps conducteurs naturels?

1.2.3. Mobilité des ETM

Les ETM, pour être solubilisés requièrent, soit une oxydation, soit un contact prolongé de l'eau d'infiltration souterraine, au contact du corps géologique. Par la suite, pour que l'anomalie se développe à l'apex de la source métallique, un processus de migration verticale des cations est requis, à l'encontre de l'écoulement des eaux souterraines. Ainsi, selon le modèle de Hamilton (1998), c'est le gradient d'oxydoréduction vertical qui permettrait la migration des cations vers la surface du sol. Divers mécanismes existent alors pour fixer ces éléments labiles (libres) dans le milieu secondaire. Ces derniers comprennent la sorption physique et chimique, la précipitation, la chélation et la complexation. De plus, plusieurs phases du sol sont susceptibles de piéger ces ETM, mais les principales sont les oxyhydroxydes de fer et de manganèse, les composantes humiques et fulviques de l'humus et les argiles.

- **Les oxyhydroxydes de Fe et Mn**

Dans la plupart des sols, le fer se trouve essentiellement sous la forme d'oxyhydroxydes insolubles, amorphes ou cristallins. Ces formes sont liées à des teneurs non négligeables en MO complexante, généralement acide, lesquelles dominent dans les sols de climats tempérés ou froids (sols bruns et sols podzoliques), comme ceux présents dans le nord québécois, notamment dans la zone d'étude. Quant aux formes ioniques, solubles ou complexées, elles prennent une plus grande importance dans les sols mal aérés ou très acides comme les tourbières. Le degré de fixation des ETM aux oxyhydroxydes de Fe et Mn varie entre (1) l'adsorption simple à la surface, (2) la coprécipitation et (3) la liaison relativement forte au sein de la structure de

l'oxyde. L'importance relative des oxydes de Fe et Mn pour la fixation des cations dépendra des conditions d'Eh-pH, du degré de cristallinité des oxydes, de leur abondance relative et de la présence d'autres adsorbants tels que la MO (Bonneau and Souchier, 1979; Hall, 1998).

- **La matière organique**

La majeure partie de la matière organique se compose de substances humiques. Elles sont généralement classées en trois groupes: les acides humiques, les acides fulviques et l'humine. Ces groupes sont structurellement similaires, mais diffèrent en poids moléculaire et sur le contenu des groupes fonctionnels. L'humine est un composé insoluble tandis que les acides fulviques et humiques sont des colloïdes susceptibles de migrer dans le sol. Les principales caractéristiques de ces composés sont leur capacité à former des sels solubles et insolubles, de créer des complexes avec les ions métalliques et les oxydes hydratés et d'interagir avec les minéraux argileux. La forte capacité de fixation de ces substances organiques est généralement attribuée à leur groupe fonctionnel d'acide carboxylique (COOH), lesquels contribuent à former des groupes tels que $-NH_2$ (amine) et $-SH$ (thiol) avec les ETM du sol (Schnitzer and Khan, 1972; Stevenson, 1994).

- **Les argiles**

La très petite taille des minéraux des argiles et leur morphologie leur confèrent une surface spécifique importante. La charge électrique de surface de ces minéraux varie en fonction du pH du milieu. Pour un pH bas, les ions H^+ majoritaires se lient à l'argile plus que les OH^- . Il en résulte une charge globalement positive et l'argile se

caractérise par une capacité d'échange anionique. Pour un pH élevé, les ions OH- dominants conduisent au phénomène inverse, et l'argile développe une capacité d'échange cationique (CEC) (Kabata-Pendias and Pendias, 1992).

Les mécanismes de liaison des ETM diffèrent également en fonction de la forme mobile de l'ion, de son abondance et des conditions géochimiques de l'environnement de surface (Goldberg, 1998b). Ceci est sans compter qu'outre le comportement différentiel des divers ions, ces derniers sont en compétition les uns avec les autres pour occuper les sites d'adsorption disponibles. La compréhension de l'environnement secondaire et une meilleure connaissance de la spéciation et des propriétés physico-chimiques des divers ETM deviennent ainsi un préalable essentiel à l'interprétation des données de pédogéochimie.

1.3. OBJECTIFS

Ce projet est construit autour d'un but qui est d'améliorer la compréhension des processus sous-jacents à la déportation et à la fixation des ETM dans l'humus. Afin d'atteindre ce but, cinq objectifs ont été définis :

- 1) Déterminer si un potentiel électrique peut être détecté dans le sol en présence d'un conducteur géologique ou anthropique;
- 2) Tester diverses méthodes d'analyses comprenant un lessivage partiel, une digestion totale ainsi que des analyses à l'analyseur XRF portable;
- 3) Voir s'il existe un lien entre la signature pédogéochimique du milieu récepteur et la présence d'un conducteur géologique ou d'un champ électrique;

- 4) Vérifier si le modèle de dispersion électrochimique de Hamilton (1998) peut être appliqué au terrain d'étude;
- 5) Caractériser les principaux facteurs influençant la fixation des divers ETM dans l'humus, communément appelé « déportation des métaux ».

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. LOCALISATION ET ACCÈS

La région du lac Chambois (Fig. 4) est située sur le territoire de la Baie-James, au Québec. Elle se trouve à une vingtaine de kilomètres à l'est du km 350 de la route 109 reliant les villes de Matagami et de Radisson. Le secteur à l'étude s'étend au nord-ouest du feuillet SRNC 32N15 et est centré à $76^{\circ}53'W$ et $51^{\circ}58'N$ (UTM 370600, 5758800, NAD 27, zone 18), approximativement 6 km au nord du lac Chambois. Il est localisé sur la propriété Pontax de Ressources Sirios.

L'accès à la propriété requiert un transport hélicoptéré. Elle est située à environ 30 km au sud du Relais Routier du km 381. Ce relais routier est situé sur la route 109 à 380 km au nord de Matagami, Québec. Une ligne à haute tension à courant continu d'Hydro-Québec traverse la partie ouest de la propriété. Cette ligne peut être suivie en véhicule tout terrain du Relais Routier du km 381 jusqu'au site d'échantillonnage, mais plusieurs lacs et cours d'eau rendent le chemin difficilement praticable.

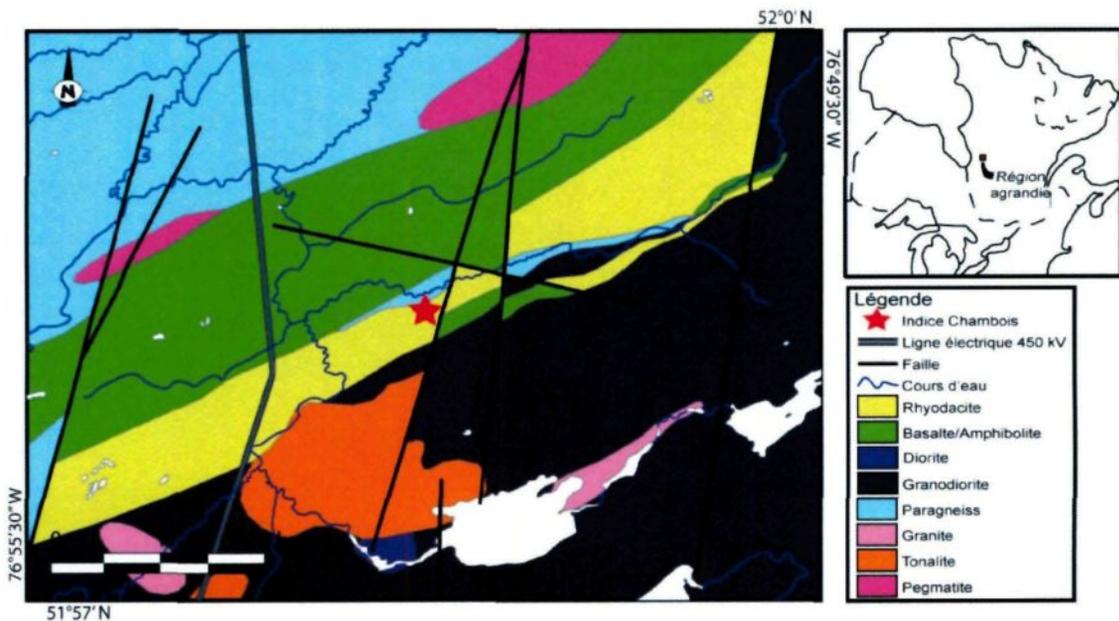


Figure 4 : Carte de localisation de la région du lac Chambois à la Baie-James et localisation de l'indice du lac Chambois (étoile grise). La carte géologique provient de Furic et Girard (2008a).

2.2. TRAVAUX ANTÉRIEURS

La propriété Pontax a été choisie pour la réalisation de ce projet de maîtrise car une grande quantité de travaux d'exploration géologique y a été effectuée. En 2006 et 2007, le secteur a été couvert par une campagne de cartographie régionale et a permis la découverte de l'indice du lac Chambois (Furic and Girard, 2007). Par la suite, des levés de polarisation provoquée ont été réalisés (Dubois, 2006; Dubois, 2007) ainsi qu'un levé aéromagnétique couplé à un levé électromagnétique dans le domaine du temps (Malo-Lalande, 2007). La signature de l'indice du lac Chambois n'est visible que sur le levé de polarisation provoquée et de résistivité. D'autres campagnes de rainurage et de cartographie géologiques ont suivi (Furic and Girard, 2008a; Furic and Girard, 2008b), en plus d'une

campagne de forage de 3107 m, répartis sur 20 sondages (Furic and Girard, 2008c). Cette dernière avait pour objectif de valider des cibles définies par le levé de polarisation provoquée.

De plus, la région de Pontax a été couverte par plusieurs campagnes d'échantillonnage de till afin de valider le potentiel diamantifère et métallique de la propriété (Girard, 2007a; Girard, 2007b; Villeneuve, 2007), ainsi que par une campagne d'échantillonnage de sédiments lacustres (Girard, 2008).

Finalement, une campagne d'échantillonnage de sols a été effectuée en 2006 et 2007 en périphérie de l'indice du lac Chambois (Girard and Fournier, 2008). Un total de 1348 échantillons d'humus a été prélevé sur les lignes de la grille de géophysique, en ciblant les anomalies de polarisation provoquée situées sur ou entre ces lignes. Ce levé a mis en évidence plusieurs anomalies en ETM (Zn, Pb, Fe, Cu, Co, etc.) centrées sur le conducteur principal et, notamment, à l'endroit de l'indice du lac Chambois. Par ailleurs, il a été observé que des teneurs élevées en ETM sont présentes sous la ligne à haute tension (Girard, 2010a). Les échantillons d'humus récoltés ont subi une digestion au pyrophosphate de sodium ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) au laboratoire Activation Laboratories Ltd. (Actlabs) d'Ancaster, Ontario, et ont été dosés par spectrométrie de masse à vaporisation au plasma (ICP-MS).

2.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.3.1. Géologie régionale

La région du lac Chambois se trouve dans la partie orientale de la Province du Supérieur et chevauche les sous-provinces de La Grande et de Némiscau. Elle est centrée

sur une bande volcano-sédimentaire orientée nord-est/sud-ouest. Moukhsil (2000), suggère que cette bande pourrait appartenir à la Formation d'Anatacau-Pivert et aurait été mise en place en milieu marin. La formation d'Anatacau-Pivert est principalement composée de basaltes coussinés et massifs, d'amphibolites à grenats, d'andésites, de rhyolites, de formations de fer, et de tufs à lapilli et à bloc de composition felsique à mafique.

Le sud de cette bande est composé de différents intrusifs appartenant à la Sous-province de La Grande. La composition des roches intrusives s'échelonne de monzonite à tonalite, en plus d'intrusions mafiques à ultramafiques. Elles sont associées à plusieurs épisodes d'intrusion synvolcanique, syntectonique et tardi- à post-tectonique (Moukhsil, 2000).

La Sous-province du Némiscau se situe au nord de la propriété. Elle est représentée dans le secteur par la Formation d'Auclair. Sur le terrain, la Formation d'Auclair comprend des paragneiss et métasédiments localement migmatisés (Furic and Girard, 2008a). Cette formation cède la place vers le nord-est au Complexe de LaGuiche dominé par les métatexites.

2.3.2. Géologie de la région du Lac Chambois

La carte géologique de la région du lac Chambois (Furic and Girard, 2008a) met en évidence la séquence litho-stratigraphique (Fig.1). En général, du sud vers le nord, elle passe d'un massif de granitoïdes polyphasés adossés à des unités volcaniques (séquence bimodale : rhyodacite et basalte) et de méta-sédiments (dominés par des méta-arénites et méta-graywackes à porphyroblastes d'aluminosilicates). L'empilement volcanique est

orienté à N060° avec des pendages moyens de 70° à 80° vers le sud. Il comprend une série de basaltes massifs, localement coussinés et une série de roches volcaniques et volcanoclastiques de composition intermédiaire à felsique. Les volcanoclastites, d'une épaisseur apparente de 100 m, encaissent l'indice polymétallique du lac Chambois et elles sont observées à plusieurs autres endroits au même niveau stratigraphique dans la bande volcanique. Elles montrent une schistosité à laquelle s'associe une zone d'altération phylliteuse (chlorite et séricite), sur laquelle se superposent variablement de la silicification et de la sulfurisation (1-10% pyrite, trace-1% sphalérite, trace-1% chalcopryrite, trace-galène, trace-5% argentite/acanthite, trace-1% argent natif). Cette minéralisation est la cause d'une forte anomalie de chargeabilité tandis que la silicification est interprétée comme la cause de la résistivité (Furic and Girard, 2008c). L'indice du lac Chambois a retourné jusqu'à 1,1 g/t Au, 876 g/t Ag, 0,8 % Pb, 0,25 % Zn sur 4,36 m en rainure (Furic and Girard, 2008b). Ce potentiel a été confirmé lors de la première campagne de forage avec des intersections atteignant 210 g/t Ag, 0,22 g/t Au et 0,4 % Zn sur 4,5 m (Furic and Girard, 2008c).

L'interprétation des forages suggère une minéralisation cupro-zincifère précoce ayant des affinités de SMV distale, à laquelle se superpose une remobilisation plus tardive plombo-argentifère (Furic and Girard, 2008c). Des failles cassantes sont spatialement liées aux zones argentifères et plombifères silicifiées. La géométrie des zones argentifères semble être contrôlée par l'intersection d'une faille avec un niveau sulfuré à sphalérite, chalcopryrite et pyrite. La diffusion de la minéralisation de part et d'autre de la faille est limitée. La minéralisation argentifère est interprétée comme étant une remobilisation d'une

source plus profonde. Finalement, l'association cordiérite + grenat + biotite + quartz tend à caractériser le métamorphisme au faciès amphibolite.

2.3.3. Géologie des dépôts meubles

Durant la dernière glaciation, l'Inlandsis laurentidien occupait le Bouclier canadien avec une épaisseur de 1000 à 2000 m de glace. La chronologie des événements qui se sont succédé lors du retrait du glacier la fin du Wisconsinien supérieur dans la région des basses-terres d'Eastmain (Bostock, 1970) a été décrite dans plusieurs travaux (Dyke et al., 2003; Hardy, 1976; 1977; Veillette, 1994; 1997; Vincent and Hardy, 1979). Les formes profilées et les mesures de stries gravées sur le substratum rocheux présentent une orientation glaciaire sud-ouest correspondant à la dernière direction de l'écoulement glaciaire (Fulton, 1989). Selon Hardy (1976; 1977), une scission de l'écoulement de l'Inlandsis laurentidien aurait eu lieu à l'endroit où l'on observe la moraine interlobaire d'Harricana. Il en aurait résulté en la création des dômes glaciaires d'Hudson et du Labrador. Les lacs Barlow et Ojibway se seraient alors formés par endiguement des eaux entre le front glaciaire au nord et la ligne de partage des eaux au sud. Hardy (1976) propose ensuite deux réavancées de la partie sud-est du glacier d'Hudson dues à des crues glaciaires (Cochrane I et II). Par la suite, après le retrait des glaces entre la péninsule d'Ungava et l'île de Baffin, les eaux marines se seraient introduites par le détroit d'Hudson, entraînant la vidange par vèlage du dôme de glace de l'Hudson. Ceci a conduit à la rupture de la digue de glace formant la limite nord du lac Ojibway et donc à sa vidange catastrophique. Ceci a aussi conduit à un rééquilibrage du profil du dôme de glace du Labrador et à la formation

de la moraine de Sakami (Hardy, 1976). Enfin, ceci a aussi permis l'invasion marine et la formation de la Mer de Tyrrell en bordure des baies de James et d'Hudson. Dans la région d'étude, il en est résulté la stratigraphie quaternaire suivante : les argiles marines recouvrant les formations glaciaires de l'avancée de Cochrane qui elles-mêmes recouvrent les dépôts d'argiles lacustres du lac Barlow-Ojibway (Ballivy et al., 1971).

Les argiles glacio-marines sont de couleur gris-bleuté. Elles sont situées sous la couche de matière organique. Ce type de sol est appelé un gleysol. C'est un horizon d'engorgement formé au niveau d'une nappe aquifère, caractérisé par un sous-horizon inférieur continuellement inondé. Des conditions réductrices y sont créées par la consommation de l'oxygène de l'eau par les micro-organismes. Dans ce type de sol, l'écoulement des eaux et l'élimination/recharge des ions sont très limités et ces conditions favorisent la formation de pyrite, de sidérite et d'argile (Cojan and Renard, 1997).

Quelques dépôts de till remanié sont présents dans le secteur du lac Chambois et sont principalement retrouvés en contact avec des affleurements profilés de faible altitude (Villeneuve, 2007).

2.4. PHYSIOGRAPHIE

Le relief de la région du lac Chambois est celui d'une plaine légèrement inclinée vers la Baie James. Il est caractérisé par des formes profilées et allongées dans la direction du dernier écoulement glaciaire. De nombreux lacs allongés dominent ce secteur, dont le lac Chambois. Les zones marécageuses sont abondantes et, dans l'ensemble, l'hydrographie y est très bien développée. De nombreux ruisseaux méandreaux s'écoulent en direction sud-

ouest, convergeant vers la rivière Enistuwach, laquelle est l'un des affluents de la rivière Pontax.

Le secteur est situé dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousse, une sous-zone de la forêt boréale continue. De plus, le couvert forestier y est peu abondant et composé à 95 % d'épinettes noires en îlots avec, comme espèce compagne, le mélèze laricin. La strate inférieure est occupée par différentes espèces d'éricacées et de sphaignes. Les feux de forêt qui ont sévi au cours de l'été 2005 ont ravagé près de 30% de la végétation du secteur du lac Chambois. Le couvert forestier est interrompu par de nombreuses tourbières et quelques secteurs de la région du lac Chambois présentent toutefois une végétation beaucoup plus mature. Ils sont caractérisés par la présence de nombreuses cuvettes, caractéristiques d'un drainage inefficent.

Les tourbières ombrotrophes sont causées par un bilan hydrique positif qui a mené à la paludification (entourbement) des sols. C'est un phénomène naturel qui prend place graduellement et qui se traduit par l'accumulation d'une épaisse couche de matière organique causée par l'accumulation de la tourbe et le développement de la sphaigne (Simard et al., 2009). Ce sont des milieux humides très pauvres en éléments nutritifs et minéraux puisque leur surface est plus élevée que le reste du paysage. Elles sont isolées de toutes percolations en provenance des terres plus riches en cations de base (Landry, 2008). Le sol et l'eau des tourbières ombrotrophes sont de nature très acides ($\text{pH} < 4$). La couche de tourbe a habituellement plus de 40 cm d'épaisseur et se compose généralement de sphaignes (*Sphagnum*). L'acidification du milieu est principalement due à la présence de l'acide uronique. C'est une substance qui constitue de 10 % à 30 % de la masse sèche des

sphaignes (Clymo and Hayward, 1982) et qui libère des ions H^+ dans le milieu. La forte anaérobie qui y règne ralentit l'activité biologique et retarde la décomposition de la MO. De plus, le déficit marqué en oxygène crée des processus d'oxydoréduction souvent marqué et négatifs (Duchaufour, 1977). Les tourbières ombrotrophes sont en liaison génétique avec les gleys podzoliques humiques qui se trouvent en bordure.

Les podzols sont caractéristiques des sols acides des régions froides et humides (forêt boréale, taïga). La percolation d'eau produit un lessivage important du Ca, Na, K, Fe et Al, détruisant ainsi les argiles. Ceci a pour effet, d'acidifier le sol en surface, de l'appauvrir en MO et de précipiter les métaux en profondeur sous forme de complexes organométalliques. Un sol dit gley podzoliques humiques est un sol podzolique qui s'est formé sous l'influence de conditions de réduction périodique ou permanente au cours de la pédogenèse du sol, comme la présence de la mer de Tyrrell, et le terme humique signifie que l'horizon d'humus est bien développé et atteint environ 10 cm d'épaisseur. L'humus qui caractérise le podzol est de type mor (Système canadien de classification des sols, 1998). En l'absence de Ca nécessaire à la formation de ponts moléculaires entre les molécules humiques et/ou entre celles-ci et les argiles (complexes argilo-humiques), il se forme surtout des acides fulviques, facilement lessivables.

CHAPITRE 3

POLARISATION SPONTANÉE

La polarisation spontanée (PS) est une méthode géophysique passive qui mesure les différences de potentiels électriques générés naturellement dans le sol. La PS peut varier de quelques millivolts à plus d'un volt. Elle est principalement associée aux sulfures métalliques, au graphite et à certains oxydes métalliques. Des mesures de PS ont été effectuées sur le terrain d'étude afin de déterminer s'il y a un potentiel électrique pouvant contribuer au transport électrochimique des ETM (Hamilton, 1998).

3.1. MÉTHODOLOGIE

Trois lignes de PS correspondant respectivement aux trois transects d'échantillonnage du projet ont ainsi été exécutées. Le premier transect est orienté à N335° et recoupe perpendiculairement la zone minéralisée, à proximité de l'indice du lac Chambois, et se nomme le transect de l'indice (TI). Plus à l'ouest, le second transect est orienté à N335° et il constitue un transect témoin (TT). Il a été positionné sur un secteur reconnu pour ne présenter aucune anomalie de polarisation provoquée (Dubois, 2006; Dubois, 2007) et vise à documenter le bruit de fond géochimique. Le troisième transect recoupe perpendiculairement la ligne électrique (TL) à courant continu de 450 kV qui passe sur la propriété. Il est orienté à N286° et couvre une distance de 280 m tandis que les deux

autres transects ont 310 m de longueur. Finalement, lors des mesures de PS, une quatrième ligne a été réalisée 60m à l'ouest de celle du TI. Cette dernière est située sur une ligne de coupe, antérieurement déboisée pour une campagne de polarisation provoquée (Dubois, 2006; Dubois, 2007). Elle correspond à la ligne L12+00E de la grille illustrée sur la figure 5 et passe directement au-dessus de l'indice du lac Chambois.

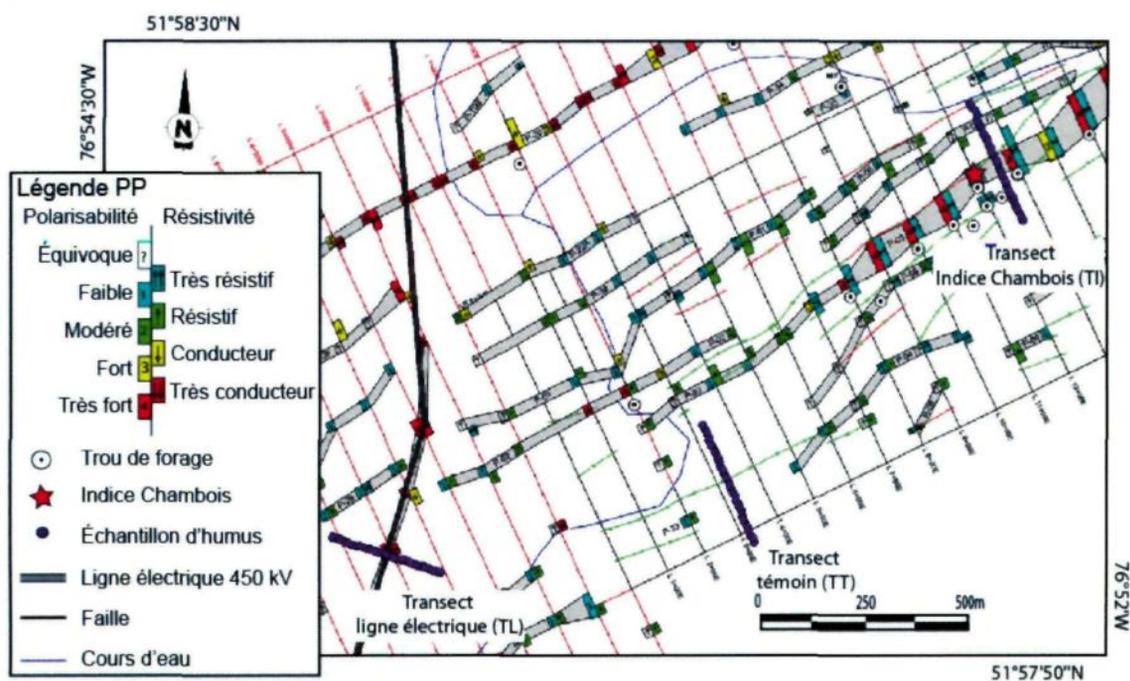


Figure 5 : Mise en plan des 3 transects sur fond de polarisation provoquée et de résistivité (Dubois, 2006; Dubois, 2007; Malo-Lalande, 2007). L'indice du lac Chambois est représenté par l'étoile rouge.

Les mesures de PS ont été prises en suivant la méthode décrite par Burr (1982). Cette méthode implique l'utilisation d'un voltmètre, d'une longue bobine de fil de cuivre isolé ainsi que de pots de céramique poreux remplis d'une solution saturée de sulfate de cuivre qui agissent en tant que deux électrodes non polarisables. Une électrode est laissée à

la station de base et l'autre est avancée le long de la ligne et enfoncée dans les 4-5 premiers centimètres de tourbe à chaque station. Les stations sont positionnées à tous les 10 m le long du transect. Les électrodes sont ensuite connectées ensemble et au voltmètre par le fil de cuivre. Les lectures du voltage sont prises à chaque station et la lecture est reprise lorsque le fil est rembobiné pour permettre une correction de toute dérive de l'instrument ou de la mesure au cours du levé. Par convention, l'électrode négative du voltmètre est connectée au pot situé à la station de base, permettant une réponse négative lorsque l'électrode mobile passe au-dessus de secteurs qui sont chargés négativement, comparativement au bruit de fond sous l'électrode stationnaire.

3.2. RÉSULTATS

Les résultats du levé de PS effectué en juin 2010 sont présentés dans la figure 6. En comparaison avec le bruit de fond, on remarque que les deux profils recoupant l'indice du lac Chambois montrent une nette anomalie négative d'environ -90 mV centrée sur la zone minéralisée connue et forée lors de la campagne de forage 2007 (Furic and Girard, 2008c). Une telle diminution du potentiel spontané est typiquement attendue au-dessus des corps minéralisés composés de sulfures (Sato and Mooney, 1960). De plus, elle paraît uniforme pour les deux profils parallèles et indique la présence d'un champ électrique détectable en surface. Toutefois, lors du levé, un mauvais contact entre le balai et l'arbre de la bobine de fil était fréquent. Cela avait pour effet de donner de fausses lectures de 0,0 ou 0,1 mV sur le voltmètre. Ce problème s'est développé pendant le levé, lors de la prise des mesures de

l'extrémité nord du TI. C'est pour cette raison que les données de PS ne sont pas disponibles pour les 11 stations les plus septentrionales.

Pour le profil témoin et de la ligne électrique, une seule ligne de PS a pu être effectuée à cause du manque de temps disponible sur le terrain. Les mesures de PS de ces deux profils ne présentent aucune anomalie (Fig. 6). L'aspect rectiligne du tracé de PS effectué perpendiculairement à la ligne à courant continu traduit l'absence d'un potentiel électrique dans le sol sous cette dernière. Cela tend à infirmer l'hypothèse de l'influence de ces champs électriques anthropique sur une remobilisation des métaux dans les dépôts meubles.

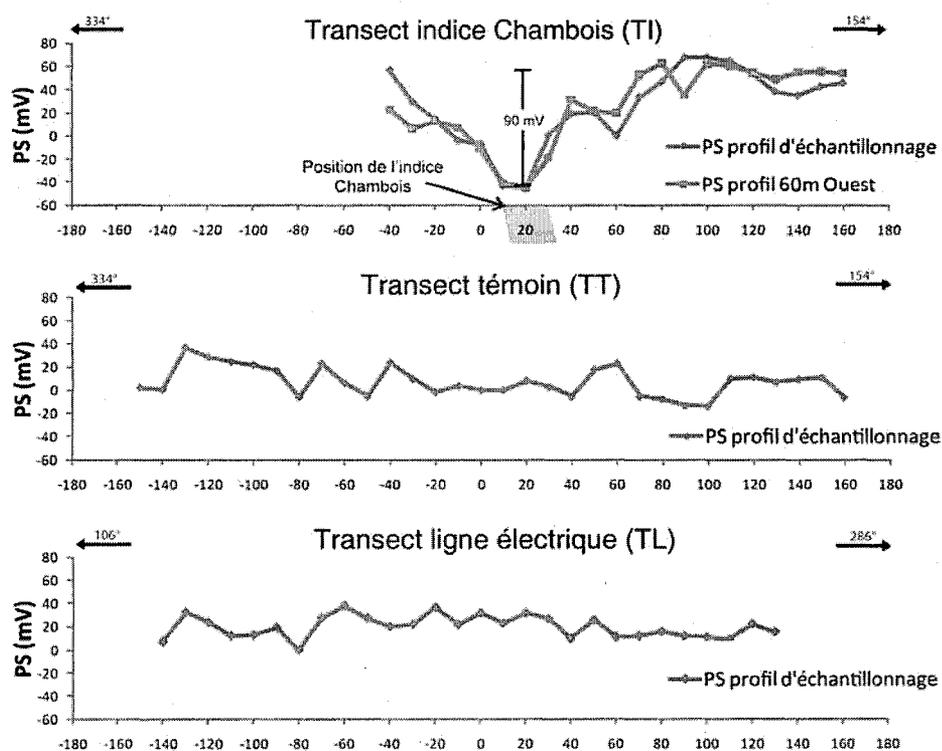


Figure 6 : Graphiques montrant la polarisation spontanée (PS) en mV pour les trois transects en fonction des stations en mètres. L'indice du lac Chambois est représenté par un parallélogramme gris.

Finalement, le bruit de fond de la PS augmente légèrement vers l'extrémité est du TL. La bobine de fil était alors étirée au maximum (210 m), les mesures pourraient avoir été affectées par une dérive (Hamilton et al., 2004a). Les deux extrémités du TT sont également susceptibles d'être affectées par cette erreur puisque les deux électrodes y étaient distancées de 150-160 m. Dans le cas du TI, la distance maximale entre les électrodes avoisine les 100 m, limitant ainsi l'erreur.

CHAPITRE 4

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Plusieurs auteurs (Bolviken and Logn, 1975; Govett, 1973; Govett, 1976; Govett, 1977; Hamilton, 1998; Smee, 1983) proposent un modèle de transport électrochimique des métaux des corps minéralisés vers la surface. Bien que tous ces modèles ne soient pas en accord, ils invoquent tous directement ou indirectement une différence de potentiel d'oxydoréduction en tant que source d'énergie pour favoriser le transport des éléments. Ce processus doit ainsi produire un effet mesurable sur le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et le potentiel hydrogène (pH), puisque d'après le modèle de Hamilton (1998) une colonne réduite devrait être retrouvée dans les dépôts meubles saturés en eaux souterraines au-dessus du corps minéralisé.

De plus, d'autres facteurs quantitatifs et qualitatifs peuvent fournir des renseignements importants sur le comportement physico-chimique d'un sol. Les mesures du pouvoir tampon (ΔpH) montrent la capacité du sol à résister aux variations de son pH. La teneur en matière organique (%MO) est une approximation de la quantité d'acides humiques et fulviques, lesquels agissent comme des anions fixant les ETM contenus dans les sols. La capacité d'échange cationique effective (CEC effective) correspond au nombre de sites négatifs dans la matrice du sol et représente la quantité de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné. Finalement, la couleur de l'échantillon

permet de faire ressortir des changements dans les proportions d'un ou de plusieurs constituants du sol étudié. Les mesures des paramètres physico-chimiques sont présentées à l'annexe 2.

4.1. MÉTHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

4.1.1. Prélèvement des échantillons

En octobre 2009 et mai 2010, un total de 186 échantillons de sols a été prélevé sur les trois transects d'échantillonnage (Fig. 5). Le positionnement des échantillons a été effectué à l'aide d'un GPS muni d'une antenne (Garmin GPSMAP 60) permettant une précision d'un à trois mètres. Le système de coordonnées utilisé est le système de projection UTM Nad27, Zone 18. Une fiche d'échantillonnage détaillée, telle que présentée en annexe 1, a permis de recueillir un maximum de données lors de l'échantillonnage puisque tous les facteurs contrôlant le comportement des différents ETM dans l'environnement secondaire ne sont pas encore connus.

Le dispositif expérimental utilisé comprend des stations d'échantillonnage espacées aux 10 m le long du transect. Deux échantillons espacés de 2 m sont récoltés à chacune des stations. Chaque trou d'échantillonnage comprend un échantillon d'humus avec un poids cible d'environ 1 kg. Les échantillons sont prélevés dans des trous d'échantillonnage creusés à l'aide d'une pelle. Un échantillon de matière organique bien décomposée est requis et la profondeur d'échantillonnage varie ainsi de 5 cm à 130 cm, avec une profondeur moyenne de 45 cm. Cette méthode d'échantillonnage de sol remanié est facile à utiliser et est pratique pour les échantillonnages de faible profondeur (0-1 m). La pelle est

nettoyée et précontaminée avant chaque trou. Des sacs de plastique réversibles sont utilisés pour le prélèvement des échantillons, évitant ainsi tout contact direct avec le matériel. L'échantillon est ensuite mis dans un sac en papier kraft puis scellé dans le sac en plastique retourné. Un numéro d'échantillon ainsi qu'une étiquette avec un code à barres sont préalablement apposés sur le sac en papier. Un numéro séquentiel situé entre 74540059 et 74540148 a été assigné à chacun des échantillons. Ces derniers ont été conservés au frais dans un réfrigérateur entre 6 et 10 °C.

Au retour du terrain, les échantillons d'humus ont été transférés dans des sacs de plastique épais. Afin d'éviter des anomalies séquentielles causées par la dérive de l'instrument d'analyse ou par la contamination croisée, les échantillons ont été renumérotés de façon aléatoire puis homogénéisés.

4.1.2. Séchage et tamisage

Une fraction des échantillons d'humus a été placée dans des sacs en papier kraft. Ils ont été étendus sur des cordes et séchés à température ambiante (22 °C) pendant une à deux semaines, avec une circulation d'air engendrée par l'action de ventilateurs. Le séchage complet des échantillons a été parachevé dans une étuve chauffée entre 40 et 45 °C. Une température plus élevée serait susceptible de causer des changements significatifs dans le comportement physico-chimique du sol et amener l'évaporation des éléments volatils (mercure, bismuth, brome, etc.) (Jones, 2001).

Le sac d'échantillon a ensuite été placé dans un sac de plastique dans lequel il a été martelé à l'aide d'un maillet de caoutchouc sur une plaque d'acier au carbone. Le matériau

a ensuite été transvidé dans un plateau de pesage jetable où il a été pesé et décrit visuellement (couleur, proportion de matière organique, de sable, de limon et d'argile). Le matériau désagrégé de l'échantillon a ensuite été trituré à l'aide d'un pilon et d'un mortier mécanisé (tritrateur), ou à la main avec un mortier et un pilon de porcelaine. Par la suite, l'échantillon a été tamisé à 250 μm à l'aide de tamis en acier inoxydable. Une fois qu'un poids de 20 g ou plus est passé à travers les mailles du tamis, les portions passantes et retenues sont pesées et le bilan de masse ainsi que les pertes de matériau pendant les manipulations sont calculées pour contrôler la qualité. L'aire de travail ainsi que tout le matériel ayant été en contact avec les échantillons étaient nettoyés entre chaque manipulation d'échantillon avec de l'air comprimé et de l'eau déminéralisée. Les tamis, mortiers et pilons ont été nettoyés au bain à ultrasons dans de l'eau déminéralisée après chaque manipulation. Finalement, les fractions grossières ont été conservées et les fractions fines ont été quartées afin de séparer les échantillons en deux volumes égaux.

4.1.3. Contrôle de qualité

Le contrôle de la qualité s'est effectué à deux niveaux. Tout d'abord, lors de la campagne d'échantillonnage, deux échantillons séparés de 2 m ont été récoltés à chacune des stations le long des profils d'échantillonnage. Cela a pour but de mesurer la variabilité du site sur le terrain. Ensuite, un échantillon sur vingt a été dupliqué (duplicata) et 10 aliquotes d'un matériel de référence interne (09MRI745) ont été insérés pour vérifier le protocole de mesure de pH, de l'Eh, du pouvoir tampon et du taux de matière organique. De plus, 12% des échantillons tamisés à 250 μm ont été quartés et dupliqués (doublons).

Finalement, deux types de matériaux de référence internes fabriqués chez IOS Services Géoscientifiques ont été insérés pour l'analyse, environ à tous les sept échantillons, avec une séquence de deux MR3Sol07 suivie d'un MRESol08. Le matériel MR3Sol07 a été fabriqué avec des échantillons d'humus récoltés lors de deux projets de pédogéochimie antérieurs. Tout le matériel tamisé à 250 μm qui n'était pas nécessaire pour l'analyse a été homogénéisé. Le standard MRESol08 a été créé de façon similaire, mais il a toutefois été dopé avec des solutions calibrées de chlorure de zinc, nickel, cobalt, chrome, lithium, gadolinium, baryum, strontium et rubidium.

4.2. MESURES D'EH, DE PH ET DU ΔPH

Les échantillons conservés au frais ont été analysés pour l'Eh, le pH et le ΔpH en décembre 2009, soit près de deux mois après avoir été récoltés. Toutefois, après examen des résultats, ceux obtenus pour l'Eh semblaient aberrants. Les mesures de pH et d'Eh ont donc été reprises en septembre 2010 en suivant le même protocole, mais avec une autre sonde ORP. Les données d'Eh mesurées en 2010 montrent des résultats plus probants et ce sont ces dernières qui seront discutées dans le cadre du présent projet.

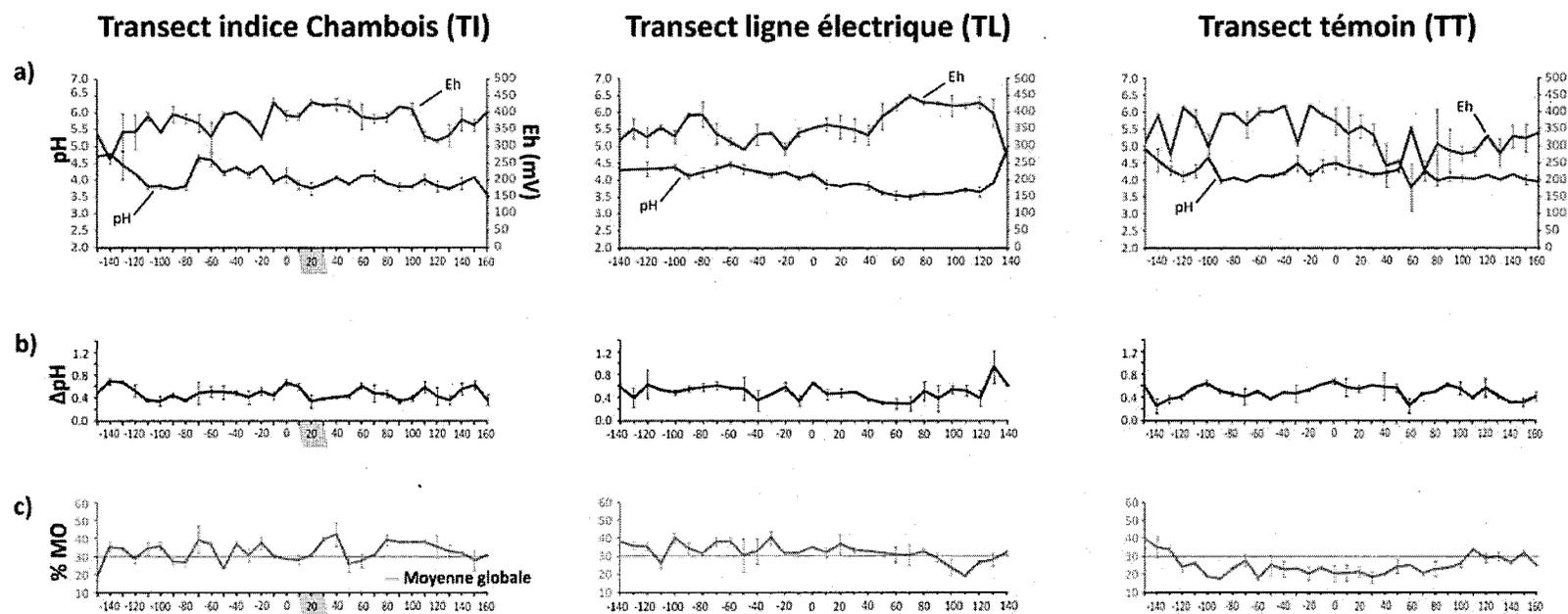


Figure 7 : Graphiques montrant a) à droite : le potentiel d'oxydoréduction (Eh) en mV et à gauche : le potentiel hydrogène (pH); b) le pouvoir tampon ΔpH ; et c) le pourcentage de matière organique (%MO) des échantillons des trois profils en fonction des stations en mètres. L'indice du lac Chambois est représenté par un parallélogramme gris. Les deux extrémités des barres d'erreur correspondent aux deux mesures des échantillons d'une même station.

4.2.1. Méthodologie

Pour prendre les mesures de pH et d'Eh, une solution de pâte saturée composée de 30 g de sol additionné à 30 ml d'eau ultra-pure (18 M Ω ·cm) a été créée. L'appareil utilisé pour la déminéralisation de l'eau est le Cascada BIO-water de Pall Corporation.

Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) a été mesuré immédiatement après la formation de la pâte saturée et la lecture a été prise 5 minutes après l'immersion de la sonde, tel que suggéré par Hamilton *et al.* (2004a). L'appareil utilisé lors de la seconde série de mesures est l'Orion 4-Star Plus avec l'électrode ORP Triode d'Orion 9180BNMD. Par la suite, conformément à la méthode MA. 1010-pH 1.0 du centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2003b), le potentiel hydrogène (pH) a été mesuré 30 minutes après la formation de la pâte saturée. La pâte saturée a été placée sur une table à secousses (VWR 05-500®) entre les mesures. L'appareil utilisé pour déterminer le pH est l'AR25 d'Accumet avec une électrode de type Cole-Parmer K-55500-10. La mesure du pH a été prise en note après que l'électrode ait atteint l'équilibre dans la pâte saturée. Toutes les électrodes ont été nettoyées à l'eau ultra-pure entre chacune des mesures et la calibration des appareils était vérifiée tous les 10-15 échantillons. Finalement, le pouvoir tampon (Δ pH) a été estimé par l'addition 0.5 ml de HCl (0.1N), tel que conseillé par Smee (2009). Le pH après l'ajout de l'acide a été mesuré après une durée de 15 minutes en utilisant la même électrode que pour le pH de l'échantillon. Toutes ces mesures ont été effectuées sur les échantillons en suivant l'ordre de la renumérotation aléatoire.

4.2.2. Contrôle de qualité

La qualité de ces mesures est estimée à partir de celles effectuées sur les dix 09MRI745 et des neuf duplicatas, à l'exception de l'Eh qui n'a pas été mesuré pour les 09MRI745. Les 10 déterminations du 09MRI745 montrent de faibles coefficients de variation (CV) de 0,52 % pour le pH et de 0,90 % pour le Δ pH. Les CV sont également faibles pour l'Eh et le pH des paires de duplicatas, soit de 3,14 % et de 1,72 % respectivement. Par contre, le Δ pH montre un CV élevé de 28,84 %. Finalement, la comparaison des pH mesurés en décembre 2009 avec ceux pris en septembre 2010 révèle un CV moyen de 2,4 %, démontrant ainsi que le pH ne change peu, malgré l'entreposage des échantillons.

La moyenne des mesures d'Eh, pH, Δ pH et %MO a été déterminée pour chaque paire d'échantillons d'une même station d'échantillonnage. À partir de ces valeurs, la moyenne (μ) et l'écart type (σ) ont été déterminés pour chacun des profils tableau 1. En plus, le coefficient de variation du transect a été déterminé (CV(%) du transect) et ce dernier pourra être comparé au coefficient de variation moyen mesuré à partir du CV entre les deux échantillons d'une même station (CV(%) moyen des paires). Le nombre de duplicatas de terrain est toutefois trop faible pour être traité statistiquement.

L'interprétation de ces calculs statistiques (tableau 1) permet de constater que le pH varie peu sur l'ensemble du levé puisque les moyennes sont similaires et que les écarts types et les CV des transects sont faibles. Pour l'Eh, les CV sont relativement faibles, par contre le tracé en dents scie montre une grande variabilité le long des profils d'échantillonnage. Les trois profils du Δ pH montrent une moyenne similaire autour de

0,48, mais les CV sont élevés et les mesures fluctuent fortement entre 0,2 et 1,2. Pour le %MO, le TT montre une moyenne beaucoup plus faible que le TI et TL, mais le CV du transect plus élevé indique que les échantillons du TT montrent de plus fortes variations du %MO.

À l'exception du ΔpH , les CV moyens pour les paires d'échantillons d'une même station sont légèrement plus faibles que les CV des transects. Cela signifie que la variabilité de l'Eh, du pH et du %MO entre deux échantillons distancés de deux mètres est plus faible que la variabilité du transect. Toutefois, les CV moyens des paires d'échantillons sont considérablement élevés, signifiant une hétérogénéité du sol à petite échelle (2 mètres) pour ces paramètres. Les CV du ΔpH traduisent que ce dernier est peu significatif, peu précis et inutilisable.

Tableau 1 : Moyenne des statistiques de base des paires d'échantillons d'une station pour l'Eh, le pH, le Δ pH et le %MO, en fonction des 3 transects : TI (transect de l'indice), TL (transect de la ligne électrique) et TT (transect témoin).

Transect		TI	TL	TT
Eh (mV)	μ	375	362	331
	σ	40	48	61
	CV(%) du transect	10,7	13,3	18,4
	CV(%) moyen des paires	7,4	8,6	13,2
pH	μ	4,07	4,04	4,26
	σ	0,32	0,35	0,32
	CV(%) du transect	7,9	8,7	7,5
	CV(%) moyen des paires	3,6	2,7	3,4
Δ pH	μ	0,47	0,49	0,48
	σ	0,11	0,14	0,11
	CV(%) du transect	23,4	28,6	22,9
	CV(%) moyen des paires	22,6	28,4	21,0
%MO	μ	32,4	33,3	25,7
	σ	5,4	5,4	6,0
	CV(%) du transect	16,8	16,2	23,3
	CV(%) moyen des paires	10,8	11,8	12,7

4.2.3. Résultats

Les résultats des paramètres de l'Eh, du pH et du Δ pH sont présentés pour chacun des profils sur la figure 7. Les données montrent que l'Eh et le pH ont des profils qui sont semblables pour le TI et le TL tandis que l'Eh du TT est sensiblement plus faible et le pH légèrement moins acide. Mais, dans l'ensemble, les mesures du pH montrent que la matière organique est de nature acide, variant entre 3,39 et 5,55 et avec une moyenne autour de 4,12.

Dans le TT, une anomalie ponctuelle acide et réductrice est notée autour de la station + 60 m. Cette station est située 10 m à l'est d'un affleurement de basalte minéralisé

(2% de pyrite et traces de chalcopryrite). La carte géologique du secteur (Fig. 4) traduisait toutefois la présence de granodiorite¹. Le TL présente un Eh et un pH relativement stables à l'exception de la station + 140 m. À cet endroit, une réduction de l'Eh et une augmentation du pH sont relevées. Mis à part le fait que cette station se situe dans une ligne de coupe, soit un secteur potentiellement perturbé, le site est très similaire au reste du profil.

Au-dessus de l'indice du lac Chambois, l'environnement acide et réduit tel qu'anticipé au-dessus d'un conducteur dans le socle rocheux n'est pas observé (Cameron et al., 2004; Hamilton et al., 2004a; Hamilton et al., 2004b; McClenaghan et al., 2006). Par contre, des environnements réduits sont attendus dans les environnements anaérobiques tels que les tourbières avec un Eh < 400mV (Hooda, 2010). Cela pourrait masquer l'environnement réduit créé par le gradient d'oxydoréduction au-dessus du conducteur puisque ce dernier, même s'il est recouvert de sols de nature podzolique, est entouré de tourbières.

Il a été démontré qu'un sol exposé à l'air peut s'oxyder et augmenter de façon importante la mesure de son Eh, et cela, même si le sac est ouvert à l'air et immédiatement refermé (Hamilton et al., 2004a). Dans le cas présent, près d'une année s'est écoulée entre la récolte des échantillons et la prise d'Eh car la sonde initialement utilisée était défectueuse. De plus, les échantillons ont été transférés et ouverts près de cinq fois pendant cette période. Les sols ont pu s'oxyder durant ce délai et l'anomalie réductrice pourrait ainsi avoir été masquée. De plus, la sonde avait de la difficulté à se stabiliser dans la solution et l'Eh augmentait sans cesse pendant les 5 minutes d'immersion. Pour contrer cet

¹ La carte géologique est actuellement en cours de révision.

effet, il aurait été pertinent d'effectuer une immersion de la sonde dans une solution de prétrempage afin d'effacer toutes les traces de la mémoire précédente de la sonde (Hamilton et al., 2004a) et ainsi améliorer la rapidité de lecture. La combinaison de ces situations a pour conséquence de rendre les données d'Eh difficiles à interpréter.

Les lectures de pH montrent le caractère acide des sols de la région, l'oxydation de sulfures ayant tendance à abaisser le pH (Cameron et al., 2004). Par contre, la tourbe est reconnue pour augmenter le pouvoir tampon du sol, ce qui a pour effet de fixer le pH (Rippy and Nelson, 2007). L'indice du lac Chambois est sis dans un secteur présentant un petit haut topographique surmonté de sols de nature podzolique, lequel est surmonté au sud et au nord par des zones de tourbières. Ainsi, une réduction du pH au-dessus de l'indice du Lac Chambois pourrait être masquée par la présence des deux zones de tourbière fortement acide qui entourent le secteur de l'anomalie.

Le pH et l'Eh varient avec les saisons, avec l'humidité et l'aération du sol, avec l'activité microbienne et racinaire ainsi qu'avec la formation des acides humiques (Duchaufour, 1977). L'effet du changement de ces paramètres à petite échelle (2 m) peut être observé par les écarts entre les deux mesures d'une même station, représentés par les barres d'erreur sur la figure 7. Ces écarts démontrent l'hétérogénéité du matériel échantillonné.

Dans les sols hydromorphes, la présence d'une grande quantité d'oxydes et hydroxydes ferriques a pour effet de tamponner le milieu au niveau redox. Ainsi, le pH et l'Eh seront provisoirement bloqué sur des valeurs d'équilibre entre Fe^{2+} et Fe^{3+} dans les milieux saturés en eau (Legros, 2007). Quand le sol est saturé en eau, il y a réduction et

mise en solution du fer en fer ferreux et lorsque l'état de saturation cesse, le fer est oxydé et précipite sous forme de fer ferrique (Vizier, 1971). Ainsi, puisque l'humus du sol est une réserve pratiquement inépuisable de fer, le pouvoir tampon redox des sols est essentiellement dû aux oxydes de fer (Baize and Tercé, 2002). La dynamique des ETM dans les sols hydromorphes est donc contrôlée par la dynamique du fer, plus précisément par des alternances de dissolution réductrice en période anoxique et de co-précipitation ou d'adsorption en période oxique. Ceci explique pourquoi les mesures du Eh et du pH dans les sols semble toujours en lien avec la relation d'équilibre entre le Fe^{2+} et le Fe^{3+} (Fig. 8). Cette même relation et une disposition similaire des échantillons ont été observées lors d'autres campagnes de pédogéochimie (Girard, 2010b).

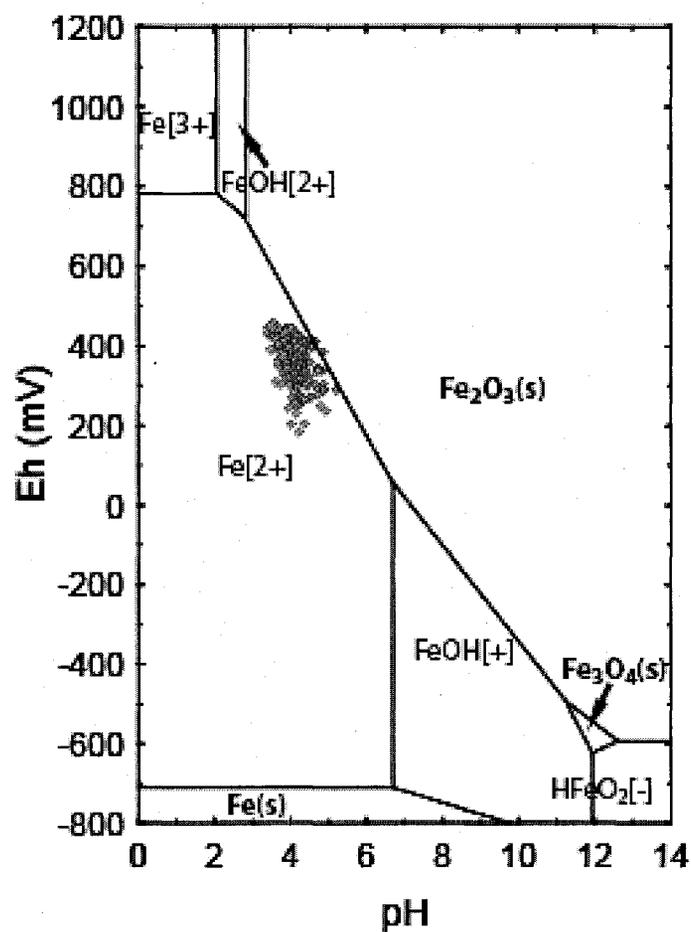


Figure 8 : Position des échantillons sur le diagramme Eh-pH du système Fe-O-H. $\Sigma Fe = 10^{-10}$, 25°C, $10^5 Pa$ (Takeno, 2005). Notez que les échantillon se situent près de la ligne de partage entre le $Fe[2+]$ et le $Fe_2O_3(s)$.

4.3. POURCENTAGE DE MATIÈRE ORGANIQUE

Les acides humiques et fulviques du sol ont une influence majeure sur la capacité de sorption des ETM par les sols. Le %MO d'un sol dépend de plusieurs facteurs dont le climat, la topographie, le régime hydrique, le type de végétation, la nature du matériel parental (texture, minéralogie, pH), etc. D'importants renseignements sur la nature et la genèse du sol peuvent alors être tirées du %MO.

4.3.1. Méthodologie

Le %MO des échantillons de sol ou de sédiment peut être estimé par perte au feu. Le principe de la perte au feu est que le poids de l'échantillon est pris avant et après le traitement par calcination. La méthode est basée sur le principe que, à la température choisie, tout le carbone organique est converti en CO₂, tandis que les carbonates ne sont pas affectés. En fait, la perte de CO₂ provenant des carbonates et la perte d'eau à partir des minéraux argileux sont considérées comme négligeables (Bisutti et al., 2004; Grewal et al., 1991; Soon and Abboud, 1991).

La MO a été oxydé par calcination en suivant la méthode MA. 1010 - PAF 1.0 du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2003a). L'estimation du %MO a été effectuée en pesant l'échantillon anhydre dans un creuset de porcelaine préalablement placé au four à 375 °C pour une durée de 16 heures. Ensuite, le creuset contenant l'échantillon anhydre a été maintenu dans le même four à une température de 375 °C pendant une autre période de 16 heures avant d'être pesé de nouveau. Le calcul de la teneur approximative en MO a été déterminé avec la formule suivante :

$$\%MO = \frac{\text{Masse de sol anhydre (g)} - \text{Masse de sol calciné (g)}}{\text{Masse de sol anhydre (g)}} * 100.$$

4.3.2. Contrôle de qualité

Les 10 standards 09MRI745 présentent un CV de 6,84 % tandis que les paires de duplicatas ont un CV de 11,18 %. Il est à noter que lors de l'extraction préalable d'une petite quantité de sol humide (environ 45 g) pour effectuer la perte au feu, le contenu en

matières fibreuses n'était pas homogène dans l'ensemble de l'échantillon. Une parfaite répétabilité est donc peu probable.

4.3.3. Résultats

Le %MO varie entre 15 et 49 % sur l'ensemble du levé d'échantillonnage (Fig. 7). Le Système canadien de classification des sols (1998) définit un sol organique par une valeur de plus de 30 % de MO. Tel que déterminé par perte au feu, 74 % des échantillons du TL et 68% de ceux du TI proviennent de l'horizon organique (O ou LFH) et présentent tous deux un %MO moyen de 32 %. Quant au TT, seulement 20 % des échantillons sont des sols organiques et le %MO moyen est de 25 %. Par définition, l'horizon O est un horizon organique principalement dérivé de mousses, de joncs et de matériaux ligneux tandis que l'horizon LFH se développe principalement par l'accumulation de feuilles, de brindilles et de matériaux ligneux avec ou sans mousses comme composantes mineures. Tous les autres échantillons proviennent de l'horizon minéral enrichi en matière organique (Ah).

Les échantillons du TT présentant plus de 30 % MO sont principalement situés à l'extrémité nord du TT. Ce secteur correspond à une zone plus tourbeuse qui change graduellement pour une zone de forte végétation vers le sud. La portion sud du TT est caractérisée par un mince horizon de MO, souvent en contact avec l'horizon d'argile glacio-marine, un mauvais drainage et la présence de plusieurs cuvettes. Inversement, le TL présente quelques sols minéraux à l'extrémité est. Le TL montre une densité de végétation un peu plus forte à cet endroit. Pour ce qui est du TI, 80 % des sols minéraux présents sont

expliqués par le fait que l'humus se trouve en placage sur un bloc ou en contact avec l'horizon Ae du till. Selon le système canadien de classification des sols (1998), l'horizon Ae est un horizon minéral qui a subi un lessivage de la matière organique, des argiles et du fer.

4.4. CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE EFFECTIVE

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure chimique permettant d'estimer la capacité du sol à attirer, retenir et échanger les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , etc.). Les forces impliquées dans l'adsorption d'espèces ioniques sur des surfaces chargées sont électrostatiques et sont régies par la loi de Coulomb de l'attraction et de la répulsion (Hall, 1998). La CEC se mesure communément en centimoles par kg (cmol^+/kg) et correspond au nombre de sites électronégatifs sur le complexe argilo-humique. Elle permet ainsi d'estimer le nombre total de sites disponibles pour l'échange de cations ainsi que le nombre total de cations échangeables. Puisqu'il a été démontré que de déterminer la CEC à un pH plus élevé que celui du sol a pour effet de surestimer la CEC (Gillman, 1979), des mesures de la CEC effective (ou CEC au pH du sol) ont été effectuées. La CEC effective est calculée comme la somme des bases échangeables plus l'acidité effective et elle a l'avantage d'être une méthode qui modifie peu le complexe adsorbant, en particulier en ce qui concerne le pH.

4.4.1. Méthodologie

Les mesures de la CEC effective ont été réalisées par le laboratoire de chimie organique et inorganique du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF).

Seuls les échantillons séchés et tamisés à 250 µm du TI et du TT ont été mesurés. Dans la méthode, les bases échangeables sont déterminées par extraction avec du chlorure d'ammonium (NH_4Cl) 1M. L'échantillon est filtré et les métaux dosés à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 9000, Thermo Instruments, Franklin, Mass.). L'acidité effective est alors calculée à partir de la mesure du pH et de la concentration d'aluminium dans l'extrait au chlorure d'ammonium (Espiau and Peyronel, 1976). Finalement, la saturation en base correspond au quotient des cations échangeables sur la CEC effective multiplié par 100.

4.4.2. Contrôle de qualité

La qualité est principalement contrôlée par le laboratoire de chimie organique et inorganique du MRNF. Tout d'abord, le contrôle de la dérive instrumentale (QC) est effectué en insérant des solutions de concentrations connues à toutes les 15 lectures. Si la valeur du QC n'entre pas dans les écarts établis, l'étalonnage de l'instrument est fait à nouveau. Deux matériaux de référence interne sont insérés au début et à la fin de la séquence d'analyse des échantillons. Le matériel de référence interne du MRNF ainsi qu'un blanc sont insérés à approximativement tous les 40 échantillons. Des doubles des échantillons sont également opérés, soit un en début de séquence, un après 19 échantillons, puis un à tous les 40 échantillons. Finalement, une réplique de la lecture de l'instrument est réalisée à tous les 15 échantillons.

Par ailleurs, 7 paires de doublons ont été analysés. Les résultats de la CEC effective montrent un CV de 5,20%. Toutefois, 16 matériaux de référence MR3Sol07 ainsi que 8

MRESol08 ont été insérés dans la séquence à l'insu du laboratoire. Les résultats exposent des coefficients de variation importants de 35% pour le MR3Sol07 et de 41% pour le MRESol08.

4.4.3. Résultats

La CEC effective moyenne des échantillons est de 22 cmol^+/kg avec un écart type de 8 cmol^+/kg . Les valeurs de la CEC varient entre 7 et 34 cmol^+/kg , indiquant une grande étendue de ces dernières, allant de faible CEC à forte CEC (tableau 2). Les sols à très petite CEC sont des sols à dominante sableuse et l'échange des cations y est aisé. L'augmentation de la CEC indique un accroissement de la dominante argileuse et/ou humifère, donc une plus grande capacité à fixer des ETM.

Tableau 2 : Guide d'interprétation des valeurs de CEC, tiré de Metson (1956).

Valeur de la CEC en cmol^+/kg	Interprétation
$\text{CEC} < 6$	Très petite CEC
$6 \leq \text{CEC} \leq 12$	Faible CEC
$12 \leq \text{CEC} \leq 25$	CEC modérée
$25 \leq \text{CEC} \leq 40$	CEC élevée
$\text{CEC} > 40$	CEC très élevée

4.5. COULEUR

4.5.1. Méthodologie

La détermination de la couleur de l'échantillon a été réalisée en utilisant la charte de Munsell (*Munsell Soil Color Chart*). Le système de couleurs de Munsell permet une comparaison directe de la couleur des sols partout dans le monde. La classification des couleurs est basée sur trois variables, la teinte, la luminosité et la saturation. La combinaison de ces trois variables donne le code Munsell de l'échantillon. Chaque échantillon tamisé à 250 µm a été identifié selon cette classification à travers son sac de plastique transparent. Par exemple, un sol brun peut obtenir le code : teinte luminosité/saturation (10YR 5/1).

4.5.2. Contrôle de qualité

Les 30 matériaux de référence interne (MR3Sol07 et MRESol08) ont été qualifiés d'une couleur identique. De plus, 94 % des doublons et des duplicata ont été caractérisés par la même couleur tandis que pour deux d'entre eux, le duplicata s'est vu être attribué une couleur d'une luminosité légèrement plus faible.

4.5.3. Résultats

Au total, 16 différents codes de couleur ont été accordés aux échantillons de la base de données. Ils sont tous dans les teintes de gris, brun et noir avec une luminosité et une saturation plus ou moins prononcée.

CHAPITRE 5

ANALYSES GÉOCHIMIQUES

Dans tous les domaines de la géochimie, le choix d'une méthode d'analyse dépend directement de la forme des ETM qui sont à mettre en solution. Dans le modèle électrochimique d'Hamilton (1998), le processus de diffusion des éléments issus de la minéralisation oxydée en profondeur vers la surface résulte du fort gradient d'oxydoréduction existant entre les deux pôles. Ce sont précisément ces ETM sous forme labile (libre) qui sont piégés ou immobilisés dans l'environnement de surface qui représentent la signature du dépôt. La composante minérale détritique est ici de peu d'intérêt. Plusieurs mécanismes permettent de fixer les ETM, incluant l'échange cationique, la chélation, l'adsorption et la complexation. Et, quoique les controverses abondent sur les mécanismes de transport (diffusion, diffusion électrochimique, migration hydrique ou gazeuse, etc.), il est convenu que les principaux sites de résidence de ces ETM dans l'environnement secondaire comprennent les complexes humiques et fulviques de l'humus, les oxydes et hydroxydes de Fe et Mn et les minéraux argileux (Hall, 1998).

Ainsi, afin d'analyser les ETM liés à la composante organique du sol, un lessivage partiel au pyrophosphate de sodium (PYRO-MS) a été réalisé sur les échantillons. De plus, une digestion totale multi-acide (TD-MS) et une analyse par fluorescence X (XRF) ont été

effectuées. Les résultats sont présentés à l'annexe 3. Ces deux analyses sont dites totales puisqu'elles donnent la concentration totale des ETM de l'échantillon, sans égards à leur spéciation ou leur état. Elles serviront de comparatif à l'analyse PYRO-MŚ. Notons que pour les fins de traitement statistique, lorsque les valeurs obtenues pour un élément se situent sous la limite de détection instrumentale, une valeur équivalente à cette limite de détection divisée par 2 est appliquée.

5.1. DIGESTION AU PYROPHOSPHATE DE SODIUM

La digestion au pyrophosphate de sodium (PYRO-MS) est communément utilisé en pédogéochimie (Hall et al., 1996; Jeffrey and Compton, 1991; Michaelson and Ping, 1997; Omueti and Lavkulich, 1988; Tomar et al., 1992). Le pyrophosphate de sodium ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) est une solution détergente de pH 10 effectuant une mise en solution partielle. Il permet l'extraction des ETM labiles liés à la composante organique de l'humus tel que les acides humiques et fulviques. Son action dans l'extraction des substances humiques est sa capacité à chélater avec le Ca et les ions métalliques trivalent pour former des précipités insolubles (ex : $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$) ou des complexes solubles avec les métaux. L'extraction des cations liés à la matière organique résulte ainsi de la conversion subséquente des polyanions en sels de Na solubles (Hall et al., 1996).

C'est notamment la méthode préconisée par l'entreprise IOS Services Géoscientifiques Inc., initiateur du projet, pour les analyses chimiques d'humus.

La mise en solution PYRO-MS a été effectuée par le laboratoire Activation Laboratories Ltd. (Actlabs) d'Ancaster, Ontario. Un aliquot de 10 g de matériel sec et

tamisé à 250 μm a été envoyé et les dosages ont été faits par spectrométrie de masse à la suite d'une vaporisation au plasma (ICP-MS). Les détails sur l'application de la méthode sont tenus confidentiels par le laboratoire.

5.1.1. Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité a été effectué sur deux niveaux, par le laboratoire Actlabs et par l'auteur. Lors de l'analyse, Actlabs introduit, pour chaque lot d'échantillons dosé par ICP-OES et ICP-MS (PYRO-MS et TD-MS), une analyse de blanc (échantillon de silice) ainsi que les analyses des matériaux de référence certifiés. Un résumé du contrôle de qualité est présenté dans le tableau 3. De plus, le laboratoire produit environ 7 % de doublons (répliques), lesquels sont dosés deux fois et représentent des mises en solution distinctes. Aucun problème n'a été détecté dans blancs et les répliques du laboratoire.

Pour analyses PYRO-MS, les valeurs de référence pour ces matériaux (Till-1, Till-2 et SO-3; table 1, annexe 1) correspondent à des mises en solution totale, lesquelles ne peuvent se comparer avec les résultats des mises en solution sélectives. Comme aucune valeur certifiée n'est disponible pour les mises en solution sélective, la base de données historique d'IOS a été utilisée comme point de référence. Aucune dérive analytique n'est constatée. Dans le cas des standards internes (MR3Sol07 et MRESol08), les seuils de tolérance proviennent d'analyses effectuées dans le cadre de plusieurs projets de pédogéochimie chez IOS. À l'exception de l'or et des analytes situées près des limites de détection, la moyenne dosée sur les présents matériaux se compare (+/- 10 %) à celle obtenue historiquement sur les mêmes matériaux. Par contre, les analyses du Th montrent

des variations qui excèdent le seuil de tolérance de 10 %, ce qui suggère des problèmes lors de la mise en solution ou au niveau de la calibration pour cet élément. De plus, le Cr est sous-évalué dans les trois analyses du MR3Sol07.

Tableau 3 : Synthèse du contrôle de qualité pour les analyses PYRO-MS, TD-MS et XRF.

Méthode	Nombre d'éléments analysés	Éléments analysés	Éléments près de limite de détection	Matériaux certifiés	Matériaux de référence interne	Problèmes analytiques
PYRO-MS	60	Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, La, Li, Lu, Mn, Mo, Nb, Nd, Ni, Os, Pb, Pd, Pr, Pt, Rb, Re, Ru, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr	Ag, Au, Be, Bi, Ge, Hg, I, Li, Ni, Os, Pd, Pt, Re, Ru, Sb, Se, Sn, Te, Tl, U	Till-1 Till-2 SO-3	MR3Sol07 MRESol08	Th
TD-MS	60	Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, La, K, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr	Ag, Be, Hf, Ho, In, Lu, Nb, Re, Sb, Se, Sn, Ta, Te, Tb, Tl, Tm, Yb	GRX-1 GRX-4 GRX-6 SDC-1 SCO-1 DNC-1a OREAS 13b	MR3Sol07 MRESol08	As, Cr, Hf, Nb, Th, V, W, Zr
XRF	33	Ag, As, Au, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Te, Th, Ti, U, V, W, Zn, Zr	Ag, Au, Ba, Cd, Co, Cs, Hg, Ni, Pd, Sb, S, Se, Sn, Sr, Te, V, W		MR3Sol07 MRESol08	Mo, Sc, U

5.2. DIGESTION MULTI-ACIDES

Une digestion totale multi-acides (TD-MS), appelée Ultratrace 6, a également été effectuée chez Actlabs. La méthode requiert une aliquote de 0,25 g, lequel est digéré avec de l'acide fluorhydrique (HF) et évaporé à sec à 260 °C. Par après, le résidu subit une digestion similaire à l'acide perchlorique (HClO₄) et à l'acide nitrique (HNO₃). En fin de protocole, le résidu est dilué dans de l'aqua regia également dilué. L'aqua regia est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique concentrés (3 HCl pour 1 HNO₃). Le dosage est finalement effectué par ICP-MS, sauf pour les éléments majeurs (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Sc et Ti) qui sont analysés par spectrométrie d'émission atomique au plasma (ICP-OES).

L'avantage de la digestion totale est qu'elle donne la concentration totale des éléments de l'échantillon. Elle effectue une destruction de la matière organique, des oxydes ainsi que des silicates et d'une partie des phases minérales du sol. Toutefois, cette mise en solution peut être incomplète pour les minéraux résistants comme la chromite, le zircon, certains spinelles, les oxydes de titanes, etc.

5.2.1. Contrôle de qualité

Actlabs effectue le même contrôle pour l'analyse TD-MS que celui mentionné pour l'analyse PYRO-MS. Aucun problème n'a été détecté dans blancs et les répliques du laboratoire. Par contre, les mesures des matériaux de référence certifiés du laboratoire Actlabs (GRX-1, GRX-4, GRX-6, SDC-1, SCO-1, DNC-1a et OREAS 13b) et celles des matériaux de référence interne (MR3Sol07 et MRESol08), montrent des problèmes

analytiques récurrents pour les éléments suivants : As, Cr, Hf, Nb, Th, V, W et Zr. Toutefois, chacun des matériaux de référence du laboratoire n'a été analysé qu'une seule fois et seules les analyses des standards internes effectuées dans le cadre du présent projet sont disponibles pour fins de comparaison. De plus, le MR3Sol07 et le MRESol08 étaient analysés pour la première fois par cette méthode, ce qui donne un historique limité d'analyses pour effectuer un contrôle de qualité rigoureux. Parmi les éléments présentant des problèmes analytiques, deux groupes d'éléments distincts peuvent être considérés. Le premier groupe comprend des éléments réfractaires à forte valence et forte charge ionique, soit : Zr, Nd, Hf, Th et Cr. Dans une digestion acide, des pertes peuvent être occasionnées par une dissolution incomplète (Smith et al., 2009; Yu et al., 2001) ou par la coprécipitation de ces derniers avec des fluorures lors de la digestion à l'acide fluorhydrique (Lu et al., 2007; Tanaka et al., 2003). Le second groupe comprend As, V et W. L'utilisation des acides chlorhydrique, fluorhydrique et perchlorique est reconnue pour créer des interférences lors de l'analyse de ces éléments par ICP-MS (Jarvis et al., 1994).

5.3. ANALYSE À LA FLUORESCENCE X

La fluorescence de rayon X (XRF) est une technique d'analyse non destructive qui permet de mesurer la concentration d'éléments dans le matériau. L'échantillon est exposé à un rayonnement X et la matière réémet de l'énergie sous la forme de fluorescence de rayon X. La fluorescence de rayon X est causée par l'éjection d'un électron de haute énergie d'une des couches les plus intérieures des atomes par des rayons incidents. Les trous laissés par les électrons éjectés sont comblés par d'autres électrons qui descendent des couches

externes. Cette transition électronique provoque l'émission d'un photon X. L'énergie du photon X émis est égale à la différence d'énergie des deux orbitales concernées et est donc caractéristique de l'atome où l'émission a été générée.

Les mesures de XRF ont été prises à l'aide d'un analyseur à fluorescence X portable de type Thermo Scientific Niton XLt. Les mesures ont été prises en mode « Standard Soil Mode » directement sur le sac d'humus séché et tamisé à 250 µm. Ce mode effectue un étalonnage par normalisation Compton. Cette normalisation permet de réduire les problèmes associés aux effets de matrice et permet de mesurer de faibles concentrations en métaux lourds dans un échantillon principalement composé d'éléments légers. Elle consiste à analyser un étalon unique, bien caractérisé, de façon à enregistrer l'intensité du spectre de Compton et de le soustraire ensuite du signal des éléments dosés (Ressources naturelles Canada, 2006) . Deux analyses, à deux endroits différents, ont été effectuées sur chacun des échantillons.

5.3.1. Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité des analyses XRF a été effectué par l'entremise des deux standards internes insérés dans la séquence d'échantillons. En plus, afin de s'assurer de la répétabilité de l'analyse, deux mesures ont été effectuées sur chacun des échantillons et la moyenne a été calculée. Parmi les éléments détectés, les seuls problèmes analytiques observés correspondent aux mesures des teneurs en Mo, Sc, et U. Ces dernières sont plusieurs grandeurs d'ordres plus élevées que celles provenant des autres méthodes d'analyses et une interférence est soupçonnée. Mis à part ces trois éléments, les mesures

sont comparables à celles obtenues avec le PYRO-MS et le TD-MS. Par ailleurs, les 2 analyses réalisées sur chacun des échantillons montrent des CV moyens faibles situés entre 2 et 16 % (tableau 4). Cela indique qu'une seule analyse par échantillon serait suffisante pour de futures mesures.

Tableau 4 : Coefficients de variation moyenne pour chaque ETM des deux analyses XRF.

CV (%)	ETM
0-5 %	Sr, Fe, Ca
5-10 %	Mo, Zr, U, Rb, Zn, Ti, K
10-16 %	Pb, Th, As, Cu, Mn, Cr

5.4. VARIABILITÉ LOCALE

La fixation des ETM dans les sols est un phénomène complexe et dynamique. La variabilité a été testée par l'échantillonnage de deux échantillons distancés de deux mètres à chacune des stations pour les trois profils d'échantillonnage. Les CV moyens mesurés à partir des CV de chacune des paires d'échantillons ont été mesurés pour chaque élément et sont présentés dans le tableau 5. Les paires d'échantillons correspondent aux deux échantillons pris à deux mètres de distance à chacune des stations des transects. Les résultats révèlent l'hétérogénéité du sol à l'échelle métrique (2 mètres). C'est la raison pour laquelle il est essentiel d'apprendre à mieux connaître les lois de fixation des métaux dans le sol, ainsi que le comportement différentiel des divers cations et leur compétition à occuper les sites de fixations. Le chapitre 6 est consacré à cet objectif.

Tableau 5 : Coefficients de variation moyenne des paires d'échantillons pour chaque ETM et pour les 3 méthodes d'analyse.

CV (%)	PYRO-MS	TD-MS	XRF
10-20 %	Ga, Ba, Sr	Ni	K, Sr, Rb
20-30 %	ETR, Mn	Ba, Sr, ETR, Fe, Ca, Ti, Co, Mn, Pb, Mg	Ca, Zr, Fe, Ti, Mo, Mn
30-40 %	Fe, V, Cu, Co, Cs, Sc, Zn, Rb, Cd	Al, Cs, K, Rb, Zn, Ga, Cu, U, Na	Cu, Pb, Zn, U
40-50 %	Mo, Th, Nb, As, Ni, Pb, W	Sc, Mo, Th	Sc, Th, Cr, As
50 % +	Cr, U, Zr	Cr, Zr, Nb, Cd, W, V, As	---

Les CV moyens des ETM ont également été effectués sur les doublons d'analyse. Ces doublons d'analyse sont créés suite au quartage de l'échantillon tamisé à 250 µm. Pour majorité des ETM, les CV des doublons sont approximativement deux à quatre fois inférieurs à ceux des paires d'échantillons (tableau 5). Toutefois, une hétérogénéité subsiste et certaines, plus fortes sont constatées pour quelques ETM dont Cu, Zn et Ni. Ceci s'explique par la présence de quelques valeurs extrêmes.

5.5. RÉSULTATS DES ANALYSES GÉOCHIMIQUES

5.5.1. Les 3 transects

Parmi tous les éléments analysés, ceux permettant de faire ressortir l'anomalie de l'indice du lac Chambois sont les éléments chalcophiles suivants : Zn, Pb et Cd, ainsi que les métalloïdes : As, Sb et Bi (Fig. 9). Les 3 méthodes d'analyse permettent de bien

distinguer le Zn, Pb et Cd tandis que le Sb et Bi sont uniquement détectés par l'analyse TD-MS. Quant à l'As, seule l'analyse XRF présente un profil semblable aux autres éléments cités. Le PYRO-MS et le TD-MS ne montrent qu'un profil flou et bruiteux de l'As dans l'humus. Les profils de tous les autres ETM sont illustrés à l'annexe 4.

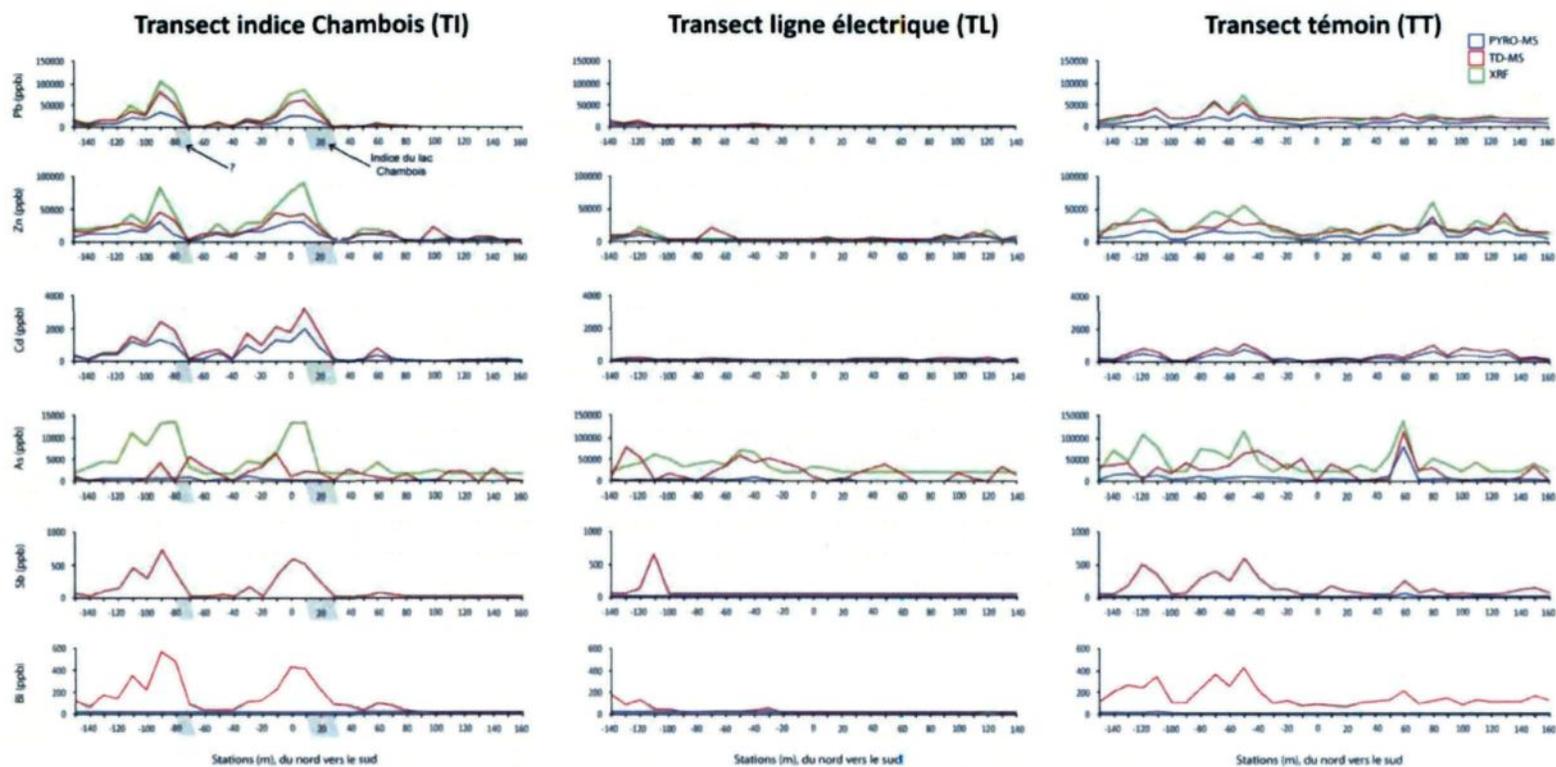


Figure 9 : Représentation des trois transects par une superposition des teneurs (ppb) obtenues par PYRO-MS (trait rouge), TD-MS (trait bleu) et XRF (trait vert) pour Pb, Zn, Cd, As, Sb et Bi. L'absence de trait indique que cet élément n'est pas détecté par la méthode ou que les mesures se situent sous la limite de détection.

Les profils du Pb, Zn, Cd, As, Sb et Bi permettent d'observer une seconde anomalie située plus au nord de l'indice connu. Cette dernière correspond à une anomalie résistive et faiblement polarisable (Dubois, 2006; Dubois, 2007) qui n'a pas été sondée par forage (Fig. 10). La bonne juxtaposition entre les anomalies géochimiques avec la position des anomalies de polarisation provoquée et de résistivité suggère la présence d'anomalies apicales, centrées sur des conducteurs de sulfures. Cela laisse ainsi présager qu'un autre corps minéralisé puisse être présent autour de la station -80 m.

D'autre part, un léger décalage des anomalies géochimiques peut être observé. Ces dernières semblent s'épandre vers le nord, phénomène qui n'est pas constaté sur le levé de PS. Ceci pourrait être expliqué par la présence d'une légère pente descendante, également orientée vers le nord. Toutefois, aucune mesure précise au DGPS n'a été réalisée et la topographie, telle que présentée à la figure 10, est une approximation effectuée d'après les notes de terrain et des mesures au GPS (Garmin GPSMAP 60) utilisé avec une antenne externe pour améliorer le signal. La légère pente, combinée à la présence d'un ruisseau à l'extrémité nord du profil, pourrait expliquer une légère diffusion de l'anomalie géochimique vers le nord.

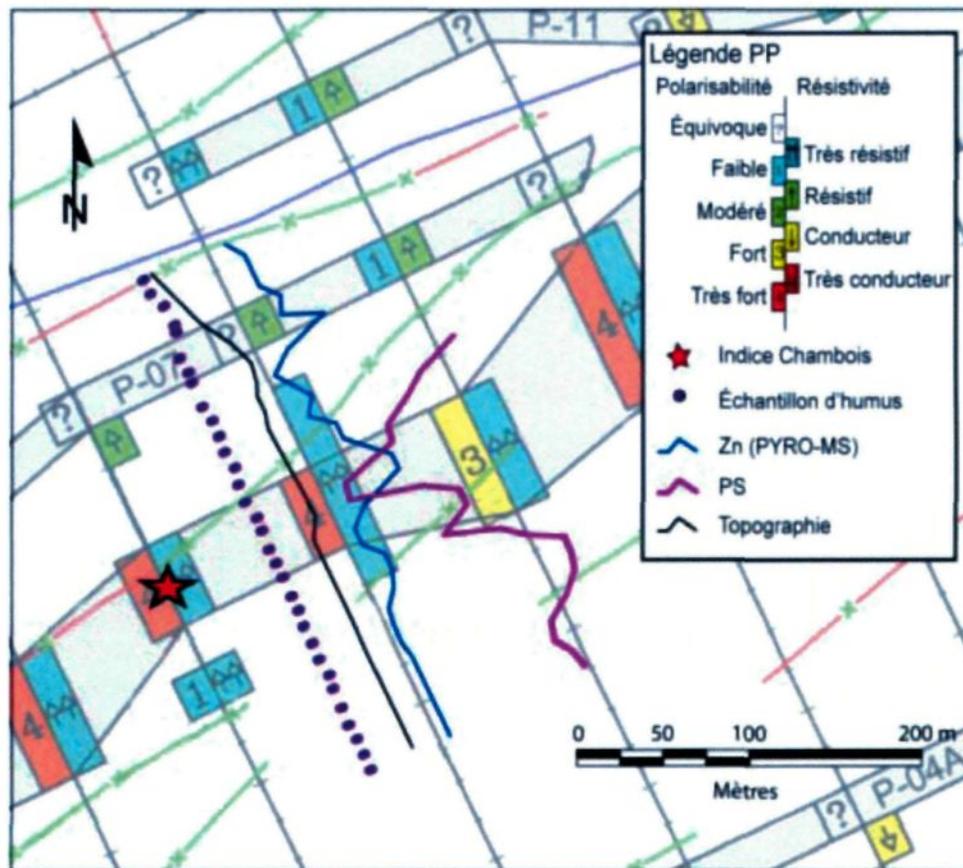


Figure 10 : Mise en plan du profil de l'indice du lac Chambois sur fond de polarisation provoquée et de résistivité (Dubois, 2006; Dubois, 2007). Les lignes grises parallèles orientées à N335° représentent les lignes de coupe qui ont été utilisées pour faire le levé de géophysique au sol. L'indice du lac Chambois est représenté par l'étoile rouge. L'anomalie en Zn analysée par PYRO-MS est représentée par la courbe bleue, les résultats de PS au-dessus du profil d'échantillonnage correspondent à la courbe rose et la topographie est illustrée par le trait noir.

Pour les deux autres transects, la figure 9 démontre que le TT présente un bruit de fond supérieur à celui du TL. Le TL est situé dans une tourbière tandis que le TT se trouve sur un sol podzolique. Cela indique une hétérogénéité du milieu d'échantillonnage et démontre que de nombreux facteurs, tels que la nature du matériel récolté, le pH, l'Eh, etc., doivent être tenus en compte lors de l'interprétation des anomalies pédogéochimiques. De

plus, le profil plat de PS pour les TL et TT démontre l'absence de phénomène d'oxydoréduction créé par une zone minéralisée (Fig. 6 et 9). Toutefois, l'importance des facteurs contrôlant la disponibilité des ETM n'est réellement constatée que lors de la comparaison du TT et du TI. En effet, le bruit de fond des ETM du TT se compare en intensité à la teneur en ETM des anomalies du TI. C'est ce pourquoi les études statistiques du chapitre 6 prennent une importance primordiale dans la compréhension et l'interprétation des levés de pédogéochimie.

5.5.2. Les 3 méthodes

Le PYRO-MS est la méthode qui présente les plus faibles teneurs en ETM. Il permet d'extraire uniquement les ETM liés dans la composante organique labile du sol (Hall et al., 1996). De cette façon, la signature reflète la mobilité ionique de l'élément, la prémisses étant que les ETM du minerai et les traceurs sont transportés par divers mécanismes de la source à l'environnement superficiel. Les ions y sont détenus dans des formes labiles, faiblement fixés aux sites électronégatifs du complexe argilo-humique. Cette méthode évite donc de mettre en solution d'autres formes telles que les oxydes cristallins, les silicates et les sulfures, lesquelles sont détectées par le TD-MS et le XRF.

Le TD-MS et le XRF sont deux méthodes dites totales et devraient théoriquement donner des teneurs similaires, quoique plus élevées que le PYRO-MS. Dans l'ensemble, les analyses XRF donnent des teneurs similaires à celles obtenues par TD-MS. Seuls Ti, Cu et les éléments présentant des problèmes analytiques dans la méthode TD-MS (As, Cr, Th, et Zr) montrent des teneurs manifestement plus élevées lorsqu'analysées par XRF. Par contre,

le XRF semble donner des résultats plus représentatifs pour As, Cr, Th et Zr. Ainsi, malgré la limite de détection plus élevée des analyseurs XRF portables, les analyses permettent, à priori, de mettre en évidence des anomalies en ETM.

Le fer dosé par PYRO-MS devrait représenter la teneur en fer ferreux (Fe^{2+}) puisque ce dernier est habituellement soluble. Quant au fer ferrique (Fe^{3+}), il est radicalement insoluble et présent sous forme d'oxyde et d'hydroxyde de fer. Seule la mise en solution TD-MS peut mettre en solution le Fe^{3+} . Toutefois, une dispersion de fines particules ferrugineuses semble être provoquée par l'analyse au PYRO-MS (Hall et al., 1996), résultant en un taux de Fe extrait supérieur à celui exclusivement lié à la MO.

Les avantages et les inconvénients des trois méthodes d'analyses utilisées sont tels que même si le TD-MS est le seul à détecter le Sb et le Bi (Fig. 9), il présente néanmoins des problèmes analytiques importants. Le PYRO-MS a l'avantage de mettre en solution uniquement les ETM faiblement liés, soit ceux étant susceptibles d'avoir été libérés d'un conducteur métallique.

CHAPITRE 6

ANALYSES STATISTIQUES

Afin d'extraire le maximum d'informations à partir de la base de données recueillie, des techniques statistiques sont utilisées. Les méthodes statistiques multivariées permettent de réduire les grands ensembles de données en quelques schémas simples qui décrivent les tendances géochimiques principales et d'aider à l'interprétation (Grunsky, 2010). Puisque la composante détritique des échantillons n'est pas souhaitée, l'analyse au PYRO-MS a été sélectionnée puisqu'elle permet d'extraire les ions sous forme labile et piégés dans l'humus.

L'étude des valeurs aberrantes a dû être faite avant de procéder aux analyses statistiques. La teneur anormale en Zn de 441000 ppb obtenue pour l'échantillon 74550025 par lessivage au PYRO-MS a ainsi été rejetée. Par la suite, deux principaux filtres ont été appliqués. Le premier consiste à éliminer les variables considérées redondantes puisqu'elles présentent une très forte corrélation ($r > 0,9$). Pour ce faire, les coefficients de corrélation entre les divers ETM dosés par PYRO-MS ont été calculés. Cela a permis d'éliminer Hf puisqu'il est très fortement corrélé avec Zr. Une très forte corrélation est également présente entre tous les éléments terres rares (ETR) et seuls Ce et Th ont été conservés. Le second filtre consiste à rejeter les ETM analysés présentant plus de 20% d'analyses sous la

limite de détection (LD). Un total de 18 ETM a ainsi été conservé, soit : Ba, Cd, Ce, Co, Cs, Cu, Fe, Ga, Mo, Mn, Nb, Pb, Rb, Sr, Th, V, Zn et Zr. Parmi ces ETM, une valeur de LD/2 a été attribuée aux observations situées sous la LD. Les auteurs Farnhama et al., (2002) ont démontré que dans le cas d'analyses multivariées, la substitution des valeurs < LD par LD/2 est supérieure à la substitution par 0 ou LD. Ils soulignent également que toutes les simulations effectuées se comportaient mal lorsque le nombre d'observations < LD était de plus de 30%.

Par ailleurs, les données géochimiques comprennent des mesures d'éléments traces qui sont rapportés en parties par million (ppm). Les rapports en ppm constituent le potentiel de la fermeture, les concentrations en éléments traces peuvent interférer les uns avec les autres, surtout quand un ou plusieurs des éléments d'intérêt est proche de zéro (Grunsky, 2010). Ainsi, lors de l'application d'analyses multivariées, il est crucial d'appliquer une transformation appropriée. Une transformation logarithmique permet souvent de réduire l'asymétrie des données, mais ne tient pas compte de la nature de la composition des données (Filzmoser et al., 2009). Aitchison (1982) a proposé plusieurs transformations possibles de la famille des transformations log-ratio. Une transformation log-ratio centré (LC) a été appliquée aux données où : valeur LC = $\ln(\text{valeur initiale} / \text{moyenne géométrique})$. Cette dernière effectue une transformation des variables de façon symétrique et permet donc une interprétation plus fiable et statistiquement défendable qu'avec l'utilisation de données brutes (Grunsky, 2010).

6.1. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) permet de mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre les variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles. Elle consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Les nouvelles variables résultantes de l'ACP sont des combinaisons linéaires orthogonales des variables originales et sont nommées « composantes principales (CP) ». Elles définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. La première CP explique une grande partie de la variance totale de l'ensemble de données, et chaque CP suivante explique une plus petite partie de l'écart restant. Les différentes CP sont ensuite liés à des processus communs qui affectent les variables. Le nombre de composantes principales significatives pour l'interprétation est sélectionné sur la base du critère de Kaiser (1960) avec une valeur propre supérieure à 1 et un total de variance expliquée égal ou supérieur à 70%.

La reconnaissance d'une anomalie géochimique nécessite qu'une teneur de fond géochimique ait été établi. Ainsi, afin de révéler la structure des corrélations entre les variables, des analyses en composantes principales (ACP) ont été effectuées à l'aide du logiciel Statistica® (v. 6.0). Les données utilisées sont celles provenant des profils témoin et de la ligne électrique. Les analyses des échantillons du transect de l'indice n'ont pas été utilisées pour éviter le biais causé par la présence de l'anomalie. Les CP extraites de l'analyse proviennent d'une matrice concernant 143 échantillons de sol et 18 variables

(éléments en LC). Il est à noter que différentes ACP ont été effectuées et les trois CP interprétées demeurent identiques, mêmes lors de l'ajout ou de la soustraction de variables ainsi qu'en incluant celles du transect de l'indice.

Le tableau 6 montre le poids des facteurs des CP obtenues par l'APC en utilisant les concentrations en éléments (en LC) des échantillons de sol. Trois CP ont été prises en compte dans l'analyse factorielle, ce qui représente 75,22 % de la variance totale des données.

Tableau 6 : Analyse en composantes principales des analyses PYRO-MS effectuées sur les données en log-ratio centré. Le poids des facteurs pour chaque ETM, la variance expliquée et la variance cumulative sont présentés pour les composantes principales (CP).

	CP1	CP2	CP3
Ba	-0,389917	-0,211218	0,013969
Cd	-0,623509	0,396983	-0,186621
Ce	0,338214	-0,377530	-0,224513
Co	-0,570831	-0,091121	-0,160967
Cs	0,691562	0,531963	0,275748
Cu	0,238052	0,291561	-0,269159
Fe	-0,154438	0,254749	0,230587
Ga	-0,087375	-0,287712	-0,011110
Mn	-0,774054	-0,270347	0,193205
Mo	-0,221747	0,479114	0,541725
Nb	0,828489	0,152719	0,090919
Pb	0,046816	0,607191	-0,283727
Rb	-0,050076	0,507077	-0,110769
Sr	-0,698080	-0,285972	-0,037359
Th	0,815229	-0,164861	-0,255839
V	0,101282	-0,738519	0,125887
Zn	-0,561288	0,397372	-0,093802
Zr	0,518841	-0,351216	0,193370
Eigenvalue	4,63	2,76	0,87
Variance expliquée (%)	42,18	25,09	7,95
Variance cumulative (%)	42,18	67,27	75,22

Les valeurs en gras représentent les facteurs avec une valeur de plus de 0,5.

La projection graphique des plans factoriels est illustrée à la figure 11. Cette forme de projection permet de distinguer les coefficients de corrélation, entre les 18 variables sélectionnées, sur les deux différents plans factoriels. Un plan factoriel permet de visualiser simultanément deux facteurs non reliés entre eux. Notons que les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon d'une unité. Plus une variable est projetée vers le bord du cercle, mieux elle est représentée. Par ailleurs, deux

variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

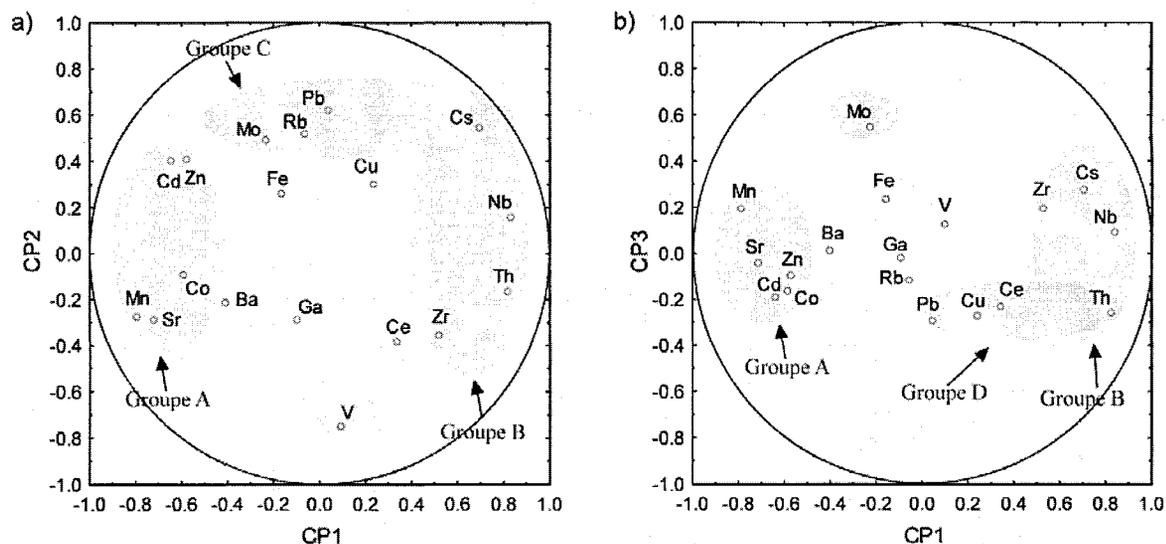


Figure 11 : Projection des 20 variables sur les deux plans factoriels : a) CP1 / CP2; et b) CP1 / CP3.

Les coordonnées des échantillons dans les composantes principales peuvent alors être utilisées. Ainsi, à l'aide de représentation graphiques simples, comme les diagrammes XY et les boîtes à moustaches, les CP peuvent ensuite être positivement ou négativement associées à d'autres facteurs de l'environnement secondaire. Ceux qui seront ici traités sont le pH, l'Eh, le %MO, la profondeur, la CEC effective et la couleur. L'intégration de ces données permet de mieux comprendre les CP d'en interpréter les pôles. Tout au long du texte, la notation suivante est utilisée pour qualifier les coefficients de corrélation :

- Très forte corrélation : $> 0,8$;
- Forte corrélation: entre 0,6 et 0,8;
- Une bonne corrélation: entre 0,4 et 0,6;
- Faible corrélation: entre 0,3 et 0,4 ;
- Absence de corrélation : $< 0,3$.

Des coefficients sont fournis pour chaque variable (échantillon) dans la combinaison linéaire de chaque CP. Plus le coefficient est éloigné de zéro, plus la contribution de cette variable à la composante est importante (Quinn and Keough, 2002). Ces coefficients peuvent ainsi être projetés dans des diagrammes xy avec les paramètres mesurés sur chacun des échantillons afin de tenter d'expliquer les CP.

6.1.1. CP1

Dans le premier plan factoriel (CP1/CP2, représentant 67,27 % de l'information globale de l'ensemble de données), la première composante (CP1) explique 42,18% de la variance totale. La CP1 est définie par deux groupes opposés et corrélés négativement. Afin de faire un parallèle avec la figure 11, l'extrémité négative est ici nommée CP1- et l'extrémité positive CP1+. Par contre, seule l'opposition entre deux groupes d'ETM est représentative et leur emplacement dans le pôle positif ou négatif n'est point caractéristique. Ainsi, sur la figure 11, la CP1- indique le groupe A (Mn, Sr, Cd, Co et Zn) et la CP1+ le groupe B (Nb, Th, Cs et Zr).

Cette première composante principale est caractérisée par une forte corrélation positive de 0,61 avec le pH (Fig.12a) et avec une bonne corrélation négative de -0,44 avec la CEC effective (Fig.12d). Toutefois, la corrélation avec la CEC montre une bonne dispersion autour de la droite. Aucune corrélation n'est relevée avec l'Eh, la profondeur, le %MO et la couleur des échantillons (Fig.12).

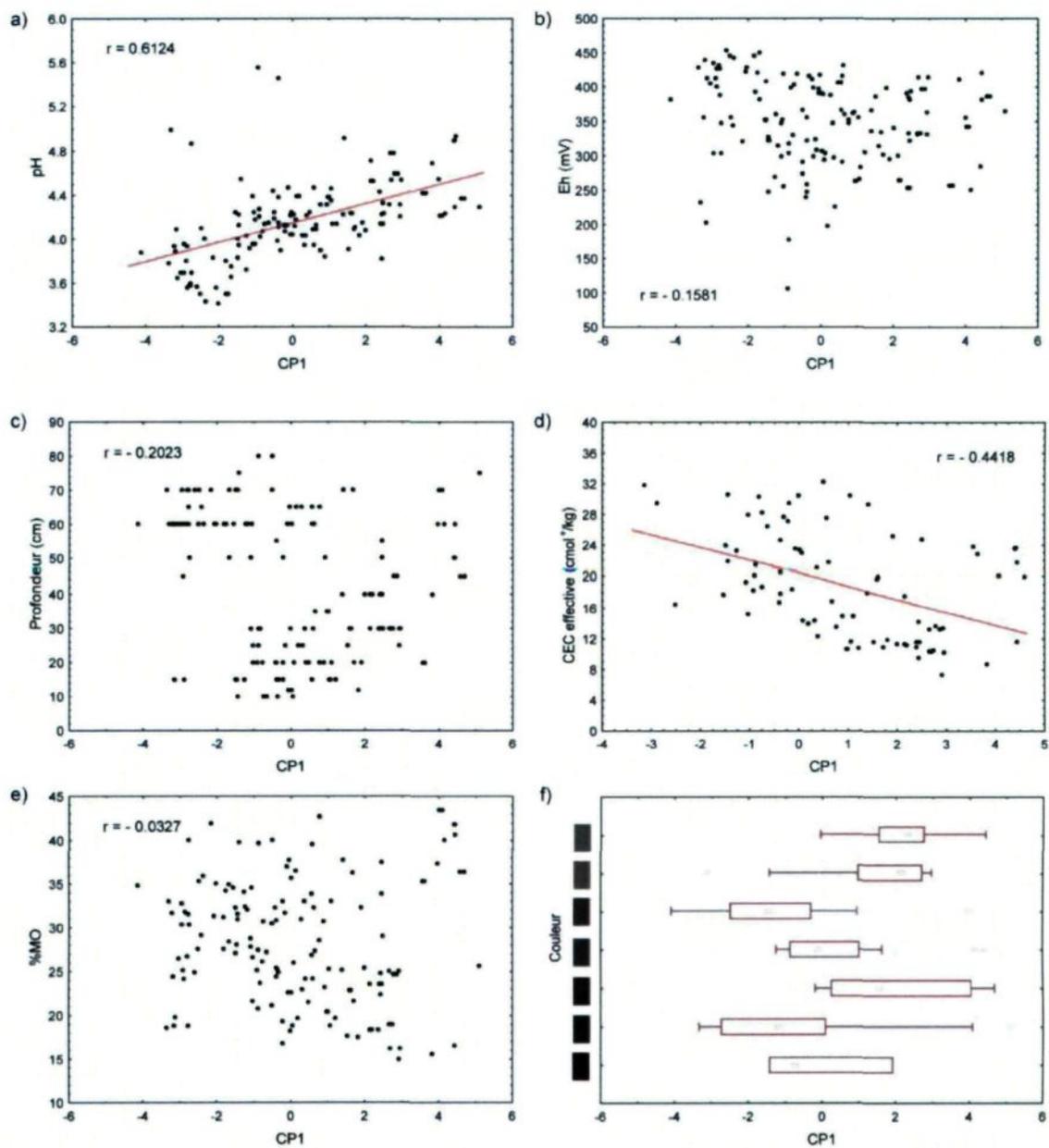


Figure 12 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP1 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur.

Les éléments du groupe A sont majoritairement présents dans la solution de sol sous leur forme ionique divalente ex : Mn^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+} et Co^{2+} (De Vos et al., 2006). Ils sont caractérisés par un faible potentiel ionique ($z/r < 3$). Le potentiel ionique est défini par : z/r (z = nombre de charges ; r = rayon ionique), et il correspond à la densité de la charge. Il indique si l'ion sera fortement ou faiblement attiré électrostatiquement aux ions de charge opposée et dans quelle mesure les ions vont repousser les ions de charge similaire (Railsback, 2003). Les ETM de faible potentiel ionique, comme ceux du groupe A, sont ainsi incapables de briser les liens de la molécule d'eau. Ils sont donc, solubles, stables en solution aqueuse et demeurent ainsi en solution en tant qu'ion hydraté (Railsback, 2003). Les cations monovalents et divalents sont donc libres dans la solution du sol pour un grand éventail de pH (Essington, 2004). Le Ba présente un comportement géochimique similaire et ce dernier pourrait être inclus dans le groupe A.

Quant aux éléments du groupe B, le Th^{4+} , Nb^{5+} et Zr^{4+} sont des ETM à potentiel ionique intermédiaire ($3 < z/r < 12$) et ils sont communément appelés les HFSE (*High Field Strength Elements*). Ces cations qui sont petits, très chargés et abondamment hydratés ont donc la capacité de former des liaisons relativement fortes avec O^{2-} . En conséquence, ils forment des oxydes et hydroxydes stables et très peu solubles dans les environnements oxydants (Railsback, 2003). Par contre, la présence du Cs^{+} dans le groupe B est inattendue. Le Cs est un ETM à faible potentiel ionique, mais c'est un élément incompatible possédant un large rayon ionique lui conférant un comportement analogue aux autres éléments du groupe B.

La figure 13 montre comment la distribution des teneurs des ETM à faible potentiel ionique (ex : Mn^{2+} et Zn^{2+}) sont peu influencés par le pH de la solution du sol et montre une distribution normale en fonction du pH. À l'opposé, les ETM à fort potentiel ionique (ex : Zr^{4+} et Th^{4+}) s'hydrolysent dans les environnements oxydants. Ce sont les hydrolysats (hydroxydes insolubles). Dans les sols à l'étude, le Zr^{4+} et le Th^{4+} semblent subir une hydrolyse suivie d'une précipitation des cations à des pH autour de 3,8. Ils peuvent alors être accumulés dans le sol. En deçà de ces pH, les teneurs en Zr et Th sont près des limites de détection.

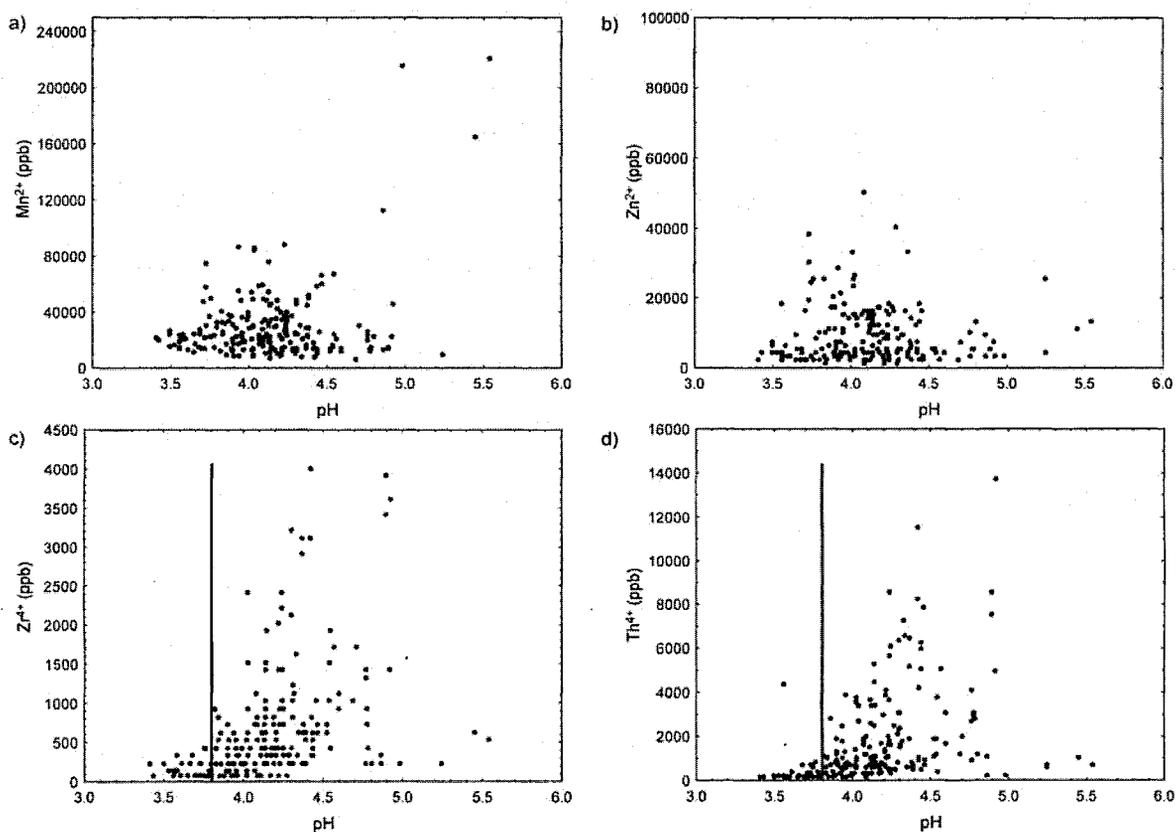


Figure 13 : Teneur des ETM en fonction du pH. Sont illustrés : a) Mn^{2+} ; b) Zn^{2+} ; c) Zr^{4+} ; et d) Th^{4+} .

Le premier facteur responsable de plus de 40% de la variabilité des résultats d'analyse de PYRO-MS semble être affecté par le pH du matériel échantillonné. La CEC montre également une bonne corrélation avec la CP1, mais une corrélation très forte avec une dispersion beaucoup moins importante autour de la droite est constatée avec la CP3 et sera discuté plus loin.

6.1.1.1 CP1 - Discussion

Plusieurs auteurs identifient le pH et l'Eh comme les principaux facteurs qui contrôlent l'adsorption et la disponibilité de nombreux ETM (Harter, 1983; Hooda, 2010; Soares et al., 2011). Aucune relation avec l'Eh n'a été révélée, mais les données du présent projet peuvent être sujettes à argumentation considérant le long délai entre la récolte des échantillons et la prise de la mesure.

Dans les sols, c'est sans doute la phase aqueuse qui est la plus importante car c'est là que presque toutes les réactions chimiques sont régies, soit l'hydrolyse, les réactions d'oxydoréductions et la complexation des cations (Essington, 2004). Dans les solutions aqueuses, la charge positive des cations attire les électrons de l'oxygène de la liaison O-H. Cela a pour effet d'augmenter la polarité de la liaison et la rend plus facile à briser. Tous les ETM n'ont toutefois pas la même énergie d'hydratation. Cette dernière dépend principalement du potentiel ionique et de l'électronégativité de l'ion (Railsback, 2003). La tendance pour l'hydrolyse augmente ainsi de gauche à droite dans le tableau périodique.

Ainsi, les cations présentant un potentiel ionique intermédiaire ($3 < z/r < 10$), tel que les éléments du groupe B, vont être fortement influencés par le pH de la solution du sol. Leur teneur sera considérablement plus élevée à un pH supérieur à 4, approximativement. En revanche, ceux présentant un potentiel ionique faible ($z/r < 3$), comme ceux du groupe A, ou un potentiel ionique fort ($z/r > 10$) sont solubles dans ces solutions (Railsback, 2003). La figure 14 montre le potentiel ionique des éléments en fonction de leur charge (abscisse) et du rayon ionique (ordonnée). Cette figure permet de distinguer les cations solubles de ceux qui sont insolubles aux pH neutres.

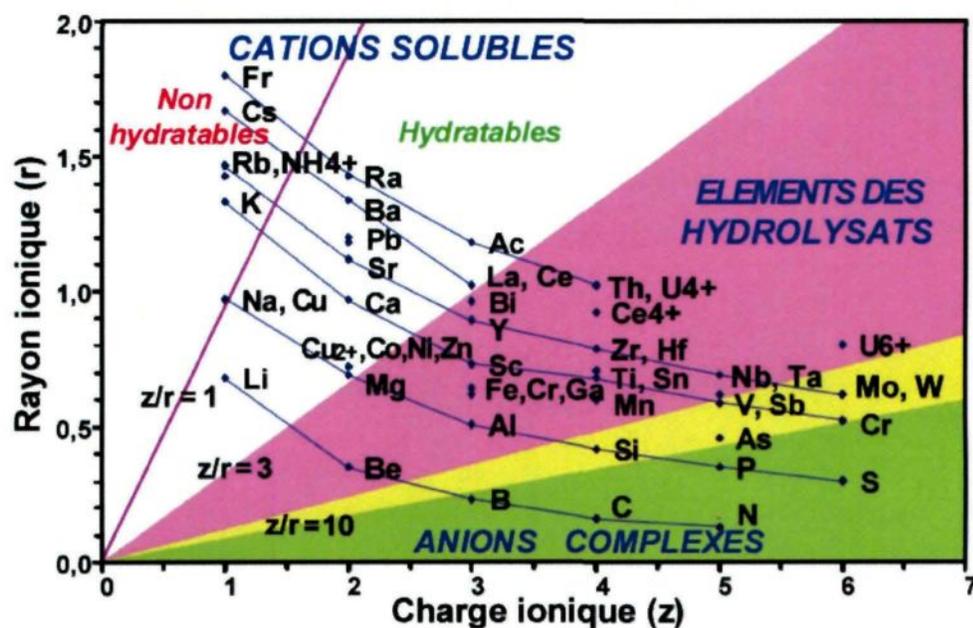


Figure 14 : Classement des ions selon leur potentiel ionique (z/r). Sont représentés les cations solubles ($z/r < 3$), les hydrolysats ou hydroxydes insolubles ($3 < z/r < 10$) et les oxyanions solubles ($z/r > 10$). Les lignes bleues représentent les périodes du tableau périodique des éléments. Les données proviennent de Goldschmidt (1934) et l'image est de Thiry (2010).

Il est possible de se référer aux diagrammes Eh-pH des métaux de Takeno (2005) afin de visualiser le type de contraintes liant le pH et l'Eh à l'équilibre entre les différentes formes des éléments chimiques. Toutefois, des réactions complexes ayant lieu dans les sols, comme la formation de précipités et l'adsorption sur les minéraux argileux et la matière organique, peut limiter la mobilité des ETM (Kabata-Pendias and Pendias, 1992). Il est donc ardu d'établir des règles claires pour les ETM sans faire du cas par cas. Par exemple, Kuo et Baker (1980) ont constaté que la sorption du Cu, Cd et Zn par certains sols acides augmente avec le pH, Cu étant préférentiellement adsorbé à Zn et Cd.

6.1.2. CP2

La deuxième composante (CP2), expliquant 25,09 % de la variance totale, oppose le groupe C (Pb, Cs, Rb et Mo) qui est corrélé négativement avec le vanadium. La CP2 montre une très forte corrélation négative de - 0,84 avec la profondeur des échantillons et une bonne corrélation négative de - 0,58 avec le %MO. Aucune corrélation n'est relevée avec le pH, l'Eh, la CEC effective et la couleur des échantillons (Fig.15).

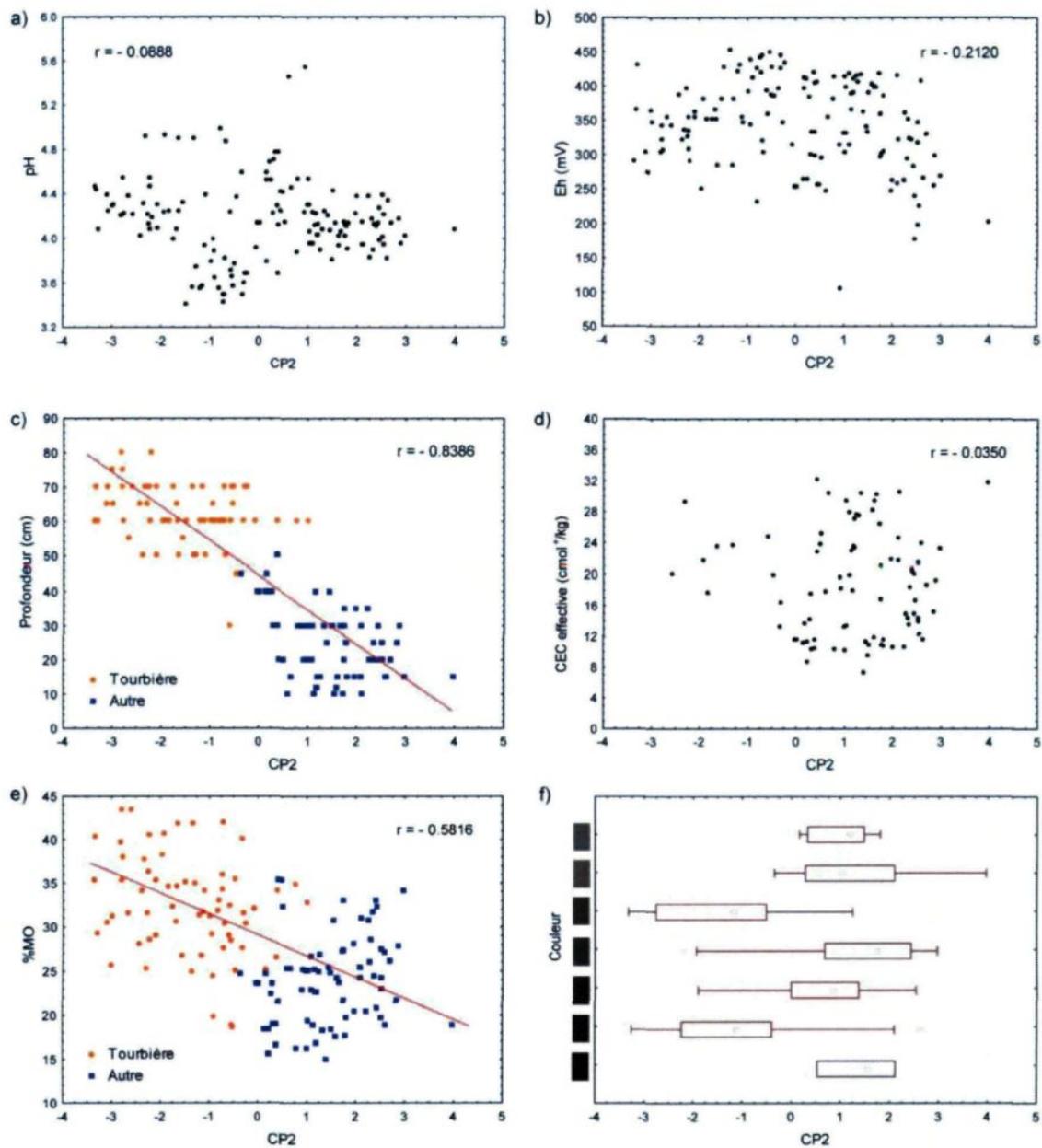


Figure 15 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP2 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur.

Le groupe C (Pb, Cs, Rb et Mo) montre des valeurs positives dans la CP2. La figure 15 (c et e) expose clairement que les échantillons situés dans l'axe positif de la CP2 sont les sols autres que les tourbes, soit principalement des podzols. Dans ces sols, les cations du groupe C sont nettement appauvris dans la partie négative de la CP2 et très fortement concentrés dans l'axe positif de la CP2 (figure 16a). Ceci est également démontré par la forte corrélation négative de - 0,67 entre la concentration des ETM du groupe C et la profondeur des échantillons (Fig. 16b). Par contre, aucune corrélation n'est constatée entre la concentration de ces ETM et le %MO (Fig. 16c). Ceci est un peu inattendu considérant la bonne corrélation de 0,52 entre la profondeur des échantillons et le %MO (Fig. 16d). Toutefois, la figure 16b démontre que même si les plus fortes teneurs sont fortement corrélées avec les échantillons de faible profondeur, ces échantillons présentent un large éventail de teneurs, allant de 250 ppb à 3600 ppb de Rb.

La corrélation entre les différents ETM du groupe C ne peut être expliquée en termes de famille d'élément ou d'autres propriétés chimiques. Quelques rapprochements peuvent toutefois être effectués. Rb et Cs sont deux métaux alcalins et ils entrent principalement dans la composition des feldspaths et des micas, tout comme les alcalino-terreux. Le Pb^{2+} possède également des caractéristiques géochimiques qui ressemblent quelque peu aux métaux alcalino-terreux divalents. Cela confère au Pb la capacité de remplacer K, Ba, Sr et même Ca dans les feldspaths et les micas et sur les sites de sorption. Quant au Mo, sa présence dans le groupe C est assez inattendue puisque le Mo est un oxyanion tout comme Sb, As, W et V. Il montre un comportement géochimique différent des métaux alcalins et alcalino-terreux. Les oxyanions sont des éléments de transition

polyvalents et fortement lithophiles qui forment des composés avec l'oxygène selon leur état d'oxydoréduction. Leur formule générique est $A_xO_y^{z-}$. Il est donc surprenant que le Mo et le V se retrouvent dans deux groupes opposés. Toutefois, certains auteurs affirment que le molybdate (MoO_4^{2-}), contrairement au vanadate (VO_4^{3-}), est plus fortement adsorbé aux complexes de fer hydratés qu'à la MO (Davies, 1956; John, 1957). Fe, Cd et Zn sont d'ailleurs des éléments qui présentent également des poids positifs dans la CP2. La figure 16e montre bien la relation entre la concentration en Fe et la profondeur. Une plus forte concentration des complexes de fer est ainsi constatée dans les échantillons pris à faible profondeur.

À l'opposé, le V montre une valeur négative dans la CP2 et est par conséquent directement reliés aux échantillons provenant des tourbières (Fig. 15 c, e). Par contre, le V présente une faible corrélation positive de 0,32 avec la profondeur (Fig. 16f), indiquant une relation plutôt liée à la tourbe qu'à la profondeur même de l'échantillon. Dans le sol, les agents réducteurs comme la MO viennent jouer un rôle important dans le cycle du V. Les mesures de la teneur en vanadium des sols riches en MO et des tourbes ont montré qu'un enrichissement substantiel de cet élément se produit par rapport à l'abondance géochimique moyenne (Bloomfield and Kelso, 1973; Szalay and Szilagyi, 1967). Le milieu très réducteur des tourbières permet de réduire l'anion de métavanadate mobile (VO_3^-) en cation de vanadyle (VO^{2+}) qui peut être solidement lié à l'acide humique, avec un facteur d'enrichissement géochimique de 50000:1 (Szalay and Szilagyi, 1967). Ce processus est le même que celui pour $(UO_2)^{2+}$, tel que reporté par Szalay (1964).

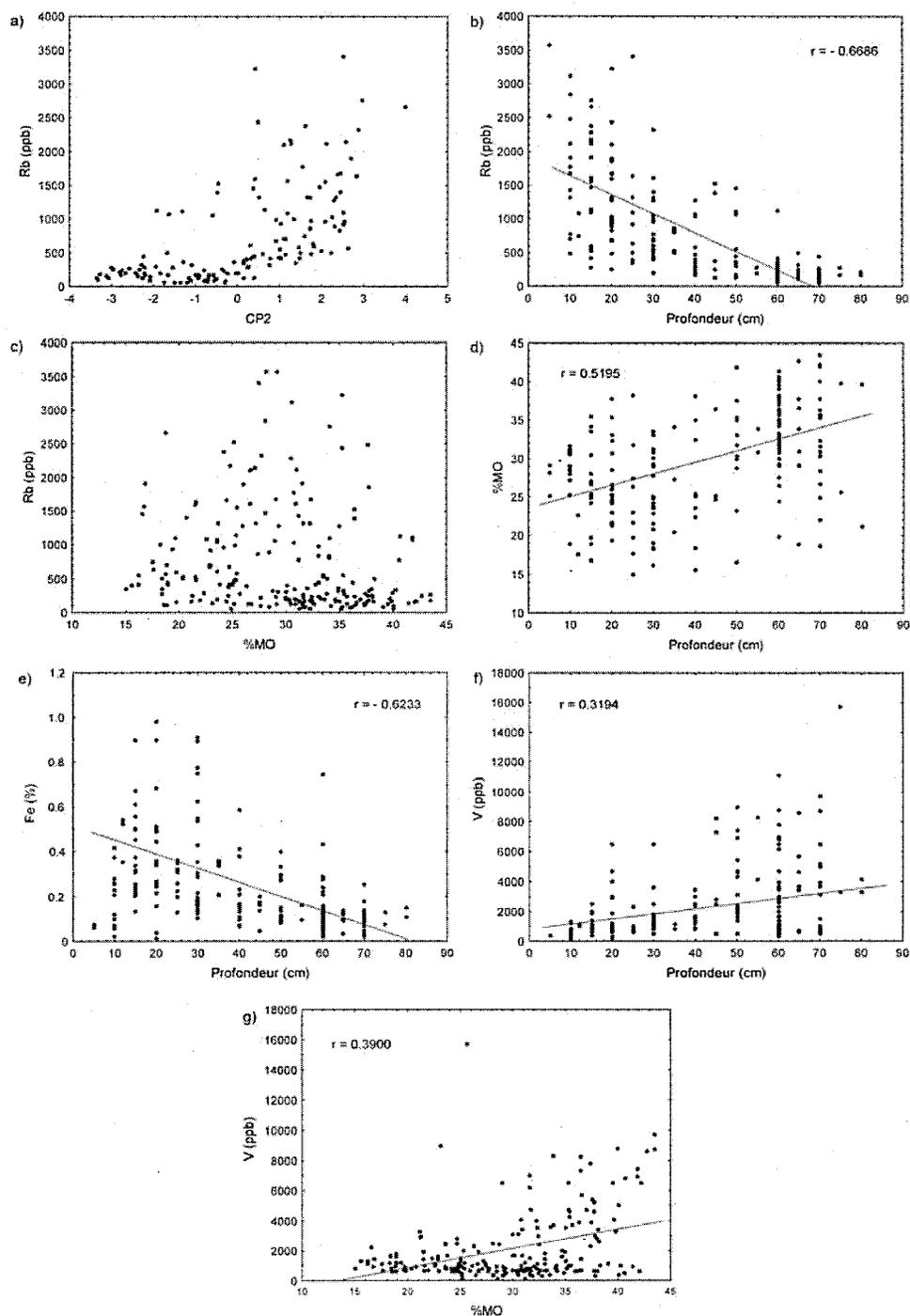


Figure 16 : Ensemble de diagrammes expliquant la CP2 : a) Concentration de Rb (ppb) versus la CP2; b) Concentration de Rb (ppb) versus la profondeur des échantillons; c) Concentration de Rb (ppb) versus le pourcentage de matière organique; d) Pourcentage de matière organique versus la profondeur; e) Concentration en Fe (%) versus la profondeur; f) Concentration de V (ppb) versus la profondeur; et g) Concentration de V (ppb) versus le pourcentage de matière organique.

La très forte corrélation de la CP2 avec la profondeur des échantillons et sa bonne corrélation avec le %MO permettent d'émettre une interprétation. Les échantillons récoltés à de plus grandes profondeurs correspondent précisément aux zones de tourbières. Il était notamment nécessaire de creuser pour obtenir un échantillon d'humus homogène et bien décomposé. Ces derniers présentent un %MO élevé. À l'opposé, les échantillons récoltés plus près de la surface correspondent principalement aux podzols. La figure 17 démontre que le pôle négatif de la CP2 réunit principalement les échantillons du TL, situé dans une tourbière, tandis que le pôle positif de la CP2 correspond aux échantillons récoltés sur le TT, dans les sols podzolisés. En plus, l'extrémité nord du TT, représenté par une CP2 négative, se trouve à la limite d'une tourbière.

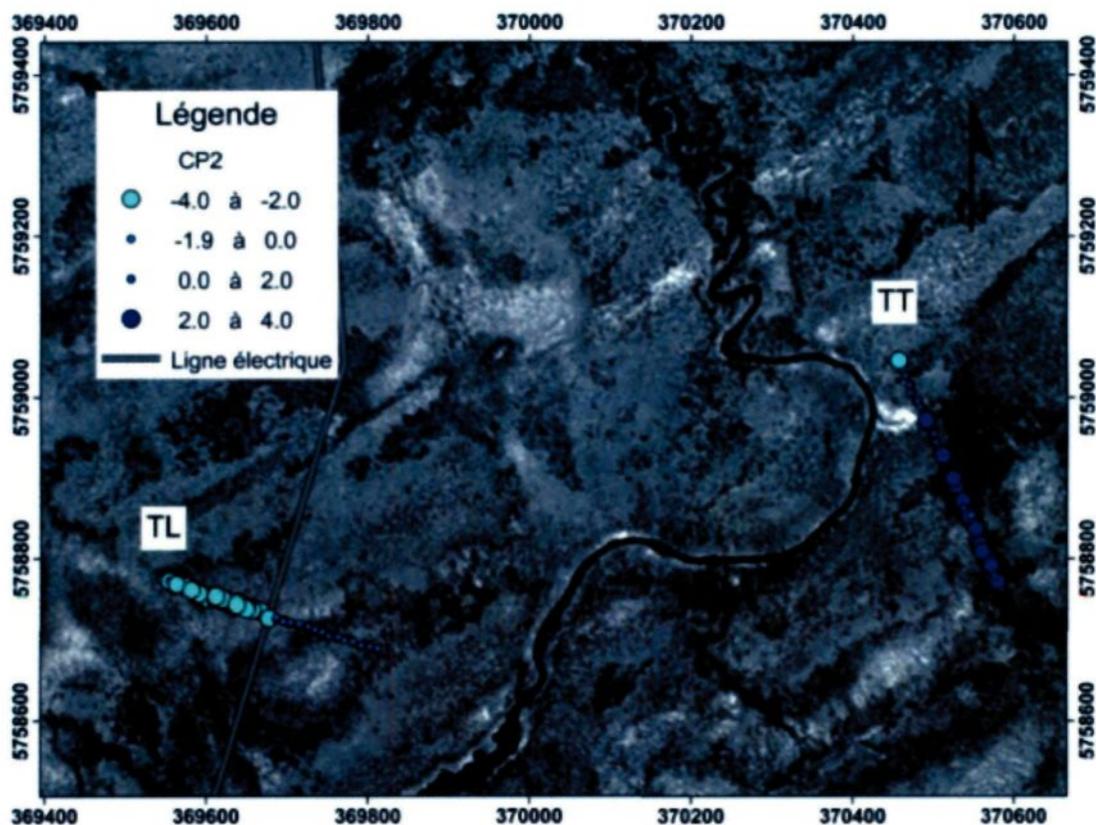


Figure 17 : Mise en plan de la CP2 avec le pôle négatif (points bleu pâle) et le pôle positif (points bleu foncé) sur fond de photographie aérienne. Les coordonnées sont en UTM Nad83, Zone 18. Le pôle négatif de la CP2 réunit principalement les échantillons du TL, situé dans une tourbière, tandis que le pôle positif de la CP2 correspond aux échantillons récoltés sur le TT, dans les sols podzolisés.

6.1.2.1 CP2 - Discussion

Ce qui semble expliquer les deux pôles de la CP2 est la nature du substrat échantillonné. Le type de sol et sa composition sont un facteur prédominant dans la fixation des ETM et joue pour 25% de la variabilité des résultats d'analyse. Dans les sols minéraux, comme les podzols, l'altération des argiles en surface du sol par l'acidité superficielle lessive les métaux alcalins et alcalino-terreux et provoque un enrichissement en ces

éléments dans la solution du sol (Duchaufour, 1977). Ils sont également riches en oxyhydroxydes de fer et de manganèse, en acides humiques et en argiles, leur conférant ainsi de bonnes propriétés d'adsorption (Crawford et al., 1993). À l'opposé, la forte acidité des tourbières réduit le fer ferrique (Fe^{3+}) à l'état ferreux (Fe^{2+}). Il forme des complexes organo-métalliques mobiles qui sont entraînés vers le bas et fixés sur les horizons minéraux (Duchaufour, 1977).

Dans le cadre de cette étude, l'échantillonnage des tourbières a été effectué à des profondeurs variant entre 45 et 80 cm, laquelle correspond au niveau où la sphaigne est relativement bien décomposée avec une couleur et une texture assez uniforme. Dallaire (2010) a démontré, à l'aide de profils géoradar et d'analyses de perte au feu, que cet horizon n'est pas relié au niveau de la nappe phréatique, tel que défendu par certains auteurs (Aaby and Jacobson, 1979), mais à des conditions froides et sèches liées à la période du Petit Âge Glaciaire (PAG). Des datations radiocarbone (C^{14}) datent la limite supérieure de cet horizon à 313-479 ans avant aujourd'hui (Van Bellen et al., en prép). Ces dates correspondent au PGA, une période de refroidissement climatique qui a sévi sur l'Hémisphère nord entre 1300 et 1800 après J.-C.. Le PGA aurait été causée par des modifications de l'activité solaire (Mauquoy et al., 2004; Van Geel et al., 1999).

À ceci s'ajoute que près de la totalité des échantillons du TI présentant un enrichissement en ETM sont des podzols. Ils ont été pris à de faibles profondeurs (entre 5 et 25 cm) et en contact avec le till, l'horizon Ae ou un bloc qui subit une météorisation. Ils contiennent donc une proportion variable, mais non négligeable, de matière minérale comparativement aux autres échantillons du profil qui proviennent d'un environnement de

tourbière. Il est ainsi difficile de comparer le comportement des ETM des deux milieux, tourbière et podzol, et de déterminer l'amplitude du signal anomal créé par un conducteur métallique situé sous une tourbière.

6.1.3. CP3

Dans le deuxième plan factoriel (PC1/PC3, représentant 50,13 % de l'information globale de l'ensemble de données), la troisième composante (CP3) décrit 7,95 % de la variance. La CP3 oppose le groupe D (Pb, Cu, Th et Ce) qui est corrélé négativement avec le molybdène. La CP3 semble entièrement contrôlée par la CEC effective des échantillons puisqu'elle présente une très forte corrélation négative de - 0,83 avec ce facteur (Fig. 18d). Aucune corrélation n'est observée avec le pH, l'Eh, la profondeur, le %MO et la couleur des échantillons (Fig.18).

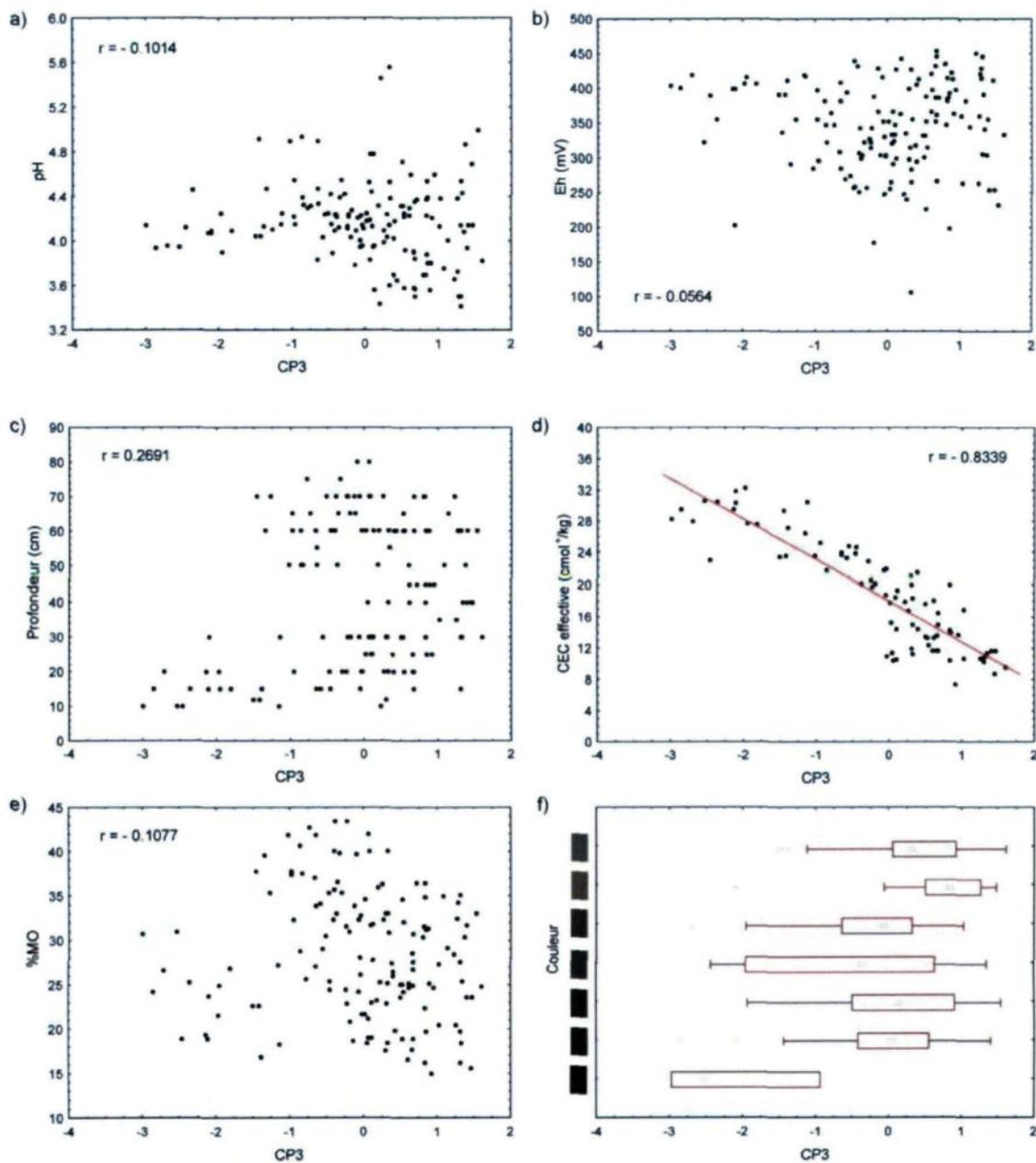


Figure 18 : Diagramme illustrant la corrélation entre la CP3 et les 6 facteurs étudiés : le pH, l'Eh, la profondeur, la CEC effective, le %MO et la couleur.

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure permettant d'estimer la quantité de cations que le sol peut retenir sur son complexe adsorbant. Elle augmente avec l'accroissement de la dominante argileuse et/ou humifère du sol. Par contre, la figure 18a démontre une absence de corrélation entre la CEC et le %MO. Une corrélation positive entre le %MO et la CEC était attendue. Cela peut amener à supposer que la teneur en argiles a une plus grande influence sur la CEC que le %MO. Le contenu en argile n'a toutefois pas été mesuré dans les présents travaux.

La corrélation entre les métaux du groupe D (Pb, Cu, Th et Ce) ne peut être expliquée en termes de propriétés chimiques. Par contre, la capacité d'échange cationique semble être le facteur majeur déterminant la rétention de ces éléments puisque leur teneur augmente avec l'augmentation de la CEC (Fig. 18b), mais n'est point corrélée avec l'augmentation du %MO (Fig. 18c). Les métaux traces tels que le Pb, Cu ainsi que Cd, Co, Ni et Zn se trouvent principalement sous leur forme cationique dans les sols acides (Takeno, 2005). La corrélation positive significative qu'ils ont avec la CEC suggère que l'adsorption de ces ETM est contrôlée par des processus d'adsorption non spécifiques et que la capacité d'adsorption de l'échantillon est dictée par la CEC. L'adsorption non spécifique est un processus où la charge des ions vient balancer les charges sur les particules du sol par attraction électrostatique. À l'opposé, l'adsorption spécifique implique la formation de liaisons chimiques entre les ions et le site d'adsorption, lesquelles ne peuvent être brisés par un détergent doux comme le pyrophosphate de sodium (PYRO-MS). Les ETR, dont Ce et Th, sont également positivement corrélés avec la CEC. Ces éléments sont connus pour être fortement adsorbés sur les argiles et la matière organique du sol

(Kabata-Pendias and Pendias, 1992), lesquels contrôlent la CEC. Cette même relation est observée pour divers ETM tels que Ba, Rb, Sr, Be et Ga.

Tel que précédemment mentionné, le Mo est un oxyanion qui est plus fortement adsorbé aux complexes de fer hydratés qu'aux argiles ou la MO (Davies, 1956; John, 1957). Ceci est appuyé par l'absence de corrélation entre la teneur en Mo et la CEC (Fig. 18d), sa faible corrélation négative de $-0,39$ avec le %Mo (Fig. 18e) et la bonne corrélation de $0,53$ avec le contenu en Fe (Fig. 18f). La forte capacité de sorption des oxydes de fer et d'aluminium pour les phosphates, les molybdates et les sélénites est d'ailleurs reconnue pour les sols à faibles valeurs de pH (Kabata-Pendias and Pendias, 1992). Cette indépendance de l'adsorption à l'égard de la CEC est aussi observée pour Cr, Cs, Hf, Zr et Nb.

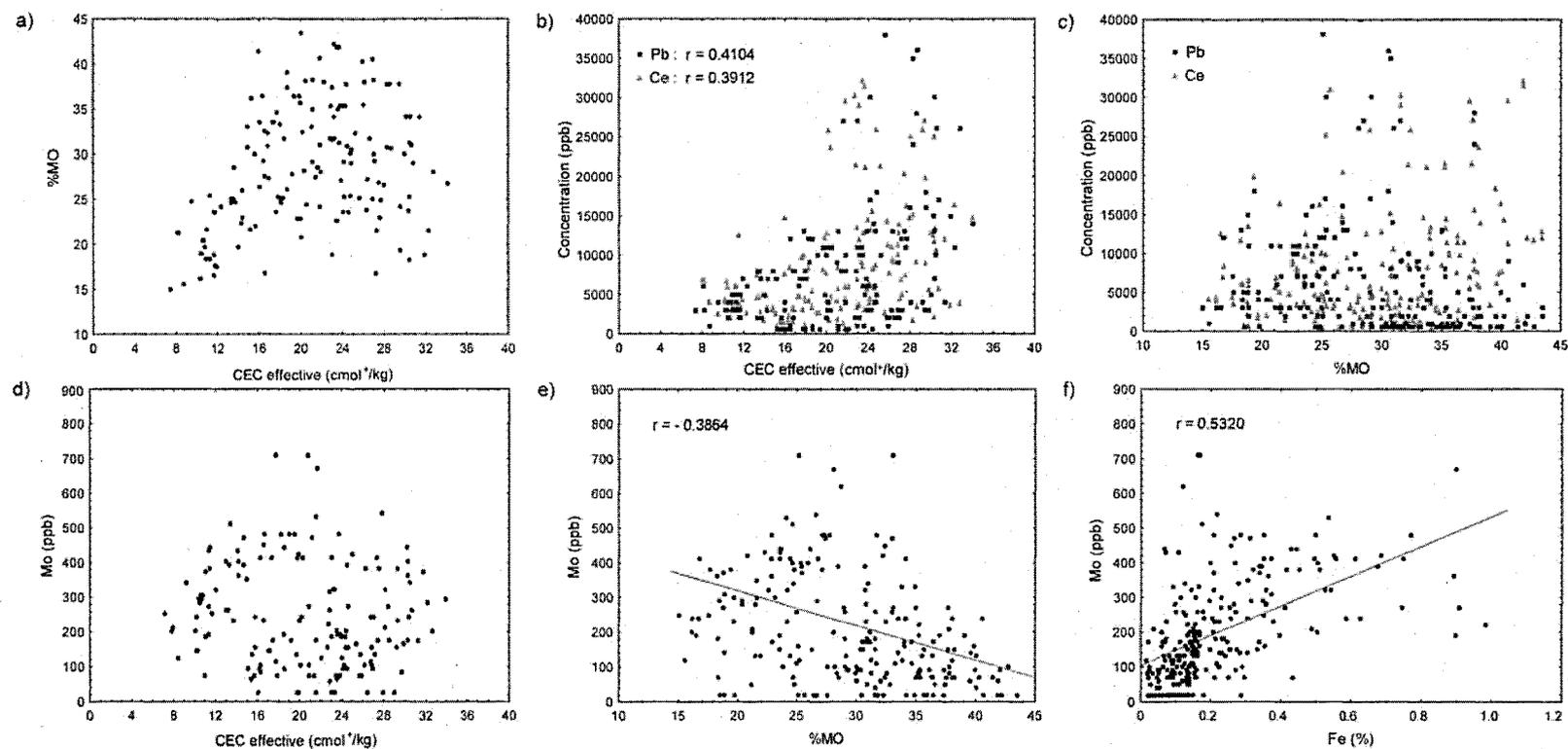


Figure 19 : Ensemble de diagrammes expliquant la CP3 : a) CEC effective versus le %MO; b) CEC effective versus la concentration de Pb et Ce (ppb); c) %MO versus la concentration de Pb et Ce (ppb); d) CEC effective versus la concentration de Mo (ppb); e) %MO versus la concentration de Mo (ppb); et f) Concentration en Fe (%) versus la concentration de Mo (ppb).

6.1.3.1 CP3 - Discussion

La majorité des ETM existent principalement sous forme de cation dans la solution du sol et leur adsorption dépend donc de la densité de charges négatives à la surface des complexes argilo-humiques. L'échange d'ions se réfère alors à l'échange entre les ions balançant la charge de surface des colloïdes et les ions présents dans la solution du sol. Ces phénomènes d'échange sont réversibles, contrôlés par la diffusion, stœchiométrique et dans la plupart des cas, il existe une certaine sélectivité ou préférence de l'adsorbant pour un ion plutôt qu'un autre (Alloway, 1993). La valence semble être le facteur déterminant dans la capacité d'échange ou de remplacement des cations. Les cations de valence plus élevée peuvent remplacer facilement les cations de valeur plus faible, $R^{3+} > R^{2+} > R^{+}$. Dans le cas des ions de même valence, la taille de l'ion hydraté revêt une importance primordiale; plus l'ion est gros, plus sa capacité de remplacement est grande (Holtz and Kovacs, 1991). Par contre, certains ETM font exception. Ce sont principalement ceux qui ont tendance à former des oxyanions comme Cr, Mo, W, V, U, Sb et As (Alloway, 1993). Sans oublier, les HFSE comme Nb, Hf et Zr qui sont très peu solubles. Mais rien n'est aussi simple et des exceptions existent, comme la plus grande affinité des acides humiques pour le Cu et le Pb que pour le Cd et le Zn (Slavek et al., 1982). En somme, ces phénomènes d'échange d'ions, de sélectivité et de préférence de l'adsorbant pour un ion quelconque démontrent bien comment il est nécessaire d'étudier les résultats d'un levé de pédogéochimique élément par élément. De plus, cela amène à remettre en question l'interprétation conventionnelle des anomalies en regards des associations métalliques dans les environnements métallogéniques.

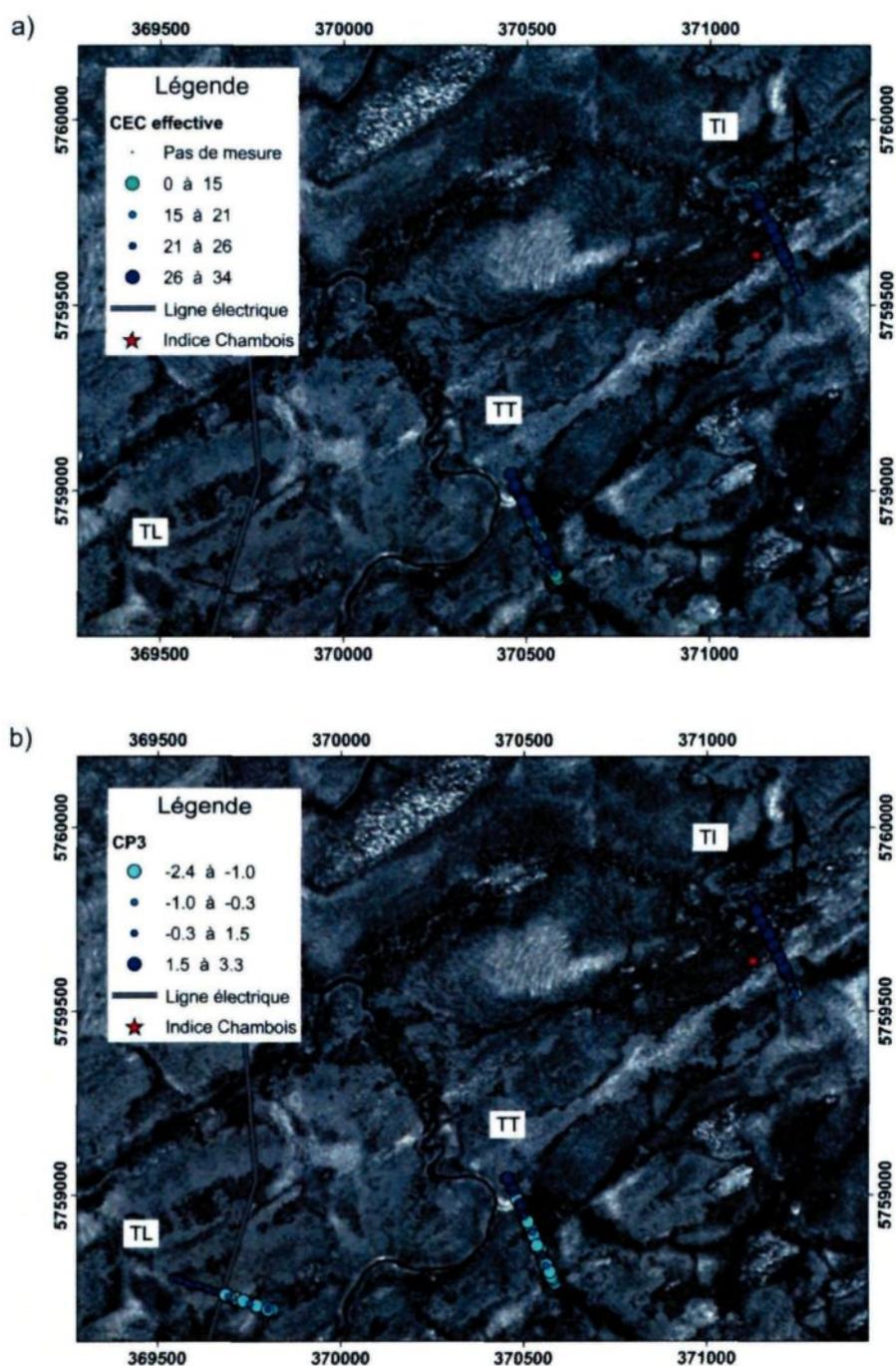


Figure 20 : Projection sur fond de photographie aérienne de : a) La CEC effective avec les valeurs les plus faibles en bleu pâle et les plus fortes en bleu foncé); et b) La CP2 avec le pôle négatif (points bleu pâle) et le pôle positif (points bleu foncé). Les coordonnées sont en UTM Nad83, Zone 18. La similarité des profils de CEC et CP3 pour le TT et le TI traduit la forte corrélation entre ces deux facteurs.

La très forte corrélation entre la CP3 et la CEC s'observe également par la similarité des profils du TT et TI présents sur la figure 20. Ceci permet d'approximer la CEC des échantillons du TL, lesquels n'ont pas été mesurés dans le cadre de l'étude. Les résultats traduisent que les échantillons situés à l'ouest de la ligne électrique devraient présenter une CEC un peu plus élevée que ceux de la partie est, car des veines d'eau naturelles présentes dans la sphaigne ont été observées à l'ouest de la ligne à haute tension et que ces dernières sont interprétées comme étant la cause de la hausse de la CEC. Le courant d'eau apporte des cations, mais aussi de l'oxygène dans la tourbière, favorisant ainsi l'activité biologique et la décomposition de la MO (Duchaufour, 1977). Dans le TT, les fortes CEC sont également liées à un secteur situé à proximité d'un cours d'eau présent dans la partie nord du profil. Les plus fortes CEC mesurées proviennent cependant du TI et elles se superposent avec les anomalies en ETM. Il est reconnu que dans les sols, la quantité d'ETM adsorbés peut excéder sa CEC. Cela implique qu'en plus de l'adsorption non spécifique, d'autres processus comme l'adsorption spécifique, la précipitation et la formation de complexes contribuent également à la rétention des ETM (Adriano et al., 2002). La forte CEC interprétée au-dessus de l'indice du lac Chambois pourrait ainsi être causée par un excès de cations, ce qui est conforme avec le modèle d'Hamilton (2008) où un fort gradient d'oxydoréduction vertical force la migration des cations oxydés vers la surface.

La CEC du sol représente la taille du réservoir permettant de stocker de manière réversible certains éléments cationiques. Dans les tourbières, les sites d'échanges proviennent principalement des groupes fonctionnels organiques qui ont le pouvoir

d'échanger des ions hydrogène. Les sphaignes se caractérisent par une grande CEC et elle augmente avec le degré de décomposition de la tourbe (Payette and Rochefort, 2001). Dans les tourbières ombrotrophes, où les approvisionnements en minéraux sont rares, environ 10% de la CEC peut être prise par des cations divalents, un plus faible pourcentage par des cations monovalents (autre que H⁺) et le reste par des ions H⁺ (Crum and Planisek, 1992).

Les tourbières ombrotrophes produisent une tourbe riche en MO dans les milieux saturés en eau de façon permanente. En anaérobiose non permanente, comme le long des rivières, les fluctuations du niveau de la nappe phréatique avec les saisons permettent l'humification de la MO par les processus biologiques lors la phase de dessiccation (Duchaufour, 1977). Cet humus contient une grande quantité de MO humifiée, mélangée à des argiles, et une CEC plus élevée est ainsi reliée à la proximité des cours d'eau dans les sols hydromorphes. Ceci a d'ailleurs été démontré dans les travaux de Gaudreault (en prep.).

6.1.4. Résumé de l'ACP

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'identifier trois composantes principales permettant d'expliquer 75,22 % de la variance totale des données. Elles sont synthétisées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Sommaire des facteurs de l'analyse en composantes principales.

Facteur (CP)	% Variation Totale	Interprétation	Éléments
CP1 Solubilité	42	Insolubles à pH > 4	<ul style="list-style-type: none"> • HFSE (Nb, Hf, Cs, Zr, Th) • ETR (Ce, Nd, etc.)
		Solubles et mobiles entre pH 3 et 6	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux divalents (Mn, Cd, Co, Zn, Cu, Pb, etc.) <ul style="list-style-type: none"> ○ Alcalino-terreux (Mg, Ca, Sr, etc.)
CP2 Source du matériel	25	Podzol	<ul style="list-style-type: none"> • Minéraux des feldspaths et micas (Pb) <ul style="list-style-type: none"> ○ Alcalins et alcalino-terreux (Rb, Cs) • Autres : Fe, Mo, Cd, Zn
		Tourbière	<ul style="list-style-type: none"> • U, V
CP3 Capacité d'échange cationique	8	Non influencé par CEC	<ul style="list-style-type: none"> • Oxyanions (Cr, Mo, W, Sb, As) • HFSE (Nb, Hf, Zr, Cs) • Fe, Mn
		Influencé par CEC	<ul style="list-style-type: none"> • Pb, Cu, Cd, Co, Ni, Zn, etc. • ETR, etc. (Ce, Nd, Th) • Alcalins et alcalino-terreux

CHAPITRE 7

INTÉGRATION DES RÉSULTATS

Dans le présent chapitre, sur la base des différentes observations et interprétations des chapitres précédents, l'application du modèle de diffusion électrochimique de Hamilton (1998) sera discutée. Mais avant cela, un retour rapide sur les contrôles de l'adsorption des ETM dans les sols permettra de discuter ces paramètres essentiels à la compréhension des processus menant à la formation d'une anomalie pédogéochimique.

7.1. CONTRÔLES SUR LA MOBILITÉ DES ETM DANS LES SOLS

Lors de l'analyse en composantes principales menée dans le cadre de cette étude, trois facteurs principaux responsables de la variabilité des résultats d'analyse ont été identifiés.

Le premier facteur est lié au pH du matériel échantillonné. La fixation des éléments est principalement une fonction du pH du sol, des quantités relatives d'ions présents et du potentiel ionique de ces derniers (Railsback, 2003). Dans les environnements oxydants, les ETM à potentiel ionique intermédiaire ($3 < z/r < 12$) sont très peu solubles et ils ont tendance s'hydrolyser et à former oxydes et hydroxydes stables. Ces éléments précipitent

lors d'une faible augmentation du pH et une accumulation de ces ETM peut ainsi être engendrée. Ces éléments sont appelés les hydrolysats (hydroxydes insolubles) et ils peuvent être identifiés sur la figure 14. À l'opposé se retrouvent les ions de faible potentiel ionique ($z/r < 3$). Ces derniers sont peu influencés par le pH de la solution du sol. Ils se retrouvent donc à l'état soluble et ils sont stables en solution aqueuse pour un grand éventail de pH. Ce sont principalement des cations monovalents et divalents comme les alcalins et les alcalino-terreux (Fig. 14).

La seconde cause responsable de la variabilité des résultats est la différence de nature du substrat échantillonné, soit tourbière versus podzol dans le présent projet. Dans les tourbières, la libération d'ions H^+ par l'acide uronique contribue fortement à l'acidification du milieu. Cette forte acidité des tourbes tend à réduire le Fe^{3+} en Fe^{2+} et permet ainsi son élimination du profil. Par contre, cet environnement très réducteur crée de forts enrichissements géochimiques pour certains ETM comme pour le vanadium et l'uranium. En revanche, les podzols présentent une forte quantité d'oxyhydroxydes de Fe et Mn, d'acides humiques et fulviques et d'argiles. Ils présentent donc un nombre important de sites d'adsorption susceptibles de fixer les ETM. De plus, dans les podzols, un enrichissement en métaux alcalins et alcalino-terreux est provoqué par l'acidité superficielle du sol qui provoque l'altération des particules de la taille des argiles.

Finalement, un plus faible pourcentage de la variance correspond à la CEC effective des échantillons. La CEC d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe absorbant à un pH donné. Son importance augmente avec l'accroissement de la teneur en argile et matière organique du sol. Dans les sols hydromorphes, certaines

caractéristiques de l'environnement secondaire telles que la proximité de cours d'eau permet d'augmenter le degré d'humification du sol et ainsi d'accroître la CEC. D'autre part, les cations retenus sur les colloïdes du sol peuvent être échangés. L'augmentation de la valence de l'ion et de sa taille contribue à accroître sa capacité de remplacement sur les sites de fixation du sol. Certains ETM comme les oxyanions et les HFSE font toutefois exception, ces derniers étant indépendants de la CEC des sols.

Ensemble, ces trois facteurs contribuent à plus de 75% de la variabilité des résultats d'analyse de PYRO-MS dans la présente étude. La compréhension de l'environnement secondaire devient ainsi un préalable essentiel à l'interprétation des données de pédogéochimie puisque les mécanismes de liaison des ETM diffèrent en fonction de la forme mobile de l'ion et des conditions géochimiques de l'environnement de surface.

7.2. APPLICATION DU MODÈLE DE HAMILTON

L'un des principaux objectifs du présent projet était de récolter diverses données afin de déterminer s'il est possible d'intégrer ces résultats dans le modèle de diffusion électrochimique de Hamilton (1998). Brièvement, ce modèle se base sur la présence d'une différence de potentiel électrique généré naturellement dans le sol recouvrant un conducteur métallique, la polarisation spontanée (PS). La force motrice de la migration des ETM vers le milieu récepteur provient d'un très fort gradient d'oxydoréduction vertical existant juste au-dessus du conducteur dans le substratum rocheux. Ce dernier permet de dissiper la charge négative vers l'extérieur du sommet du conducteur. La charge est transférée par différentes réactions, soit par des cations oxydés qui migrent en sens inverse, par de

l'oxygène dissout ou par des phases solides oxydantes au bord du front redox créées par le mouvement des anions réduits. Ainsi, tandis que les espèces anioniques réduites migrent vers le haut et vers l'extérieur, une « colonne réduite » se forme dans le dépôt saturé en eau souterraine.

7.2.1. Indice du lac Chambois

Le transect recoupant l'indice du lac Chambois (TI) présente quelques caractéristiques concordantes avec le modèle de diffusion électrochimique et d'autres qui sont discordantes. Ces points supportant et réfutant le modèle seront ici développés.

7.2.1.1 Paramètres en accord avec le modèle

Les deux profils recoupant le TI démontrent une diminution typique du PS au-dessus de la zone minéralisée (Fig.10). Cette anomalie négative de -90 mV confirme la présence d'un plus grand potentiel d'oxydoréduction au-dessus du corps minéralisé. Le premier prérequis nécessaire à la diffusion électrochimique des ETM est donc présent.

De surcroît, des anomalies en ETM ont été détectées au-dessus de l'indice du lac Chambois ainsi qu'au-dessus d'une faible anomalie de polarisation provoquée et de résistivité située un peu plus au nord (Fig.10). Cette seconde anomalie pourrait laisser présager un autre corps minéralisé est possiblement présent autour de la station - 80 m. Les ETM qui montrent une anomalie positive à l'apex de l'indice sont Zn, Pb, Cd, As, Sb et Bi. Cette association d'éléments chimiques semble concordante avec la géochimie d'un gîte de sulfures massifs volcanogènes (SMV). Les SMV présentent un assemblage habituel de Cu, Zn et Pb et ils peuvent être des sources importantes de Ag, Au, As et sous-produits de Sn,

Cd, Sb et Bi. Toutefois, il serait inexact de considérer que les ETM présents dans l'anomalie géochimique reflètent exactement la nature du dépôt minéralisé. Il a été démontré que les différents éléments chimiques possèdent des comportements géochimiques distincts. Une dissociation des ETM est attendue selon leurs comportements respectifs. Une bonne connaissance du comportement chimique individuel des différents éléments est encore une fois nécessaire afin d'interpréter le signal géochimique obtenu.

La bonne juxtaposition des anomalies géochimiques et de PS avec le levé de polarisation provoquée et de résistivité (Fig.10) suggère la présence d'anomalies apicales centrées sur le conducteur enfoui. Un léger décalage vers le nord des anomalies géochimiques peut être suspecté, ce qui n'est pas clairement relevé sur le profil de PS. Quelques hypothèses peuvent alors être exposées. Une légère pente vers le nord est susceptible mener à la diffusion des ETM dans cette direction. De plus, la présence d'un cours d'eau au nord du transect augmente la CEC des sols en périphérie et peut également créer un enrichissement en ETM. D'autre part, le levé de polarisation provoquée et de résistivité montre une anomalie faiblement polarisable qui s'étire plusieurs stations au nord de l'indice du lac Chambois. Cette faible anomalie de polarisation pourrait être reliée à la présence de sulfures plus disséminés ou à des minéraux plus faiblement chargeables tels que l'hématite, la magnétite ou la galène.

7.2.1.2 Paramètres en désaccord avec le modèle

Les points négatifs sont que l'environnement acide et réduit tel qu'anticipé au-dessus d'un conducteur dans le socle rocheux n'est pas observé au-dessus de l'indice du lac

Chambois. Toutefois, l'indice forme un petit relief et il est ceinturé au sud et au nord par de grandes tourbières. Le gradient d'oxydoréduction situé au-dessus du conducteur ainsi que l'environnement acide, créé par l'oxydation des sulfures, pourraient être masqués par les deux zones de tourbière fortement acide et réductrice qui entourent le secteur de l'anomalie.

De plus, le délai important entre la récolte des échantillons et la mesure de l'Eh peut empêcher la détection d'une anomalie réductrice puisqu'une oxydation à l'air a pu se produire entre le moment de la récolte et celui des lectures. Il est également reconnu que les sondes ORP sont difficiles à utiliser et que les résultats sont souvent non reproductibles (Bartlett and James, 1995).

La présence d'une anomalie acide et réductrice est caractéristique dans le modèle testé. Son absence suggère, sans infirmer, qu'une diffusion électrochimique des ETM n'a pas eu lieu.

7.2.2. Ligne électrique

L'intérêt de tester le modèle de diffusion électrochimique sous une ligne à haute tension à courant continu vise à tester si un tel champ électrique anthropique est susceptible de stimuler la migration des cations et de créer une fausse anomalie pédogéochimique en effectuant une accumulation superficielle des ETM. Les résultats obtenus montrent un tracé de PS rectiligne (Fig.6). Les champs électriques semblent donc ne pas se propager dans les sols sous-jacents. Une diffusion électrochimique causée par une différence de potentiel d'oxydoréduction engendrée par un champ électrique est donc improbable. Ceci est corroboré par l'absence de concentration en ETM dans les sols à cet endroit (Fig. 9),

traduisant par le fait même qu'aucune mobilisation électrochimique n'est effective. Pour clôturer le tout, aucune anomalie acide et réductrice n'a été décelée sous la ligne à courant continu (Fig. 7).

Néanmoins, il n'est pas exclu que la juxtaposition d'un tel champ électrique anthropique à une cellule d'oxydoréduction causée par conducteur métallique enfoui ne puisse accélérer la remobilisation des ETM.

7.2.3. Autres contrôles

Le modèle de Hamilton (1998) a initialement été développé pour expliquer le transport vertical des ions du corps minéralisé vers la surface dans les dépôts meubles de plus de 5 mètres. L'épaisseur de sol est inférieure à un mètre au-dessus de l'indice du lac Chambois. Dans un tel contexte, un processus de diffusion simple pourrait ainsi être à l'origine des anomalies géochimiques. La faible épaisseur des dépôts empêcherait également la formation d'anomalies larges et diffuses, ce qui peut expliquer pourquoi ce modèle est plus ou moins supporté par les données recueillies.

De plus, le modèle fait référence à un sol relativement homogène latéralement. La présence de tourbières entrecoupées par une petite colline surmontée de matériel glaciaire dans le transect de l'indice augmente les difficultés d'interprétation. En plus d'être susceptible de masquer une anomalie acide et réductrice, les tourbières ont des propriétés distinctes de celles des sols podzoliques, car les deux milieux vont fixer la charge cationique différemment. La signature d'une anomalie conductrice située sous une tourbière risque donc d'avoir un signal et une amplitude différente que celui détecté au-

dessus de l'indice du lac Chambois. De plus, tous les modèles de dispersion électrochimique des ETM du conducteur métallique vers la surface impliquent une oxydation des sulfures à la surface du socle rocheux. Or, dans le cas des tourbières directement en contact avec le socle, l'anaérobie de ces dernières pourrait potentiellement nuire à l'oxydation des sulfures.

La géomorphologie du territoire pourrait avoir une incidence sur la distribution des anomalies. Ainsi, l'écoulement de surface peut amener la dispersion d'une anomalie géochimique dans la direction aval. Toutefois, il faudrait aussi tenir compte que les éléments présentent différents niveaux de solubilité et seront plus ou moins influencés par ce processus. Un exemple illustrant ce phénomène est le comportement de l'uranium. L'uranium est fortement soluble dans les milieux oxydants et sera facilement lessivé et précipité dans un milieu réducteur (Girard, 2009). D'autre part, tel que précédemment mentionné au chapitre 6, la proximité de cours d'eau contribue à augmenter la CEC du sol en leur périphérie.

Le contenu en ETM disponible à être fixés par l'humus semble aussi contrôlé par la nature du dépôt meuble sous-jacent, d'origine glaciaire, alluvionnaires ou autre, et par les différents patrons de drainage que ce dépôt induit (Girard, 2009). Typiquement, les dépôts de nature perméable ont perdu leurs charges minérales facilement altérables pouvant libérer la charge cationique. La contribution des dépôts meubles à la charge cationique de la nappe phréatique est ainsi habituellement faible et la dispersion géochimique sera peu influencée par la dispersion glaciaire.

D'autres facteurs comme les saisons et le niveau de la nappe phréatique peuvent faire varier l'horizon où il y aura la précipitation des ions au contact d'une zone riche en agents oxydants (Hamilton et al., 2008). En somme, les contrôles sur la fixation des ETM par l'humus sont multiples, mais une bonne caractérisation de l'environnement peut aider à palier ces facteurs.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but du présent projet de maîtrise était d'améliorer la compréhension des processus sous-jacents à la déportation et à la fixation des ETM dans l'humus. Les mesures géophysiques, les analyses physico-chimiques et géochimiques ainsi que le traitement statistique des résultats permettent d'amener les conclusions suivantes :

1. Le modèle de diffusion électrochimique de Hamilton (1998) a été testé sur un indice d'Ag, Pb et Zn, soit l'indice du lac Chambois situé sur la propriété Pontax de Ressources Sirios, Baie-James. Une anomalie de polarisation spontanée de -90mV a été détectée au-dessus de l'indice ainsi que des anomalies géochimiques en Zn, Pb, Cd, As, Sb et Bi. Par contre, l'environnement acide et réducteur anticipé au-dessus d'un conducteur dans le socle rocheux n'est pas observé. L'absence d'une anomalie acide et réductrice ne permet pas de confirmer qu'une diffusion électrochimique des ETM a eu lieu.
2. Les champs électriques d'une ligne électrique à courant continu ne semblent pas se propager dans les sols sous-jacents. Aucune anomalie géochimique ou géophysique

n'a été détectée sous la ligne. L'hypothèse d'une mobilisation électrochimique des éléments est donc rejetée.

3. La digestion au pyrophosphate de sodium est la méthode la plus appropriée pour extraire les métaux susceptibles d'avoir migré à travers la couverture de dépôts meubles, du socle rocheux vers la surface. Cette méthode permet d'extraire uniquement les ions détenus dans des formes labiles. La signature de l'anomalie géochimique reflète ainsi la mobilité ionique de l'élément sans doser les éléments provenant de la composante détritique du sol. En plus, elle ne présente que très peu de problèmes analytiques contrairement à l'analyse totale multi acides.
4. L'analyseur à fluorescence X portatif permet de mettre en évidence des anomalies en ETM. Des anomalies en Pb, Zn et As ressortent distinctement à l'apex de l'indice du lac Chambois. Cet appareil a l'avantage d'offrir des analyses rapides et à faible coût.
5. Les principaux facteurs contribuant à la variabilité des résultats d'analyse sont le pH, la nature du substrat échantillonné (tourbière vs podzol) et sa CEC. Il a été démontré que le pH fluctue dans les sols sur de courtes distances et à ceci s'ajoute également l'hétérogénéité des sols à différentes échelles. Quant à la CEC, elle est influencée par de nombreux facteurs qui varient spatialement tels que le %MO, la teneur en argiles et le drainage. Des mesures adéquates du pH ainsi que des notes systématiques pouvant amener des informations pertinentes sur le milieu d'échantillonnage et le drainage semblent être essentielles à l'interprétation des résultats d'un levé de pédogéochimie. Ceci est sans compter qu'une bonne

connaissance des caractéristiques propres des ions est indispensable, notamment le potentiel ionique, la valence et le rayon ionique.

Considérant la forte hétérogénéité de l'humus, une étude approfondie sur l'erreur fondamentale d'échantillonnage est à prévoir. Quelques problèmes liés à la méthode ont été soulevés. Il est essentiel de déterminer le biais apporté par chacune des étapes du processus d'échantillonnage et de traitement afin de le minimiser le plus possible. Un test de réplication est fortement suggéré afin de tester le processus d'échantillonnage. La méthode de Kim H. Esbensen (2011), un expert reconnu dans son domaine, propose de répliquer chacune des étapes dix fois, de l'échantillonnage à l'analyse. Ceci permet d'identifier la variance apportée par chacune des manipulations et ensuite d'apporter des améliorations à la méthode afin de diminuer les erreurs d'échantillonnage.

Par après, une étude plus détaillée comparant un conducteur semblable à celui de l'indice du lac Chambois à un conducteur de sulfures enfoui sous une tourbière ombrotrophe pourrait apporter des informations complémentaires importantes. De plus, l'échantillonnage d'une telle tourbière à diverses profondeurs permettrait de mieux cibler la zone la plus propice à la fixation des ETM. Finalement, le modèle de dispersion électrochimique de Hamilton (1998) aurait avantage à être testé sur un conducteur enfoui sous une épaisseur de dépôts meubles plus importante afin de confirmer la validité du modèle.

RECOMMANDATIONS

Les travaux réalisés ont démontré que la minéralisation de l'indice du lac Chambois peut être détectée par l'échantillonnage d'humus. Une signature anormale en Zn, Pb, Cd, As, Sb et Bi a été décelée dans l'humus à l'apex de l'indice. Par contre, l'expérience acquise au cours de ce projet a permis de constater quelques problèmes liés à la très grande hétérogénéité du milieu. Ceci permet à l'auteur de proposer quelques recommandations s'appliquant tant à la méthode d'échantillonnage qu'au traitement des échantillons. Ces suggestions visent à diminuer la variabilité et le biais et à promouvoir l'obtention d'une meilleure reproductibilité des analyses.

8.1. ÉCHANTILLONNAGE D'HUMUS

Il a été clairement démontré que les sols sont des milieux fortement hétérogènes. Dans le but d'augmenter la représentativité de l'échantillon et de diminuer les effets incontrôlables dus aux autres contrôles précédemment mentionnés, il serait pertinent d'effectuer un échantillon composite à chacune des stations d'échantillonnage. La récolte de l'échantillon d'humus en combinant trois ou quatre sites dans un rayon d'un mètre pourrait fortement diminuer la variabilité due à l'hétérogénéité du milieu.

Il a été démontré que le milieu d'échantillonnage est le second facteur en importance influençant la variabilité des résultats d'analyse. Une fiche de terrain fortement détaillée, telle que celle présentée en annexe 1, assurerait la saisie d'une multitude de renseignements essentiels et généralement négligés lors de l'interprétation des levés de

pédogéochimie. Toutefois, une bonne formation des échantillonneurs devrait demeurer primordiale puisque le résultat final dépend d'abord de la qualité de l'échantillon d'humus. Des efforts doivent donc être apportés à sensibiliser les employés sur l'importance de l'échantillonnage.

8.2. MANIPULATIONS DE LABORATOIRE

Le pH est le premier facteur influençant la variabilité des résultats d'analyse. Il apporte des informations importantes sur la capacité du milieu à fixer les divers ETM. La lecture du pH après la récolte des échantillons est essentielle à une bonne interprétation. Quant à la mesure de l'Eh, elle montre plusieurs difficultés. La prise des mesures de pH et Eh devrait être prises selon un protocole similaire à celui décrit au chapitre 4.2, mais dans un court délai après la récolte des échantillons. Dépolariser fréquemment la sonde ORP permettrait une meilleure reproductibilité et l'obtention de résultats plus fiables. Toutefois, la présente étude n'a pas révélé d'application intéressante à la mesure de l'Eh pour l'interprétation du comportement des ETM. Toutefois, il n'a pas été déterminé si c'était dû à une réalité physique où à des problèmes de méthodologie. Les mesures du ΔpH , telles qu'effectuées, se sont avérées peu significatives, peu précises et inutilisables pour les sols acides de la région étudiée.

Le %MO déterminé par perte au feu a beaucoup contribué à mieux comprendre la spéciation des ETM dans l'humus. Par contre, en plus d'être fastidieuse, la mesure systématique de ce paramètre ne semble pas apporter d'information supplémentaire importante en comparaison des efforts nécessaires et des coûts requis. Quant à la CEC, elle

constitue une analyse en soi et apporte peu d'informations pour les coûts engendrés. Son apport sur la variabilité des résultats d'analyse est également faible, soit 8% selon l'ACP. Les notes de terrain sur la présence de cours d'eau et de ruisseaux intermittents aident à cibler les zones de forte CEC et permettent ainsi d'en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

La méthodologie de broyage et de tamisage des échantillons utilisée présente un problème susceptible d'entraîner un biais important. La principale erreur est effectuée lors du tamisage de l'échantillon. À cette étape, tout l'échantillon est mis dans le tamis et l'échantillon envoyé à l'analyse est le premier 20 à 30 gr ayant passé à travers les mailles du tamis de 250 μm . Toutefois, l'analyse en composantes principales a permis de constater que certains cations ont une plus grande affinité pour la matière organique et d'autres pour les oxydes de Fe et Mn ou encore pour les argiles. Ainsi, en prenant les premiers grammes passant, on favorise les plus petites fractions telles que les argiles au détriment des complexes de Fe et Mn et les complexes organométalliques de plus grande taille. Afin de palier à ce problème, l'auteur suggère de bien marteler l'échantillon sec à l'aide d'un maillet de caoutchouc jusqu'à l'obtention d'une matière fine et homogène. L'utilisation d'un diviseur à chutes permettra ensuite de diviser l'échantillon initial en deux échantillons représentatifs avec une bonne précision. L'échantillon sera ainsi divisé jusqu'à l'obtention d'une fraction de 30 gr, laquelle sera ensuite entièrement tamisée à 250 μm . De cette façon, l'aliquote envoyée à l'analyse sera vraiment représentative de l'échantillon.

8.3. ANALYSES GÉOCHIMIQUES

Parmi les méthodes d'analyses utilisées, la plus convenable pour détecter les ions sous forme labile et piégés dans l'humus est l'analyse PYRO-MS. La signature reflète alors la mobilité ionique de l'élément déplacé par un processus tel que la diffusion électrochimique invoquée dans le modèle de Hamilton (1998). Pour compléter l'étude, deux analyses dites totales ont été réalisées, soit une digestion totale multi-acide et une analyse par fluorescence X. Ces dernières fournissent la concentration totale des ETM de l'échantillon, incluant la portion labile.

La digestion PYRO-MS a permis de détecter trois ETM montrant la signature de l'anomalie de l'indice du lac Chambois, soit Zn, Pb et Cd. Ces éléments chalcophiles correspondent à la minéralisation en sphalérite et galène retrouvée en rainurage et en forage, le Cd présentant des propriétés chimiques semblables à celles du Zn. Par ailleurs, le PYRO-MS a l'avantage de présenter peu de problèmes analytiques, seules les analyses du Th montrent des variations qui excèdent le seuil de tolérance de 10 %.

L'analyse TD-MS est la seule à bien détecter Sb et Bi, lesquels montrent un profil anomal similaire à Pb, Zn et Cd. Toutefois, cette analyse totale effectue une mise en solution de toute la composante détritique de l'échantillon et ces derniers montrent des problèmes analytiques pour As, Cr, Hf, Nb, Th, V, W et Zr. L'analyse TD-MS a donc été peu utilisée dans le cadre de cette étude.

L'analyseur à fluorescence X portatif donne des résultats similaires à ceux obtenus par TD-MS. Malgré ses limites de détection élevées, il a permis de mettre en évidence des anomalies en Pb, Zn et As à l'apex de l'indice du lac Chambois. Cet appareil a l'avantage

de procurer une mesure non destructive et de fournir rapidement, et à faible coût, des analyses multiéléments des échantillons avec peu ou pas d'étalonnage de l'instrument. Ainsi, considérant les délais, souvent importants, d'attente des résultats d'analyses lors des envois dans les laboratoires commerciaux, il peut être avantageux d'utiliser le XRF afin d'obtenir des cibles préliminaires d'exploration. De plus, l'exploration des autres modes d'analyse de l'appareil pourra permettre de déterminer des fonctions présentant une meilleure détection des ETM d'intérêt.

En somme, la digestion au pyrophosphate de sodium est une méthode couramment utilisée pour extraire les éléments faiblement liés. Il est très important de connaître ses objectifs lorsque vient le temps de choisir une méthode d'échantillonnage. En plus, il devient également facile de s'égarer avec les nouvelles méthodes d'analyses fournissant des résultats pour près de 60 éléments du tableau périodique. Et quoiqu'un découplage des ETM du corps conducteur puisse être effectué, une connaissance des éléments associés au type de gisement recherché peut grandement aider à cibler les ETM pouvant créer des anomalies pédogéochimiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aaby, B. and Jacobson, J., 1979. Changes in biotic conditions and metal deposition in the last millennium as reflected in ombrotrophic peat in Draved Mose. *Danm. Geol. Unders.*: 5-43.
- Adriano, D.C., Bolan, N.S., Koon, B.J., Naidu, R., Lelie, D., Vangronsveld, J. and Wenzel, W.W., 2002. Natural remediation processes bioavailability interactions in contaminated soils, 17th. WCSS Symposium, Thailand.
- Aitchison, J., 1982. The statistical-analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-Methodological*, 44(2): 139-177.
- Alekseev, S.G., Dukhanin, A.S., Veshev, S.A. and Voroshilov, N.A., 1996. Some aspects of practical use of geoelectrochemical methods of exploration for deep-seated mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 56(1): 79-86.
- Alloway, B.J., 1993. *Heavy Metals in Soils*. John Wiley & Sons Inc, Blackie Glasgow; New York, 339 pp.
- Antropova, L.V., Goldberg, I.S., Voroshilov, N.A. and Ryss, J.S., 1992. New methods of regional exploration for blind mineralization - Application in the USSR. *Journal of Geochemical Exploration*, 43(2): 157-166.
- Baize, D. and Tercé, M., 2002. *Les éléments traces métalliques dans les sols: approches fonctionnelles et spatiales*, 570 pp.
- Ballivy, G., Pouliot, G. and Loisel, A., 1971. Some geological and mineralogical characteristics of clay deposits from northwest quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(12).
- Bartlett, R.J. and James, B.R., 1995. System for categorizing soil redox status by chemical field testing *Geoderma*, 68(3): 211-218.
- Bisutti, I., Hilke, I. and Raessler, M., 2004. Determination of total organic carbon - an overview of current methods. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 23(10-11): 716-726.
- Bloomfield, C. and Kelso, W.I., 1973. Mobilization and fixation of molybdenum, vanadium, and uranium by decomposing plant matter. *Journal of Soil Science*, 24(3): 368-379.
- Bolviken, B. and Logn, O., 1975. An electrochemical model for element distribution around sulphide bodies. In: Elliot, I., Fletcher, K. (Eds.), *Geochemical Exploration 1974*. Elsevier, Amsterdam: 631-648.
- Bonneau, M. and Souchier, B., 1979. *Constituants et propriétés du sol*. Pedologie. Masson, Paris, xviii, 459p. pp.
- Bostock, H.S., 1970. *Physiography of Canada*, Geological Survey of Canada, Map 1254A, scale 1: 500000.
- Brant, A.A., 1948. Some limiting factors and problems of mining geophysics. *Geophysics*, 13: 556.
- Burr, S.V., 1982. *A Guide to Prospecting by the Self-Potential Method*. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper, 99: 15.
- Cameron, E.M., Hamilton, S.M., Leybourne, M.I., Hall, G.E.M. and McClenaghan, M.B., 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4: 7-32.
- CEAEQ and MAPAQ, 2003a. Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte au feu (PAF). MA. 1010 - PAF 1.0, Ministère de l'environnement du Québec, pp. 8.
- CEAEQ and MAPAQ, 2003b. Détermination du pH à l'eau dans les sols agricoles. MA. 1010 - pH 1.0, Ministère de l'environnement du Québec, pp. 9.
- Clymo, R.S. and Hayward, P.M., 1982. The ecology of sphagnum. Dans: Smith, A.J.E. *Bryophyte ecology* Chapman and Hall Ltd., London, pp. 229-289.
- Cojan, I. and Renard, M., 1997. *Sédimentologie*. Masson, Paris, 418 pp.

- Comité de coordination des services agricoles canadiens : Groupe de travail sur la classification des sols., 1998. Le système canadien de classification des sols [ressource électronique]. Agriculture et Agro-alimentaire Canada, Ottawa, Ont.
- Crawford, R.J., Harding, I.H. and Mainwaring, D.E., 1993. Adsorption and coprecipitation of single heavy-metal ions onto the hydrated oxides of iron and chromium *Langmuir*, 9(11): 3050-3056.
- Crum, H. and Planisek, S., 1992. *A Focus on Peatlands and Peat Mosses*. University of Michigan Press, 320 pp.
- Dallaire, P.-L., 2010. Utilisation d'un géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourbe et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région d'Eastmain, Baie-James, Québec Université du Québec à Montréal, Montréal, 149 pp.
- Davies, E.B., 1956. Factors Affecting Molybdenum Availability in Soils. *Soil Science*, 81(3): 209-222.
- De Vos, W., Tarvainen, T., Salminen, R., Reeder, S. and De Vivo, B., 2006. *Geochemical Atlas of Europe. Part 2: Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications*, Espoo, 690 pp.
- Dubois, M., 2006. Levés magnétométrique et de résistivité / polarisation provoquée, propriété Pontax. Ressources Sirios Inc., 06N971. GM 62784, Abitibi Géophysique, Val-d'Or.
- Dubois, M., 2007. Levé de résistivité, polarisation provoquée, rapport d'interprétation, propriété Pontax. Ressources Sirios Inc., 07N010. GM 63033, Abitibi Géophysique.
- Duchaufour, P., 1977. *Pedogenese et classification*. Masson, Paris, xiv, 477 pp.
- Dyke, A.S., Moore, A. and Robertson, L., 2003. *Deglaciation of North America*, Geological Survey of Canada, Open File 1574.
- Esbensen, K.H., 2011. L'échantillonnage représentatif du terrain à l'analyse. In: CESAM (Editor), Chicoutimi.
- Espiau, P. and Peyronel, A., 1976. L'acidité d'échange dans les sols. Méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Science du Sol*, 3: 161-175.
- Essington, M.E., 2004. *Soil and water chemistry : an integrative approach*. CRC Press, Boca Raton, FL., 534 pp.
- Farnhama, I.M., Singhb, A.K., Stetzenbach, K.J. and Johannesson, K.H., 2002. Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 60(1-2): 265-281
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C. and Garrett, R., 2009. Robust factor analysis for compositional data. *Computers & Geosciences*, 35(9): 1854-1861.
- Fulton, R.J., 1989. Le Quaternaire du Bouclier canadien. In: C.g.d. Canada (Editor), *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*, chap. 3. Commission géologique du Canada.
- Furic, R.E. and Girard, R., 2007. Campagne d'exploration et de cartographie dans le secteur de la rivière Pontax, moyenne Baie de James, projet Pontax. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 63046.
- Furic, R.E. and Girard, R., 2008a. Campagne d'exploration et de cartographie régionale 2007 dans le secteur de la rivière Pontax, moyenne Baie James, Projet Pontax. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 63467.
- Furic, R.E. and Girard, R., 2008b. Campagne de décapage, cartographie de détail et rainurage de l'indice du lac Chambois, secteur de la rivière Pontax, moyenne baie James, Québec. IOS Services Géoscientifiques Inc.
- Furic, R.E. and Girard, R., 2008c. Campagne de forage 2007 de l'indice du lac Chambois, secteur de la rivière Pontax, moyenne Baie James, Québec. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 64189.

- Gaudreault, P.-L., en prép. Utilisation des éléments traces métalliques (ETM) dans les aiguilles d'épinettes noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) et dans l'humus à des fins d'identification d'une minéralisation polymétallique de la propriété Pontax, Baie-James. Mémoire de maîtrise en ressources renouvelables non publié Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi.
- Gillman, G.P., 1979. Proposed Method for the Measurement of Exchange Properties of Highly Weathered Soils. *Australian Journal of Soil Research*, 17(1): 129-139.
- Girard, R., 2007a. 2^{ième} Campagne d'échantillonnage régionale du till, Projet Pontax, Région des Basses Terres de la Baie de James. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 62837.
- Girard, R., 2007b. 3^{ième} Campagne d'échantillonnage régionale du till, Projet Pontax, Région des Basses Terres de la Baie de James. IOS Services Géoscientifiques Inc.
- Girard, R., 2008. Campagne d'échantillonnage de sédiments lacustres dans la région des Basses Terres de la Baie James, Propriété Pontax. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 63475.
- Girard, R., 2009. Campagne de pédogéochimie projet Hotish, Propriété B1, Campagne été 2009. IOS Services Géoscientifiques Inc.
- Girard, R., 2010a. Interprétation de données de géochimie de l'humus dans le secteur de la rivière Pontax, Moyenne Baie-James, Québec, Projet Pontax. IOS Services Géoscientifiques Inc.
- Girard, R., 2010b. Soil geochemistry survey, Opinaca Reservoir, James Bay, Northern Quebec, Cheechoo B property. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 65670.
- Girard, R. and Fournier, N., 2008. Campagne d'échantillonnage sols dans le secteur de la rivière Pontax, Moyenne Baie-James, Québec. IOS Services Géoscientifiques Inc. GM 64267.
- Goldberg, I.S., 1998a. Vertical migration of elements from mineral deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1-3): 191-202.
- Goldberg, I.S., 1998b. Vertical migration of elements from mineral deposits *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1-3): 191-202.
- Goldschmidt, V.M., 1934. Drei Vorträge über Geochemie. *Geol. Fören. Förhandl.*, 56: 385-426.
- Govett, G.J.S., 1973. Differential secondary dispersion in transported soils and post-mineralization rocks: an electrochemical interpretation. *Journal of Geochemical Exploration*, Inst. Min. Metall., London: 81-91.
- Govett, G.J.S., 1976. Detection of deeply buried and blind sulfide deposits by measurement of H⁺ and conductivity of closely spaced surface soil samples. *Journal of Geochemical Exploration*, 6(3): 359-382.
- Govett, G.J.S., 1977. World mineral supplies - Role of exploration geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 8(1-2): 3-16.
- Govett, G.J.S. and Pwa, A., 1981. Regional reconnaissance exploration rock geochemistry for massive sulfides, New-Brunswick, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 15(1-3): 139-158.
- Grewal, K.S., Buchan, G.D. and Sherlock, R.R., 1991. A comparison of 3 methods of organic-carbon determination in some New-Zealand soils. *Journal of Soil Science*, 42(2): 251-257.
- Grunsky, E.C., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, 10: 27-74.
- Hall, G.E.M., 1998. Analytical perspective on trace element species of interest in exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1-3): 1-19.
- Hall, G.E.M., Vaive, J.E. and MacLaurin, A.I., 1996. Analytical aspects of the application of sodium pyrophosphate reagent in the specific extraction of the labile organic component of humus and soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 56(1): 23-36.

- Hamilton, S., Hattori, K. and Brauner, K., 2008. Redox-induced spontaneous polarization as a cause of large self potential anomalies over disseminated sulphides and other buried features, KEGS Symposium, Canadian Exploration Geophysical Society meeting, Toronto.
- Hamilton, S.M., 1998. Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, 63(3): 155-172.
- Hamilton, S.M., Cameron, E.M., McClenaghan, M.B. and Hall, G.E.M., 2004a. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4: 33-44.
- Hamilton, S.M., Cameron, E.M., McClenaghan, M.B. and Hall, G.E.M., 2004b. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part II: field investigation at Cross Lake VMS property. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4: 45-58.
- Hardy, L., 1976. Contribution à l'étude géomorphologique de la portion québécoise des basses terres de la baie de James, McGill University, Montréal, 264 pp.
- Hardy, L., 1977. La déglaciation et les épisodes lacustre et marin sur le versant québécois des basses terres de la baie de James. *Géographie physique et Quaternaire*, 31: 261-273.
- Harter, R.D., 1983. Effect of soil-pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1): 47-51.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1991. Introduction à la géotechnique. Presses inter Polytechnique, Montréal, 808 pp.
- Hooda, P.S., 2010. Trace elements in soils. Wiley, Chichester, West Sussex, xix, 596 pp.
- Jarvis, I., Jarvis, K.E., Gray, A.L. and Houk, R.S., 1994. Elemental analysis of solutions and applications. In: B.A. professional (Editor), *Handbook of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, pp. 225-264.
- Jeffrey, A.J. and Compton, B.L., 1991. Effect of different clarification procedures on sodium pyrophosphate extractable soil aluminium and iron concentrations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22(11-12): 1093-1100.
- John, L.H.P., 1957. The solubility of molybdenum in simplified systems and aqueous soil suspensions *Journal of Soil Science*, 8(2): 313-327.
- Jones, J.B., 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 363 pp.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1992. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Flor., [11], 365 pp.
- Kaiser, H.F., 1960. The application of electronic-computers to factor-analysis *Educational and Psychological Measurement*, 20(1): 141-151.
- Labson, V.F. and Medberry, H.G., 1989. Airborne Resistivity Mapping Using Powerline Sources, 59th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp. 138-140.
- Landry, J., 2008. Impact environnementaux d'une nouvelle technique de récolte de la tourbe, Université Laval, Québec, 79 pp.
- Legros, J.P., 2007. Les grands sols du monde. Presses polytechnique et universitaires romandes 574 pp.
- Lu, Y.H., Makishima, A. and Nakamura, E., 2007. Coprecipitation of Ti, Mo, Sn and Sb with fluorides and application to determination of B, Ti, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Hf and Ta by ICP-MS. *Chemical Geology*, 236(1-2): 13-26.
- Malo-Lalande, C., 2007. Levé hélicoptère de magnétométrie et d'électromagnétisme AeroTEM-II, propriété Pontax, rapport d'interprétation. Ressources Sirios Inc., 07N022, pp. 19.

- Mann, A.W., Birrell, R.D., Fedikow, M.A.F. and de Souza, H.A.F., 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 5: 201-210.
- Mauquoy, D., van Geel, B., Blaauw, M., Speranza, A. and van der Plicht, J., 2004. Changes in solar activity and Holocene climatic shifts derived from C-14 wiggle-match dated peat deposits. *Holocene*, 14(1): 45-52.
- McClenaghan, M.B., Hamilton, S.M., Hall, G.E.M., Burt, A.K. and Kjarsgaard, B.A., 2006. Selective leach geochemistry of soils overlying the 95-2, B30, and A4 kimberlites, northeastern Ontario. Geological Survey of Canada, Open File 5069: 28.
- Metson, A.J., 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. New Zealand. Dept. of Scientific and Industrial Research, Soil Bureau Bulletin(12): 207.
- Michaelson, G.J. and Ping, C.L., 1997. Comparison of 0.1N sodium hydroxide with 0.1M sodium pyrophosphate in the extraction of soil organic matter from various soil horizons. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(13-14): 1141-1150.
- Moukhsil, A., 2000. Géologie de la région des lacs Pivert (33C/01), Anatacau (33C/02), Kauputauchechun (33C/07) et Wapamisk (33C/08). Ministère des Ressources naturelles, RG 2000-04, pp. 48.
- MRNF, 2012. Histoire de l'industrie minière. In: MRNF (Editor).
- NRCan, 2006. Livret de préparation à l'examen de RNCan - Opérateur d'analyseurs portatifs à fluorescence X, pp. 75.
- Omuetti, J.A.I. and Lavkulich, L.M., 1988. Identification of clay-minerals in soil - The effect of sodium-pyrophosphate. *Soil Science Society of America Journal*, 52(1): 285-287.
- Payette, S. and Rochefort, L., 2001. *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses Université Laval, 621 pp.
- Quinn, G.P. and Keough, M.J., 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ;, xvii, 537 pp.
- Railsback, L.B., 2003. An earth scientist's periodic table of the elements and their ions. *Geology*, 31(9): 737-740.
- Rippy, J.F.M. and Nelson, P.V., 2007. Cation exchange capacity and base saturation variation among Alberta, Canada, moss peats. *Hortscience*, 42(2): 349-352.
- Ryss, Y.S., Goldberg, I.S., Alakseev, S.G. and Dukhanin, A.S., 1987. Struynaya migratsiya veshchestva v obrazovanii vtorichnykh oreolov rasseyanya. *Doklady Akademii Nauk*, 297: 954-958.
- Sato, M. and Mooney, H.M., 1960. The electrochemical mechanism of sulphide self-potentials. *Geophysics*, 25: 226-249.
- Schlumberger, C. and Schlumberger, M., 1922. Electrical phenomena produced by metallic ores: *Comptes Rendus*. 174.
- Schnitzer, M. and Khan, S.U., 1972. Humic substances in the environment. Books in soils and the environment. M Dekker, New York, 327 pp.
- Simard, M., Bernier, P.Y., Bergeron, Y., Paré, D. and Guerine, L., 2009. Paludification dynamics in the boreal forest of the James Bay Lowlands : effect of time since fire and topography. *Canadian journal of forest research*, 39(3): 546-552.
- Slavek, J., Wold, J. and Pickering, W.F., 1982. Selective extraction of metal ions associated with humic acids. *Talanta*, 29(9): 743-749.
- Smee, B.W., 1979. A theoretical estimation of ion mobilities through glaciolacustrine sediments: diffusion down a concentration gradient. *Current Res., Part A*, Geological Survey of Canada. 79(1A): 367-374.

- Smee, B.W., 1983. Laboratory and field evidence in support of the electrogeochemically enhanced migration of ions through glaciolacustrine sediment. *Journal of Geochemical Exploration*, 19(1-3): 277-304.
- Smee, B.W., 2009. Soil micro-layer, airborne particles, and pH: The Govett connection. *International Applied Geochemical Symposium*, pp. 5.
- Smith, D.B., Woodruff, L.G., O'Leary, R.M., Cannon, W.F., Garrett, R.G., Kilburn, J.E. and Goldhaber, M.B., 2009. Pilot studies for the North American Soil Geochemical Landscapes Project - Site selection, sampling protocols, analytical methods, and quality control protocols. *Applied Geochemistry*, 24(8): 1357-1368.
- Soares, M.R., Casagrande, J.C. and Mouta, E.R., 2011. Nickel adsorption by variable charge soils: effect of pH and ionic strength. *Brazilian archives of biology and technology*, 54(1): 207-220.
- Soon, Y.K. and Abboud, S., 1991. A comparison of some methods for soil organic-carbon determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22(9-10): 943-954.
- Stevenson, F.J., 1994. *Humus chemistry : genesis, composition, reactions*. J. Wiley, New York ; Toronto, xiii, 496 p. pp.
- Szalay, A., 1964. Cation exchange properties of humic acids and their importance in the geochemical enrichment of UO_2^{++} and other cations. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 28(OCT): 1605-1614.
- Szalay, A. and Szilagyi, M., 1967. Association of vanadium with humic acids. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 31(1).
- Takeno, N., 2005. Atlas of Eh-pH diagrams, Intercomparison of thermodynamic databases. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Research Center for Deep Geological Environments. Geological Survey of Japan Open File Report No.419.: 287.
- Tanaka, R., Makishima, A., Kitagawa, H. and Nakamura, E., 2003. Suppression of Zr, Nb, Hf and Ta coprecipitation in fluoride compounds for determination in Ca-rich materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18(12): 1458-1463.
- Thiry, M., 2010. Médard's home page
<http://members.geosciences.ensmp.fr/medard/cours_geochim/geochim01.htm>.
- Tomar, N.K., Yadav, R.P. and Relan, P.S., 1992. Characterization of humic and fulvic-acids extracted with NaOH and NaOH-Na-Pyrophosphate mixture from soils of arid and subhumid regions .1. Analytical characteristics. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 6(3): 177-185.
- Vallée, M.A., Smith, R.S. and Keating, P., 2008. Case history of combined airborne time-domain electromagnetics and power line field survey in Chibougamau, Canada, 78th SEG Annual Meeting, Las Vegas.
- Van Bellen, S., Garneau, M. and Booth, R.K., en prép. Holocene carbon accumulation rates from three ombrotrophic peatlands in boreal Quebec, Canada: impact of climate-driven ecohydrological change.
- Van Geel, B., Raspopov, O.M., Renssen, H., van der Plicht, J., Dergachev, V.A. and Meijer, H.A.J., 1999. The role of solar forcing upon climate change. *Quaternary Science Reviews*, 18(3): 331-338.
- Veillette, J.J., 1994. Evolution and paleohydrology of glacial lakes Barlow and Ojibway. *Quaternary Science Reviews*, 13(9-10): 945-971.
- Veillette, J.J., 1997. The role of late glacial ice streaming in the deglaciation of James Bay. *Geographie Physique Et Quaternaire*, 51(2): 141-161.

- Villeneuve, P., 2007. Campagne d'échantillonnage régionale du till, Projet Pontax, région des basses terres de la Baie-James. IOS Services géoscientifiques Inc. GM 62966.
- Vincent, J.-S. and Hardy, J.-S., 1979. The evolution of Glacial lakes Barlow and Ojibway, Quebec and Ontario. Geological Survey of Canada, Bulletin 316: 18.
- Vizier, J.-F., 1971. Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. Cahiers ORSTOM, Série pédologie, IX(4): 373-397.
- Yu, Z.S., Robinson, P. and McGoldrick, P., 2001. An evaluation of methods for the chemical decomposition of geological materials for trace element determination using ICP-MS. Geostandards Newsletter-the Journal of Geostandards and Geoanalysis, 25(2-3): 199-217.

ANNEXE 1

FICHE D'ÉCHANTILLONNAGE

PROJET : _____ No ECH : _____
 Cible : _____ Prof. : _____ UTMX : _____
 Date : ____ / ____ / ____ SNRC : _____ UTMY : _____
 Type de matériel : _____ Unité stratigraphique : _____
 Échantillonneur : _____
 Assistant : _____ Nombre de sacs : _____ Altitude : _____

TYPE DE LEVÉ:

<input type="checkbox"/> Régional	<input type="checkbox"/> Suivi de : _____	autre raison : _____
TRANSPORT		
<input type="checkbox"/> Hélicopté	MÉTHODE D'EXCAVATION	
<input type="checkbox"/> Kaskoo	<input type="checkbox"/> Pelle hydraulique	PRÉLEVEMENT
<input type="checkbox"/> Bateau	<input type="checkbox"/> Forage	<input type="checkbox"/> Trou
<input type="checkbox"/> à pied	<input type="checkbox"/> Pelle à main	<input type="checkbox"/> Tranchée
		<input type="checkbox"/> Escarpement

DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON DE Ah

Profil du sol			Composition		Humidité		Compacité	
Épaisseur	%	Couleur		%				
O			>2.5 blocs, cailloux		<input type="checkbox"/> Sec	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Lâche	
LFH			< 2.5cm gravier		<input type="checkbox"/> Humide	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Peu compact	
Ah			<2mm sable		<input type="checkbox"/> Mouillé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Compact	
Ae			< 63µ silt		<input type="checkbox"/> Saturé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Très compact	
B			< 4µ argile					
C			Mat. Organique		<input type="checkbox"/> Placage:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Aéré	

Code de couleur

1 brun	4 rouge	7 vert
2 noir	5 beige	8 pâle
3 gris	6 jaune	9 foncé

Type de blocs ératiques en surface : _____

Affleurement (lithologie) : _____

Structure glaciaire : _____ Orientation : _____

Drainage	Affleurement	Pente
<input type="checkbox"/> Excellent	<input type="checkbox"/> 0-20%	<input type="checkbox"/> Nulle 0%-3%
<input type="checkbox"/> Bon	<input type="checkbox"/> 20-40%	<input type="checkbox"/> Faible 4%-8%
<input type="checkbox"/> modéré	<input type="checkbox"/> 40-60%	<input type="checkbox"/> Douce 9%-15%
<input type="checkbox"/> Mauvais	<input type="checkbox"/> 60-80%	<input type="checkbox"/> modéré 16%-30%
	<input type="checkbox"/> >80%	<input type="checkbox"/> Forte >30%

Relief	Densité cov. forestier	Échantillon sous:
<input type="checkbox"/> Plaine	<input type="checkbox"/> Fort	<input type="checkbox"/> Sphaigne
<input type="checkbox"/> Vallée	<input type="checkbox"/> Modéré	<input type="checkbox"/> Hypmes
<input type="checkbox"/> Colline	<input type="checkbox"/> Faible	<input type="checkbox"/> Graminés
<input type="checkbox"/> Montagne	<input type="checkbox"/> Brûlis	<input type="checkbox"/> Lichen
<input type="checkbox"/> Vallonné	<input type="checkbox"/> Bûcher	<input type="checkbox"/> Autre:

TOPOGRAPHIE **HYDROGRAPHIE** **ENVIRONNEMENT** # Photo: _____

Remarque : _____

Végétaux 1 : _____ Diamètre (DHP) : _____ # ECH : _____
 Végétaux 2 : _____ Note : _____ # ECH : _____

ANNEXE 2**PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES**

ÉCHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE MATERIEL	NORDANT (Nrd 27)	TRANSECT	PROFONDEUR (cm)	PS (mV)	DRAINAGE	PENTE	DENSITÉ VÉGÉTATION	COULEUR	Eh (mv)	pH 2009	pH 2010	POUVOIR TAMPON	CEC EFF. (cmol/kg)	% MO
Compte					217	119					217	217	217	217	181	217
Moyenne					41	18					386	4	4	0,48	22	28,7
Ecart Type					22	23					61	0,37	0,38	0,16	6	7,1
Coefficient var					0,82	1,32					0,17	0,09	0,09	0,32	0,35	0,24
Maximum					130	68					484	6	6	1,22	46	46
Minimum					5	-48					107	3	3	0,13	7	15
74550001	74540024	Ah	369574	LELECTR	12,0	12,0	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	362,4	4,31	4,18	0,52	23	16
74550002	74540010	Ah	369638	LELECTR	75	19,5	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	451	4,30	4,51	0,17	30,4	25,68
74550003	74540011	Ah	369638	LELECTR	80	26,8	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	291,6	4,19	4,54	0,35	30,4	21,14
74550004	74540050	Ah	369772	LELECTR	65	10,7	Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/3	388,6	3,69	3,26	0,47	20,5	18,88
74550005	74540051	Ah	369781	LELECTR	60	8,8	Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/2	412,8	3,65	3,50	0,42	20,5	19,79
74550006	74540052	Ah	369782	LELECTR	70	9,5	Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/2	429	3,78	3,58	0,61	20,5	18,57
74550007	74540100DUP	Duplicata	371164	INDICE	15		Bon	4-8%	Faible	7,5YR 2,5/1	429	4,21	4,12	0,41	26,9	24,97
74550008	74540120DUP	Duplicata	370473	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 3/1	418,1	3,90	4,02	0,27	17,2	24,84
74550009	74540101	Ah	371159	INDICE	20	0	Bon	0-3%	Faible	10YR 3/1	386,1	4,15	4,30	0,38	27,8	22,98
74550010	74540102	Ah	371161	INDICE	40		Bon	0-3%	Faible	10YR 2/2	402,6	4,29	4,24	0,62	24,6	23,60
74550011	74540154	Ah	370503	TEMOIN	30	23,9	Moderé	0-3%	Moyenne	10YR 5/1	417,4	4,25	4,21	0,48	30,4	18,25
74550012	74540062	Ah	371245	INDICE	70	42,95	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/3	344,6	4,09	4,17	0,54	15,7	21,97
74550013	74540019	Ah	369500	LELECTR	65	18,7	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	388,4	4,03	4,38	0,49	20,5	30,91
74550014	74540136	Ah	370508	TEMOIN	30	9,5	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	314,6	4,24	4,46	0,31	20,0	22,89
74550015	74540132	Ah	370500	TEMOIN	20	-5,4	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	398,2	4,07	4,16	0,38	28,5	19,37
74550016		MR35007								7,5YR 2,5/1						
74550017	74540143	Ah	370523	TEMOIN	30	0	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	413,9	4,54	4,56	0,72	10,3	16,23
74550018	74540137	Ah	370510	TEMOIN	50	-2,1	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/1	420,8	4,30	4,36	0,54	11,6	17,55
74550019	74540123	Ah	370483	TEMOIN	12	16,7	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 6/1	398,3	4,03	4,23	0,47	11,9	17,55
74550020	74540135	Ah	370506	TEMOIN	30	8,1	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	301,4	4,71	4,63	0,61	17,6	23,60
74550021	74540146	Ah	370528	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	322,4	4,11	4,09	0,48	20,5	24,47
74550022	74540103	Ah	371155	INDICE	40		Bon	4-8%	Faible	7,5YR 2,5/1	371,9	4,28	4,28	0,41	23,8	35,00
74550023	74540003	Ah	369687	LELECTR	70	21,0	Mauvais	0-3%	Bucher	7,5YR 3/1	351,9	4,00	4,05	0,43	20,0	32,26
74550024	74540004	Ah	369668	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/1	327,5	4,13	4,28	0,24	31,56	31,56
74550025	74540035	Ah	369703	LELECTR	60	26,0	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/1	381,1	3,88	3,98	0,47	34,87	34,87
74550026	74540036	Ah	369704	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/2	314,4	3,82	4,06	0,50	31,99	31,99
74550027	74540037	Ah	369714	LELECTR	60	9,6	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	303,3	3,96	4,15	0,34	32,81	32,81
74550028	74540005	Ah	369656	LELECTR	130	35,9	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/2	308,5	4,23	4,39	0,66	32,50	32,50
74550029	74540006	Ah	369657	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/1	274,3	4,25	4,33	0,50	30,48	30,48
74550030	74540039	Ah	369725	LELECTR	70	25,0	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	347	3,69	3,70	0,32	31,61	31,61
74550031	74540041	Ah	369734	LELECTR	60	10,6	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	404,7	3,69	3,60	0,38	26,47	26,47
74550032	74540002	Ah	369678	LELECTR	60	31,4	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/2	352,7	4,25	4,15	0,64	34,63	34,63
74550033	74540040	Ah	369726	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	426,8	3,56	3,60	0,28	31,84	31,84
74550034	74540043	Ah	369743	LELECTR	60	11,7	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	442,3	3,43	3,54	0,17	35,94	35,94
74550035	74540040DUP	Duplicata	369726	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	427,1	3,60	3,69	0,28	40,05	40,05
74550036		MRES008								7,5YR 2,5/1						
74550037	74540053	Ah	369791	LELECTR	45	21,8	Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/1	412,8	3,80	3,37	0,52	25,11	25,11
74550038	74540054	Ah	369792	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/1	412,8	3,80	3,18	0,24	27,61	27,61
74550039	74540047	Ah	369677	LELECTR	70	11,5	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/2	354,8	4,10	4,12	0,66	35,28	35,28
74550040	74540047	Ah	369763	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	432,3	3,58	3,44	0,61	35,28	35,28
74550041	74540122	Ah	370480	TEMOIN	20	21,8	Moderé	0-3%	Moyenne	10YR 5/1	265,6	4,53	4,52	0,58	18,39	18,39
74550042	74540107	Ah	371143	INDICE	40		Moderé	9-15%	Faible	7,5YR 2,5/1	369	3,94	3,95	0,37	18,1	24,70
74550043	74540108	Ah	371145	INDICE	5		Moderé	9-15%	Faible	10YR 3/1	397,4	3,71	3,50	0,33	20,3	28,18
74550043,1		MR35007								7,5YR 2,5/1						
74550044	74540055	Ah	369802	LELECTR	60	14,6	Moderé	0-3%	Brulis	10YR 3/2	354,9	3,94	3,84	1,22	31,65	31,65
74550045	74540057	Ah	371230	INDICE	50	54,15	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	321	3,98	4,19	0,57	20,08	20,08
74550046	74540037	Ah	369512	LELECTR	50		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	304,3	4,87	4,94	0,60	30,39	30,39
74550047	74540058	Ah	369913	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	232,1	4,99	5,66	0,60	33,07	33,07
74550048	74540059	Ah	371247	INDICE	70	46,1	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	397,4	3,53	3,48	0,45	30,94	30,94
74550049	74540048	Ah	369764	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	423	3,56	3,63	0,16	31,28	31,28
74550050	74540046	Ah	369753	LELECTR	70	15,4	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	435,3	3,69	3,43	0,67	30,33	30,33
74550050,1		MR35007								7,5YR 2,5/1						



ECHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE MATERIEL	ESTANT (Nad ZT)	NORDANT (Nad ZT)	TRANSECT	PROFONDEUR (cm)	FS (mV)	DRAINAGE	PENTE	DENSITE VEGETATION	COULEUR	Eh (mv)	pH 2009	pH 2010	POUVOIR TAMPON	CEC EFF. (cmol/kg)	% MO
Compte						217	113					217	217	217	217	181	217
Moyenne						41	18					366	4	4	0.48	22	29.7
Ecart type						22	23					61	0.37	0.38	0.15	8	7.1
Coefficient var.						0.52	1.32					0.17	0.09	0.08	0.32	0.35	0.24
Maximum						130	68					454	6	6	1.22	45	49
Minimum						5	46					107	3	3	0.13	7	15
74550051	74540049	Ah	369771	5758701	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/1	451	3.66	3.38	0.60		28.42
74550052	74540038	Ah	369715	5758721	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	359.9	3.72	3.88	0.38		32.41
74550053	74540034	Ah	369696	5758726	LELECTR	60	31.3	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/2	392.1	3.80	4.00	0.40		31.24
74550054	74540031	Ah	369686	5758727	LELECTR	65	22.3	Mauvais	0-3%	Bucher	10YR 3/1	344.2	4.00	4.29	0.94		29.14
74550055	74540020DUP	Duplicata	369591	5758757	LELECTR	65		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	365.9	4.09	4.42	0.47		33.86
74550056	74540141	Ah	370520	5758907	TEMOIN	40	0	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/1	410.6	4.69	4.52	0.72	8.7	15.61
74550057	74540145	Ah	370526	5758980	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/1	391.3	4.43	4.20	0.61	10.9	18.42
74550057.1		MRES008									7.5YR 2.5/1					17.5	
74550058	74540017	Ah	369601	5758752	LELECTR	60	0.0	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	431.5	4.09	4.39	0.51		32.29
74550059	74540044	Ah	369744	5758711	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	453.8	3.57	3.45	0.40		24.85
74550060	74540042	Ah	369735	5758714	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	428.7	3.41	3.36	0.20		35.13
74550061	74540045	Ah	369752	5758706	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	421.4	3.50	3.25	0.34		34.20
74550062	74540066	Ah	371236	5759563	INDICE	60	38.65	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	363.8	3.70	3.96	0.43	16.3	36.43
74550063		MR3S007									7.5YR 2.5/1					39.0	
74550064	74540140DUP	Duplicata	370516	5758919	TEMOIN	40		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	366.1	4.23	4.22	0.70	16.0	26.14
74550065	74540013	Ah	369619	5758749	LELECTR	75	37.6	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	322.8	4.55	4.53	0.58	16.5	39.83
74550066	74540064	Ah	371241	5759565	INDICE	60	35.15	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	412.5	3.72	3.76	0.44	16.5	32.59
74550067	74540060DUP	Duplicata	371249	5759537	INDICE	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	424.5	3.56	3.70	0.42	15.3	36.11
74550068	74540068	Ah	371232	5759753	INDICE	60	55.1	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	310.4	3.65	4.26	0.27	15.9	41.42
74550069	74540022	Ah	369582	5758763	LELECTR	60	12.4	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	309.2	4.47	4.51	0.53		36.96
74550070	74540069	Ah	371225	5759563	INDICE	60	68.25	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	344.3	3.85	3.93	0.48	22.4	39.08
74550070.1		MR3S007									7.5YR 2.5/1					22.4	
74550071	74540138	Ah	370512	5758928	TEMOIN	30		Moderate	0-3%	Moyenne	10YR 3/2	416.6	3.95	3.71	0.50	21.8	24.15
74550072	74540111	Ah	370455	5759045	TEMOIN	50	2.2	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	285.5	4.90	4.79	0.51	23.7	41.83
74550073	74540071	Ah	371223	5759591	INDICE	60	67.65	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	393.5	3.76	3.85	0.34	22.2	38.01
74550074	74540091	Ah	371174	5759689	INDICE	10	-3.95	Bon	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	417	4.02	3.87	0.37	30.8	29.06
74550075	74540063	Ah	371239	5759554	INDICE	60	55.3	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	345.3	4.09	4.20	0.66	16.8	30.79
74550076	74540106	Ah	371151	5759745	INDICE	60		Moderate	4-8%	Faible	10YR 3/1	342	4.77	4.90	0.68	23.2	31.61
74550077	74540133	Ah	370501	5759843	TEMOIN	10		Moderate	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	418.5	4.15	4.01	0.48	26.4	27.17
74550078	74540105	Ah	371149	5759744	INDICE	60		Moderate	4-8%	Faible	10YR 3/1	396.6	4.57	4.41	0.28	24.6	46.77
74550079		MRES008									7.5YR 2.5/1					41.6	
74550080	74540139	Ah	370514	5758918	TEMOIN	45	3.4	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	397.1	4.60	4.41	0.61	13.7	24.64
74550081	74540015	Ah	369611	5758752	LELECTR	70	27.4	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	366.6	4.44	4.45	0.67	40.03	40.03
74550082	74540030	Ah	369544	5758776	LELECTR	45	6.9	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/1	386.7	4.37	4.09	0.63	36.42	36.42
74550083	74540023	Ah	369572	5758764	LELECTR	50		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	347.2	4.39	4.50	0.53		26.76
74550084	74540028	Ah	369564	5758770	LELECTR	50	23.1	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	296.9	4.12	3.86	0.87		33.01
74550085	74540012	Ah	369628	5758746	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	291.3	4.47	4.49	0.75		39.54
74550086.1	74540014	Ah	369620	5758751	LELECTR	65		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	303.5	4.39	4.43	0.50		36.56
74550087	74540027	Ah	369554	5758772	LELECTR	50	32.0	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	322.4	4.32	4.48	0.23		37.53
74550088	74540142	Ah	370522	5758908	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	331.7	4.31	4.11	0.63		25.02
74550089	74540028	Ah	369555	5758773	LELECTR	55		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	381.7	4.33	4.16	0.56		33.81
74550090	74540094	Ah	371190	5759663	INDICE	10	-45.6	Bon	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	441.7	3.56	3.58	0.23	23.0	31.58
74550091	74540029	Ah	369543	5758774	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	250.2	4.24	4.40	0.55		39.98
74550092	74540095	Ah	371170	5758999	INDICE	10	14.2	Bon	0-3%	Faible	10YR 2/1	319.6	4.44	4.32	0.68	26.9	40.57
74550093	74540096	Ah	371172	5758750	INDICE	35	13	Bon	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	334.1	4.44	4.30	0.45	31.4	34.05
74550093.1		MR3S007									7.5YR 2.5/1					20.7	
74550094	74540119	Ah	370471	5758006	TEMOIN	15	24.4	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	354.8	4.46	4.51	0.55	30.4	25.32
74550095	74540007	Ah	369649	5758739	LELECTR	70	21.4	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	342.7	4.22	4.23	0.46		43.49
74550096	74540008	Ah	369650	5758744	LELECTR	70		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	335.4	4.09	4.31	0.45		36.27
74550097	74540009	Ah	369657	5758744	LELECTR	80		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	303.7	4.21	4.36	0.52		39.65
74550098	74540100	Ah	371164	5759719	INDICE	15	56.9	Bon	4-8%	Faible	7.5YR 2.5/1	404.3	4.06	4.34	0.62	26.0	35.48
74550099	74540121	Ah	370478	5758995	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 6/1	334.1	4.76	4.56	0.70	10.5	18.92
74550100	74540018	Ah	369602	5758754	LELECTR	55		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	355.5	4.38	4.09	0.64		30.79

ECHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE MATERIEL	ESTANT (Nad Z7)	NORDANT (Nad Z7)	TRANSECT	PROFONDEUR (cm)	PS (mV)	DRAINAGE	PENTE	DENSITÉ VÉGÉTATION	COULEUR	Eh (mv)	pH 2009	pH 2010	POUVOIR TAMPON	CEC EFF. (cmol/kg)	% MO
Compte						217	113					217	217	217	217	181	217
Moyenne						41	16					358	4	4	0.48	22	29.7
Ecart type						22	23					91	0.37	0.38	0.15	8	7.1
Coefficient var.						0.52	1.32					0.17	0.09	0.09	0.32	0.95	0.24
Minimum						139	68					454	6	6	1.22	46	46
Maximum						5	-46					107	9	9	0.13	7	15
74500154	74540129	Ah	370495	5759863	TEMOIN	10	6.2	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	389.7	4.12	3.95	0.47	23.0	18.89
74500155	74540130	Ah	370497	5759864	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	411.4	4.13	4.12	0.52	27.2	28.08
74500156	74540030	Ah	371183	5759861	INDICE	10	-10.8	Bon	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	407	4.05	4.05	0.72	32.8	30.01
74500157	74540078	Ah	371210	5759819	INDICE	50	53	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	369.4	4.30	4.19	0.63	27.0	35.37
74500158	74540083	Ah	371196	5759846	INDICE	50	31.6	Mauvais	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	445.8	4.03	3.75	0.42	24.3	26.3
74500159	74540080	Ah	371207	5759828	INDICE	30	20	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	426.2	4.12	3.87	0.55	26.3	37.42
74500160	74540072	Ah	371225	5759892	INDICE	60	62.8	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	430.6	3.84	3.95	0.44	23.0	35.69
74500161	74540075	Ah	371213	5759809	INDICE	70	62.8	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	398.5	4.00	4.16	0.53	20.0	19.4
74500161.1	MR35007										7.5YR 2.5/1						
74500162	74540125	Ah	370487	5759880	TEMOIN	12		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/1	391.4	4.04	4.21	0.41	23.5	22.60
74500163	74540081	Ah	371201	5759835	INDICE	60	21.5	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	437.8	3.90	3.63	0.39	28.9	29.97
74500164	74540074	Ah	371219	5759801	INDICE	60	35.7	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	414.6	4.12	4.12	0.38	19.7	37.33
74500165	74540080UP	Duplicata	371207	5759828	INDICE	30		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	424.2	4.20	3.97	0.59	24.7	30.14
74500166	74500088	Doublet 7450088	370522	5759808	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/2	331.7	4.31	4.11	0.63	13.3	25.02
74500167	74500010	Doublet 7450010	371161	5759728	INDICE	40		Bon	0-3%	Faible	10YR 2/2	402.6	4.29	4.24	0.82	24.1	23.60
74500168	74500032	Doublet 7450032	369678	5759730	LELECTR	60	31.4	Mauvais	0-3%	Biucher	10YR 9/2	352.7	4.25	4.15	0.64	17.7	34.63
74500169	74500014	Doublet 7450014	370508	5759837	TEMOIN	30	9.5	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	314.6	4.24	4.46	0.31	19.7	22.89
74500169.1	MRE5008										7.5YR 2.5/1						
74500170	74500038	Doublet 7450038	369792	5759894	LELECTR	60		Mauvais	0-3%	Brulis	10YR 3/1	445.8	3.50	3.18	0.24	16.5	27.61
74500171	74500017	Doublet 7450017	370523	5759889	TEMOIN	30	0	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/2	413.9	4.54	4.56	0.72	10.4	16.23
74500172	74500041	Doublet 7450041	370480	5759896	TEMOIN	40	21.8	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/1	265.6	4.53	4.52	0.98	11.3	18.39
74500173	74500072	Doublet 7450072	370455	57598045	TEMOIN	50	2.2	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	285.5	4.90	4.79	0.51	23.5	41.83
74500174	74500076	Doublet 7450076	371151	5759745	INDICE	40		Mauvais	4-8%	Faible	10YR 3/1	342	4.77	4.90	0.68	22.8	31.63
74500175	74500099	Doublet 7450099	370478	5759895	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/1	334.1	4.78	4.55	0.70	10.4	18.92
74500176	74500092	Doublet 7450092	369544	5758776	LELECTR	45	6.9	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/1	386.7	4.37	4.09	0.63	19.9	36.42
74500177	74500095	Doublet 7450095	369649	5759739	LELECTR	70	21.4	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	342.7	4.22	4.23	0.46	20.1	43.49
74500178	74500078	Doublet 7450078	371172	5759700	INDICE	35		Bon	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	334.1	4.44	4.30	0.45	30.1	34.05
74500179	74500090	Doublet 7450090	370514	5759818	TEMOIN	45	3.4	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/2	397.1	4.60	4.41	0.61	13.3	24.64
74500180		MR35007									7.5YR 2.5/1						
74500181																	
74500182	74500158	Doublet 74500158	371196	5759846	INDICE	50		Mauvais	0-3%	Faible	7.5YR 2.5/1	443.8	4.03	3.75	0.42	24.0	35.37
74500183	74500162	Doublet 74500162	370487	5759890	TEMOIN	12		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 9/1	391.4	4.04	4.21	0.41	23.4	22.60
74500184	74500153	Doublet 74500153	371198	5759847	INDICE	50	19.65	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/1	407.8	4.14	3.85	0.39	28.1	48.86
74500185	74500152	Doublet 74500152	370487	5759808	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	257.8	4.42	4.35	0.30	22.9	35.27
74500186	74540201	Ah	370590	5759772	TEMOIN	20	10.9	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/2	361.8	3.84	3.85	0.24	14.9	30.76
74500187	74540176	Ah	370555	5759838	TEMOIN	15	-7.6	Mauvais	0-3%	Forte	7.5YR 3/2	408.4	3.83	3.84	0.48	23.9	27.12
74500188	74540204	Ah	370585	5759762	TEMOIN	40	-6.2	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/1	341.3	4.08	4.04	0.48	11.3	25.43
74500189	74540200	Ah	370576	5759779	TEMOIN	35	6.4	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/2	359.5	4.13	4.12	0.32	16.9	27.37
74500190	74540198	Ah	370572	5759792	TEMOIN	25	6.5	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	317.8	4.02	4.11	0.47	21.4	27.43
74500191	74540162	Ah	371135	5759792	INDICE	25		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	394.6	4.19	4.12	0.41	16.0	26.31
74500192		MRE5008									7.5YR 2.5/1						
74500193	74540189	Ah	370574	5759778	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/1	293.8	4.18	4.03	0.30	14.4	28.95
74500194	74540187	Ah	370570	5759791	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	240.1	3.99	4.16	0.38	16.8	32.35
74500195	74540170	Ah	370539	5759873	TEMOIN	15	-5.5	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 9/2	306.9	4.14	4.06	0.82	10.8	19.71
74500196	74540172	Ah	370540	5759864	TEMOIN	35	17.8	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 9/2	262.7	4.38	4.30	0.63	10.8	20.36
74500197	74540203	Ah	370563	5759761	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 5/1	332.9	3.82	3.90	0.33	9.5	24.72
74500198	74540195	Ah	370566	5759799	TEMOIN	25	11	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	323.9	4.13	4.05	0.40	18.4	31.64
74500199	74540190	Ah	370557	5759824	TEMOIN	20	-13.2	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	228.1	4.22	4.20	0.64	12.3	24.22
74500200		MR35007									7.5YR 2.5/1						
74500201	74540163	Ah	371134	5759787	INDICE	20		Bon	0-3%	Moyenne	10YR 9/2	403.2	3.73	3.67	0.33	28.3	37.77
74500202	74540169	Ah	370537	5759872	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/2	177.7	4.28	4.32	0.34	20.1	20.76
74500203	74540191	Ah	370557	5759816	TEMOIN	40	-14	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 9/2	254	4.14	4.28	0.65	11.7	23.56
74500204	74540194	Ah	370563	5759810	TEMOIN	30	9.6	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	297.9	4.03	4.00	0.41	21.0	33.07
74500205	74540193	Ah	370561	5759809	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	270.1	4.03	4.11	0.37	23.2	34.12

ANNEXE 2 : Paramètres physico-chimiques

ECHANTILLON	NUMÉRO TERRAIN	TYPE MATERIEL	ESTANT (Nad 27)	NORDANT (Nad 27)	TRANSECT	PROFONDEUR (cm)	PS (mV)	DRAINAGE	PENTE	DENSITÉ VÉGÉTATION	COULEUR	Eh (mv)	pH 2009	pH 2010	POUVOIR TAMPON	CEC. EFF. (cmol/kg)	% MO
Compte						217	113					217	217	217	217	181	217
Moyenne						41	18					396	4	4	0,48	22	28,7
Écart type						22	23					61	0,37	0,38	0,15	8	7,1
Coefficient var.						0,52	1,32					0,17	0,09	0,09	0,32	0,35	0,24
Maximum						130	68					454	6	6	1,22	46	49
Minimum						5	-46					107	3	3	0,13	7	15
74550206	74540166	Ah	371138	5759773	INDICE	10		Bon	4-8%	Faible	10YR 3/1	343,4	3,75	3,72	0,42	28,6	37,69
74550207		MR3Sol07									7,5YR 2,5/1					20,0	
74550208	74540164	Ah	371136	5759788	INDICE	15		Bon	0-3%	Moyenne	10YR 3/2	376,3	3,88	3,75	0,38	24,8	30,51
74550209	74540160	Ah	371121	5759810	INDICE	40		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 3/2	249	4,81	4,82	0,74	20,4	38,06
74550210	74540159	Ah	371119	5759809	INDICE	40		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 3/2	275,4	4,77	4,79	0,63	20,2	32,44
74550211	74540188	Ah	371129	5759803	INDICE	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/1	286,1	4,87	4,71	0,65	16,0	33,53
74550212	74540192	Ah	370559	5758817	TEMOIN	30		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 4/2	299,8	3,96	4,01	0,44	19,2	27,75
74550213	74540189	Ah	370555	5758823	TEMOIN	25		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	347,4	3,95	3,83	0,59	14,4	22,93
74550214		MRESol08									7,5YR 2,5/1					17,0	
74550215	74540165	Ah	371136	5759772	INDICE	15		Bon	4-8%	Faible	7,5YR 2,5/1	340,7	3,91	4,10	0,25	17,4	33,47
74550216	74540196	Ah	370568	5758800	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Faible	10YR 3/2	331	4,14	4,08	0,72	18,7	28,08
74550217	74540175	Ah	370553	5758837	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 6/3	203,2	4,09	4,19	0,50	31,9	18,79
74550218	74540173	Ah	370547	5758846	TEMOIN	25	-5,5	Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	255	4,18	4,21	0,48	15,2	21,60
74550219	74540171	Ah	370538	5758863	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 5/2	247,5	4,23	4,31	0,48	21,9	28,09
74550220	74540161	Ah	371133	5759791	INDICE	30		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	291,2	4,19	4,28	0,63	24,5	30,89
74550221		MR3Sol07									7,5YR 2,5/1					19,8	
74550222	74540167	Ah	371127	5759802	INDICE	40		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 3/2	397,7	4,02	3,89	0,70	21,1	35,00
74550223	74540149	Ah	371115	5759817	INDICE	15		Bon	0-3%	Moyenne	10YR 4/2	378,1	4,17	4,34	0,47	16,5	16,83
74550224	74540201DUP	Duplicata	370580	5758772	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/2	352,5	3,90	3,81	0,58	13,6	28,48
74550225	74540150	Ah	371117	5759818	INDICE	20		Bon	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	289,2	5,25	4,58	0,47	8,2	21,25
74550226	74540178	Ah	370547	5758854	TEMOIN	20	22,9	Mauvais	0-3%	Forte	7,5YR 4/1	106,5	5,55	5,32	0,13	18,3	25,20
74550227	74540174	Ah	370549	5758847	TEMOIN	25		Mauvais	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	197,4	4,39	4,31	0,43	14,0	19,67
74550228		MR3Sol07									7,5YR 2,5/1					19,9	
74550229	74540170DUP	Duplicata	370539	5758873	TEMOIN	15		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 5/2	266,2	4,35	3,93	0,29	11,6	18,81
74550230	74540177	Ah	370545	5758853	TEMOIN	10		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 3/2	247,9	5,46	4,44	0,38	17,8	25,31
74550231	74540202	Ah	370582	5758773	TEMOIN	20		Mauvais	0-3%	Forte	10YR 4/2	283,1	4,14	3,80	0,38	14,9	33,03
74550232	74550196	Doubleton 74550196	370540	5758864	TEMOIN	35	17,8	Mauvais	0-3%	Forte	10YR 5/2	262,7	4,38	4,30	0,63	10,7	20,38
74550233	74550203	Doubleton 74550203	370557	5758816	TEMOIN	40	-14	Mauvais	0-3%	Faible	10YR 5/2	254	4,14	4,28	0,66	11,6	23,56
74550234	74550215	Doubleton 74550215	371136	5759772	INDICE	15		Bon	4-8%	Faible	7,5YR 2,5/1	340,7	3,91	4,10	0,25	17,3	33,47
74550235	74550225	Doubleton 74550225	371117	5759818	INDICE	20		Bon	0-3%	Moyenne	10YR 5/2	289,2	5,25	4,58	0,47	8,1	21,25

ANNEXE 3**ANALYSES GÉOCHIMIQUES****TABLE 1 : DIGESTION AU PYROPHOSPHATE DE SODIUM****TABLE 2 : DIGESTION MULTI-ACIDES****TABLE 3 : ANALYSES À LA FLUORESCENCE X**

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 1 : Digestion au pyrophosphate de sodium

ÉCHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE DE MATERIEL	ESTANT (Nad 27, Zone 18)	NORDANT (Nad 27, Zone 18)	TRANSECT	CERTIFICAT	ANALYSE SODIUM PYROPHOSPHATE (PYRO-MS)																										
							Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Ga	Gd	Ge	Hf	Hg	Ho	I	In	La	Li
							ppb	ppb	0,5	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Compte							245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245				
Moyenne							495	497	0,0	29088	45	-40	3378	277	7459	692	2100	69	2594	251	123	114	2467	1092	487	-300	27	-200	43	-77	7	4096	759
Écart type							71	922	0,2	17347	102	-5	4362	349	7843	670	3876	74	4293	236	110	111	3751	714	478	0	28	0	40	808	7	4316	835
Maximum							707	9720	0,2	61403	422	-6	18000	2470	68600	3220	23300	489	40100	1650	616	678	40500	4220	3670	300	148	-200	310	7000	31	38500	46300
Minimum							-500	-300	-0,1	6400	-50	-40	-3000	-20	370	-50	-500	-2	-600	26	7	-5	140	300	18	-300	-5	-200	3	-500	-2	230	-1000
74550060	74540042	Ah	369735	5759714	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	9600	-50	-40	-3000	20	610	160	-500	3	-600	35	14	10	330	330	49	-300	17	-200	4	-500	-2	360	-1000
74550061	74540045	Ah	369752	5759706	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	9500	-50	-40	-3000	100	430	90	-500	5	-600	32	17	8	200	330	39	-300	20	-200	3	-500	-2	230	-1000
74550062	74540066	Ah	371238	5759563	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	16000	-100	-40	-3000	90	1460	230	-500	13	-600	58	30	22	840	540	91	-300	17	-200	9	-500	-2	830	-1000
74550063		MR3Sol07				A10-1237final	-500	700	-0,5	41300	120	-40	4000	400	4740	590	1600	70	3800	200	100	87	1470	1500	352	-300	7	-200	34	500	10	3190	-1000
74550064	74540140DUP	Duplicata			TEMOIN	A10-1237final	-500	-300	-0,9	20700	-50	-40	4000	70	4420	130	1600	77	1000	158	79	89	1610	940	295	-300	35	-200	28	500	10	2510	-1000
74550065	74540013	Ah	369619	5758749	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	20200	80	-40	4000	60	7280	340	-500	5	-600	227	124	94	1290	700	465	-300	18	-200	42	500	4	3680	-1000
74550066	74540064	Ah	371241	5759555	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	13700	-50	-40	4000	60	1350	280	-500	5	-600	44	22	22	890	440	81	-300	7	-200	8	-500	3	700	-1000
74550067	74540060DUP	Duplicata			INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	18500	-50	-40	-3000	90	940	170	-500	4	-600	33	17	12	540	580	58	-300	8	-200	6	-500	3	540	-1000
74550068	74540068	Ah	371232	5759573	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	16400	90	-40	3000	70	1380	110	-500	12	-600	49	30	19	450	540	89	-300	6	-200	10	-500	2	860	-1000
74550069	74540022	Ah	369682	5758763	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	27500	90	-40	-3000	60	11400	380	-500	11	1000	331	173	147	1530	1070	659	-300	23	-200	60	-500	5	5930	-1000
74550070	74540089	Ah	371225	5759583	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	19800	-50	-40	3000	60	3280	380	-500	4	600	101	53	51	1380	680	190	-300	5	-200	19	-500	3	1810	-1000
74550070.1		MR3Sol07				A10-1237final	-500	800	-0,5	43100	120	-40	4000	420	4960	620	1700	70	3700	198	104	90	1510	1540	371	-300	8	-200	37	800	10	3330	-1000
74550071	74540139	Ah	370512	5758928	TEMOIN	A10-1237final	-500	800	-2,3	23500	-50	-40	6000	290	5870	250	2600	121	1900	195	95	89	5340	970	396	-300	24	-200	35	800	12	3220	-1000
74550072	74540111	Ah	370455	5759045	TEMOIN	A10-1237final	-500	400	-4,3	34700	390	-40	8000	60	31400	310	13600	220	9700	987	448	450	1370	3510	2100	-300	123	-200	168	1200	19	17500	-1000
74550073	74540071	Ah	371223	5758951	INDICE	A10-1237final	-500	400	-0,5	17200	70	-40	-3000	30	5960	370	-500	17	1300	168	92	84	1090	640	362	-300	13	-200	30	-500	4	3540	-1000
74550074	74540081	Ah	371174	5758889	INDICE	A10-1237final	-500	600	-0,5	56200	110	-40	4000	1880	5670	2640	-500	60	3200	224	119	107	1210	1850	378	-300	8	-200	41	-500	24	3100	-1000
74550075	74540083	Ah	371230	5759554	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0,5	15700	-50	-40	-3000	130	1510	150	-500	20	600	55	34	27	740	530	101	-300	8	-200	10	-500	4	820	-1000
74550076	74540108	Ah	371151	5759745	INDICE	A10-1237final	-500	800	-1,5	21500	180	-40	4000	90	2880	420	2300	51	7800	988	466	443	2390	1130	1980	-300	58	-200	164	-500	9	16590	-1000
74550077	74540133	Ah	370591	5758943	TEMOIN	A10-1237final	-500	800	-0,5	23700	-50	-40	7000	520	9350	690	1700	89	3100	298	144	120	4150	970	350	-300	20	-200	51	800	13	4870	-1000
74550078	74540105	Ah	371149	5759744	INDICE	A10-1237final	-500	1100	-0,5	19200	420	-40	4000	160	68800	730	1400	109	25900	1650	816	879	2080	1160	3670	-300	93	-200	310	-500	11	38500	-1000
74550079		MRESol08				A10-1237final	-500	900	-0,5	90500	110	-40	5000	370	5040	3200	12700	21	4000	199	88	94	1540	3010	859	-300	14	-200	35	-500	7	3120	41000
74550080	74540139	Ah	370514	5758918	TEMOIN	A10-1237final	-500	-300	-1,1	18100	50	-40	4000	40	7140	210	4600	235	1800	262	113	113	1750	1030	441	-300	49	-200	39	-500	4	3700	-1000
74550081	74540015	Ah	369611	5758752	LELECTR	A10-1237final	-500	1000	-0,5	15300	70	-40	-3000	30	7680	480	-500	13	-600	282	124	99	1130	580	418	-300	35	-200	48	-500	3	4070	-1000
74550082	74540030	Ah	369544	5758776	LELECTR	A10-1237final	-500	800	-4,1	20100	240	-40	6000	60	11400	160	900	489	3800	382	185	138	1390	3050	635	-300	123	-200	66	800	11	5890	-1000
74550083	74540023	Ah	369672	5758764	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	30100	-50	-40	5000	50	12400	540	-500	22	1000	363	191	152	1180	1040	676	-300	18	-200	62	-500	2	6200	-1000
74550084	74540026	Ah	369564	5758770	LELECTR	A10-1237final	-500	500	-0,5	29900	70	-40	5000	200	8390	450	600	47	1500	247	117	99	2730	1180	471	-300	35	-200	44	800	8	4310	-1000
74550085	74540012	Ah	369628	5758745	LELECTR	A10-1237final	-500	1100	-0,5	12200	90	-40	-3000	30	18300	470	-500	8	1000	562	305	220	1180	580	1030	-300	39	-200	100	-500	3	9910	-1000
74550086	74540014	Ah	369620	5758781	LELECTR	A10-1237final	-500	500	-0,5	18500	90	-40	-3000	60	9750	380	-500	14	-600	314	156	128	1380	650	525	-300	37	-200	55	-500	4	5050	-1000
74550086.1		MR3Sol07				A10-1237final	-500	900	-0,5	41100	160	-40	4000	410	5020	680	1600	82	3800	204	105	93	1440	1500	366	-300	18	-200	38	-500	7	3350	-1000
74550087	74540027	Ah	369554	5758772	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0,5	22800	90	-40	3000	20	21400	260	1500	26	1900	591	305	252	820	1110	1130	-300	58	-200	104	-500	4	10700	-1000
74550088	74540142	Ah	370522	5758908	TEMOIN	A10-1237final	-500	-300	-1,0	12400	70	-40	4000	70	4620	100	4300	134	1500	158	75	73	1620	740	296	-300	57	-200	27	-500	6	2500	-1000
74550089	74540028	Ah	369555	5758773	LELECTR	A10-1237final	-500	400	-0,5	32400	200	-40	4000	100	21000	260	3200	40	4900	544	312	289	1840	1420	1250	-300	86	-200	107	-500	9	10600	-1000
74550090	74540034	Ah	371190	5759663	INDICE	A10-1237final	-500	500	-0,5	32600	100	-40	-3000	1100	3350	380	-500	100	3900	129	69	55	1010	1080	217	-300	15	-200	25	-500	24	1760	-1000
74550091	74540029	Ah	389543	5758774	LELECTR	A10-1237final	-500	400	-1,8	15200	130	-40	4000	50	16300	70	4900	33	2800	494	224	223	480	1100	964	-300	108	-200	81	800	11	8960	-1000
74550092	74540095	Ah	371170	5759699	INDICE	A10-1237final	-500	800	-0,5	43800	170	-40	6000	630	11200	1230	600	30	4300	373	193	204	2560	1560	721	-300	26	-200	67	800	16	5970	-1000
74550093	74540096	Ah	371172	5759700	INDICE	A10-1237final	-500	600	-0,5	40800	250	-40	7000	370	11900	1130	2200	34	6300	440													

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 1 : Digestion au pyrophosphate de sodium

ÉCHANTILLON	NUMÉRO TERRAIN	TYPE DE MATERIEL	ESTANT (Nad 27, Zone 18)	NORDANT (Nad 27, Zone 18)	TRANSECT	CERTIFICAT	ANALYSE SODIUM PYROPHOSPHATE (PYRO-MS)																										
							Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Ga	Gd	Ge	Hf	Hg	Ho	I	In	La	Li	
							ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Compte							245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245				
Moyenne							495	407	0.0	26088	45	-40	3376	277	7486	592	2100	69	2594	251	123	114	2437	1092	487	300	27	-200	43	-7	7	4096	759
Cont Type							77	302	1.2	17347	122	5	4362	348	7843	670	3876	74	4283	236	110	111	3751	714	478	0	28	0	40	893	7	4516	8333
Maximum							702	3700	6.2	61400	423	-40	18000	2470	68800	3200	23300	489	40100	1950	816	878	40500	4220	3670	-300	140	310	7000	21	36900	45000	
Minimum							-500	-300	-0.5	6400	-50	-40	-3000	-20	-370	-50	-500	-2	-600	26	7	-5	140	300	19	-300	5	-200	3	-500	-2	230	-1000
74550120	74540082	Ah	371203	5759636	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	25800	50	-40	3000	180	4940	250	-500	28	1500	186	87	85	1030	1330	301	-300	15	-200	32	-500	5	2810	-1000
74550121	74540120	Ah	370473	5759307	TEMOIN	A10-1237final	-500	1300	-0.5	20600	180	-40	7000	310	20300	1640	4100	66	6300	598	267	232	5570	1110	1080	-300	30	-200	102	1400	20	11100	-1000
74550122	74540115	Ah	370465	5759027	TEMOIN	A10-1237final	-500	1800	1.0	25500	190	-40	7000	400	21300	1320	8600	102	5000	629	300	251	6850	1730	1180	-300	69	-200	106	1800	17	11000	-1000
74550123	74540124	Ah	370485	5759899	TEMOIN	A10-1237final	-500	600	-0.5	11600	-50	-40	5000	40	3510	220	2800	147	1300	108	54	47	3210	570	210	-300	18	-200	21	800	7	1900	-1000
74550124	74540079	Ah	371205	5759627	INDICE	A10-1237final	-500	300	-0.5	16400	90	-40	5000	570	3060	1920	1000	70	1900	123	64	51	1410	870	193	-300	14	-200	25	-500	7	1700	-1000
74550125		MR3S007				A10-1237final	-500	900	-0.5	44600	130	-40	4000	500	5330	720	2100	88	4000	220	107	90	1560	1750	375	-300	16	-200	41	-500	8	3560	-1000
74550126	74540068	Ah	371186	5759674	INDICE	A10-1237final	-500	600	-0.5	63000	90	-40	4000	1560	3470	1370	-500	106	2600	126	62	69	650	1910	234	-300	9	-200	29	-500	28	1900	-1000
74550127	74540092	Ah	371176	5759690	INDICE	A10-1237final	-500	500	-0.5	43500	-50	-40	-3000	780	2040	1320	-500	57	1400	84	49	45	710	1270	151	-300	11	-200	16	-500	8	1060	-1000
74550128	74540093	Ah	371188	5759662	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	21700	123	-40	-3000	700	4410	610	700	47	2200	191	111	86	1850	970	315	-300	13	-200	35	-500	-2	2360	-1000
74550129	74540089	Ah	371181	5759680	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	48700	-50	-40	-3000	910	1230	160	-500	191	1700	41	23	28	200	1420	77	-300	5	-200	7	-500	14	610	-1000
74550130	74540085	Ah	371192	5759654	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	21400	123	-40	3000	110	14200	90	1100	49	2600	474	231	240	1590	1190	915	-300	32	-200	81	600	-2	7980	-1000
74550131	74540147	Ah	370532	5759880	TEMOIN	A10-1237final	-500	-300	-0.5	6400	-50	-40	3000	40	2880	70	3690	136	1000	77	42	48	1290	400	171	-300	24	-200	16	-500	-2	1550	-1000
74550132	74540033	Ah	369995	5759724	LELECTR	A10-1237final	-500	1650	-0.5	10700	-50	-40	-3000	70	1130	330	-500	7	600	32	18	17	920	330	69	-300	12	-200	7	-500	5	640	-1000
74550133		MR3S007				A10-1237final	-500	700	-0.5	38900	80	-40	4000	400	4800	560	2000	65	4300	197	103	90	1430	1340	354	-300	12	-200	36	-500	3	3140	-1000
74550134	74540109	Ah	371141	5759784	INDICE	A10-1237final	-500	600	-0.5	51900	-50	-40	-3000	1150	4330	650	-500	224	2600	166	88	86	730	1650	314	-300	6	-200	29	-500	23	2440	-1000
74550135	74540110	Ah	371143	5759785	INDICE	A10-1237final	-500	700	-0.5	66300	50	-40	-3000	1520	2870	520	-500	134	2700	109	61	58	610	2120	208	-300	10	-200	21	-500	31	1380	-1000
74550136	74540073	Ah	371217	5759600	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	17600	80	-40	-3000	50	5680	230	-500	8	800	180	98	69	770	630	371	-300	19	-200	32	-500	-2	3290	-1000
74550137	74540087	Ah	371184	5759673	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	62000	-50	-40	-3000	2470	3820	1100	-500	263	1900	53	27	41	140	1940	167	-300	5	-200	10	-500	8	3490	-1000
74550138	74540086	Ah	371194	5759655	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	32000	100	-40	-3000	170	7660	150	1700	92	3300	237	123	112	4330	1240	442	-300	30	-200	41	-500	-2	4750	-1000
74550139	74540126	Ah	370489	5759891	TEMOIN	A10-1237final	-500	900	-0.5	27700	-50	-40	8000	370	12500	990	1600	41	2300	390	188	170	4270	980	801	-300	10	-200	69	-500	16	6890	-1000
74550140	74540127	Ah	370491	5759872	TEMOIN	A10-1237final	-500	900	-0.5	28900	70	-40	4000	560	10500	730	830	37	2200	339	172	144	2770	950	880	-300	11	-200	59	-500	23	5590	-1000
74550141	74540114	Ah	370462	5759636	TEMOIN	A10-1237final	-500	2100	1.9	38000	150	-40	6000	120	25700	690	11000	116	4900	747	349	334	9080	1860	1580	-300	89	-200	125	1300	8	13900	-1000
74550142	74540131	Ah	370498	5759894	TEMOIN	A10-1237final	-500	1000	-0.5	23500	100	-40	5000	920	18100	1490	600	20	3000	448	233	199	2080	870	947	-300	22	-200	81	-500	27	8670	5000
74550143	74540098	Ah	371170	5759710	INDICE	A10-1237final	-500	1500	-0.5	38300	130	-40	7000	690	16700	1730	-500	53	3600	488	241	280	3160	1580	1030	-300	12	-200	82	900	10	7970	-1000
74550144	74540060	Ah	371249	5759537	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	16800	-50	-40	-3000	100	1660	180	-500	8	1600	46	22	31	530	500	91	-300	13	-200	9	-500	-2	880	-1000
74550145		MRES008				A10-1237final	-500	800	-0.5	75800	80	-40	4000	330	4560	2710	11000	14	3200	168	82	89	1470	2540	776	-300	7	-200	29	-500	2	2800	4000
74550146	74540056	Ah	369803	5759892	LELECTR	A10-1237final	-500	-300	-0.5	13000	-50	-40	-3000	80	1240	260	-500	3	-600	35	19	19	840	400	137	-300	5	-200	7	-500	-2	710	-1000
74550147	74540061	Ah	371243	5759545	INDICE	A10-1237final	-500	-300	-0.5	20900	-50	-40	-3000	100	1110	2300	-500	11	-600	40	21	20	920	620	98	-300	8	-200	7	-500	-2	630	-1000
74550148	74540140	Ah	370516	5759819	TEMOIN	A10-1237final	-500	-300	-1.0	15500	-50	-40	4000	60	4780	70	3100	74	900	162	86	80	1070	820	332	-300	38	-200	30	-500	-2	2640	-1000
74550149	74540025	Ah	369563	5759678	LELECTR	A10-1237final	-500	400	2.0	14800	240	-40	4000	50	29500	140	6000	72	3020	884	424	397	840	930	1810	-300	83	-200	155	600	13	15100	-1000
74550150	74540016	Ah	369612	5759874	LELECTR	A10-1237final	-500	300	-0.5	21800	-50	-40	4000	50	9200	240	-500	10	-600	273	146	127	980	740	580	-300	24	-200	49	-500	-2	4960	-1000
74550151	74540065	Ah	3712																														

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 1 : Digestion au pyrophosphate de sodium

ECHANTILLON	NUMÉRO TERRAIN	TYPE DE MATÉRIEL	ESTANT (Nad 27, Zone 18)	NORDANT (Nad 27, Zone 18)	TRANSECT	CERTIFICAT	ANALYSE SODIUM PYROPHOSPHATE (PYRO-MS)																											
							Ag	As	Au	Ba	Be	Bl	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Fe	Ga	Gd	Ge	Hf	Hg	Ho	I	In	La	Li	
							ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Compte							245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245	245					
Moyenne							495	497	0.0	29088	45	-0	3376	277	7459	582	2100	69	2594	251	123	114	2457	1092	467	-300	27	-200	43	-7	7	4398	759	
Écart type							77	302	1.2	17847	102	-5	4352	349	7943	670	3878	74	4293	239	110	111	3751	714	478	0	28	0	40	928	7	4316	8853	
Maximum							700	9700	6.2	91400	420	-0	18000	2470	68800	3220	23300	469	40100	1650	816	678	40500	4220	3670	-300	149	-300	310	7000	31	18900	45000	
Minimum							-500	-300	-0.5	6400	-50	-0	-3000	-20	370	-50	-500	-2	650	26	7	-6	140	300	18	-300	-5	-200	3	-500	-2	230	-1000	
74550181		MR35007				A10-123/final	-500	800	-0.5	45400	110	-0	6000	480	5270	690	600	77	3700	215	105	94	1680	1660	400	-300	9	-200	37	500	7	3470	-1000	
74550182	74550158	Doublet	74550158	3/1196	5759646	INDICE	A10-123/final	-500	-300	2.4	16900	170	-0	8000	60	14400	110	2700	116	4300	627	290	297	2960	1950	1080	-300	67	-200	106	1000	7	7860	-1000
74550183	74550162	Doublet	74550162	370487	5759880	TEMOIN	A10-123/final	-500	1200	-0.5	29100	80	-0	18000	210	9040	480	1600	39	2300	290	137	131	5410	1000	592	-300	11	-200	47	1400	13	4850	-1000
74550184	74550153	Doublet	74550153	3/1198	5759647	INDICE	A10-123/final	-500	-300	1.9	14300	240	-0	12000	50	29000	60	3300	44	8500	878	394	463	1070	2480	1710	-300	83	-200	147	1700	12	13500	-1000
74550185	74550152	Doublet	74550152	370467	5759028	TEMOIN	A10-123/final	-500	1900	-0.2	22100	220	-0	13900	250	21400	730	23300	337	10200	644	315	263	9820	4220	1280	-300	145	-200	112	3400	17	11700	-1000
74550186	74540201	Ah		370580	5758772	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	600	-0.5	15500	-50	-0	5000	230	2980	180	2200	113	1900	110	57	42	3400	530	166	-300	22	-200	21	500	9	1640	-1000
74550187	74540176	Ah		370555	5758838	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	26800	-50	-0	4000	660	5610	720	700	108	1400	194	86	80	4990	700	321	-300	11	-200	32	-500	12	2920	-1000
74550188	74540204	Ah		370585	5758762	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	-300	-0.5	11300	-50	-0	-3000	110	3220	140	3500	143	3000	126	60	54	2080	620	180	-300	48	-200	22	-500	7	1720	-1000
74550189	74540200	Ah		370576	5758779	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	300	-0.5	17600	-50	-0	5000	110	2980	160	1400	122	1000	118	55	43	2080	570	185	-300	27	-200	19	-500	10	1710	-1000
74550190	74540198	Ah		370572	5758792	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	20800	-50	-0	6000	480	3220	810	1100	130	1400	122	57	51	3110	620	190	-300	23	-200	20	600	8	1750	-1000
74550191	74540162	Ah		371135	5759792	INDICE	A10-5591/final REV	-500	400	-0.5	22100	80	-0	6000	140	7580	280	5000	43	3000	329	155	134	2580	1100	491	-300	24	-200	57	700	7	3900	-1000
74550192		Standard	MRES008				A10-5591/final REV	-500	700	-0.5	87100	70	-0	6000	350	4240	2890	12600	19	3500	181	82	83	1490	2150	770	-300	7	-200	31	-500	6	2620	39000
74550193	74540199	Ah		370574	5758778	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	15700	-50	-0	6000	180	2890	240	1200	105	1100	112	57	42	2880	480	189	-300	18	-200	20	-500	8	1620	-1000
74550194	74540197	Ah		370570	5758791	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	400	-0.5	17900	-50	-0	5000	500	3120	330	1200	113	1800	124	57	49	2570	570	186	-300	19	-200	21	-500	9	1710	-1000
74550195	74540170	Ah		370539	5758873	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	300	-0.5	10300	-50	-0	5000	120	2050	160	2900	130	1000	81	39	35	2280	340	142	-300	26	-200	17	-500	4	1110	-1000
74550196	74540172	Ah		370540	5758864	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	2.2	10400	-50	-0	5000	100	1960	190	3700	133	1200	78	36	32	3480	380	122	-300	20	-200	12	900	5	1030	-1000
74550197	74540203	Ah		370583	5758761	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	-300	6.2	10300	-50	-0	4000	80	2460	100	3000	193	1000	95	48	37	1260	480	158	-300	48	-200	17	-500	9	1330	-1000
74550198	74540195	Ah		370566	5758799	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	600	-0.5	21800	-50	-0	6000	290	4140	240	1300	137	1320	150	71	62	3500	650	251	-300	15	-200	26	500	10	2280	-1000
74550199	74540190	Ah		370557	5758824	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	600	-0.4	13600	-50	-0	6000	250	2580	210	1600	123	1700	109	48	40	3570	410	158	-300	20	-200	17	600	8	1370	-1000
74550200		Standard	MR35007				A10-5591/final REV	-500	700	-0.5	44900	-50	-0	5000	500	4690	640	2090	72	3500	201	97	90	1630	1220	350	-300	13	-200	38	-500	8	3110	-1000
74550201	74540163	Ah		371134	5759787	INDICE	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	65500	-50	-0	4000	1090	1600	1160	-500	79	1990	83	49	41	380	1440	124	-300	6	-200	16	-500	17	810	-1000
74550202	74540169	Ah		370537	5758872	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	600	1.8	21100	-50	-0	7000	400	4070	450	2080	83	1820	148	73	67	5500	680	280	-300	15	-200	26	1100	10	2180	-1000
74550203	74540191	Ah		370557	5758816	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	-300	-0.5	12400	-50	-0	4000	50	3360	110	3520	75	900	163	83	68	660	640	241	-300	51	-200	28	-500	6	1780	-1000
74550204	74540194	Ah		370563	5758810	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	300	-0.5	23900	-50	-0	6000	140	4140	270	800	101	6000	161	76	63	1690	760	252	-300	25	-200	27	-500	12	2280	-1000
74550205	74540193	Ah		370561	5758809	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	600	-0.5	22800	-50	-0	7000	600	3630	890	1000	122	6300	139	72	57	3730	640	245	-300	11	-200	23	-500	11	1930	-1000
74550206	74540168	Ah		371138	5759773	INDICE	A10-5591/final REV	-500	800	6.0	53900	-50	-0	6000	1490	9010	1910	-500	107	5000	305	143	150	2280	1490	515	-300	6	-200	53	-500	24	4690	-1000
74550207		Standard	MR35007				A10-5591/final REV	-500	800	3.1	48700	110	-0	5000	480	4720	650	2000	74	3400	216	102	90	1670	1300	321	-300	10	-200	39	-500	9	3130	-1000
74550208	74540164	Ah		371138	5759788	INDICE	A10-5591/final REV	-500	800	4.0	33200	-50	-0	7000	1390	4050	2590	-500	70	3300	191	90	86	1330	840	302	-300	-5	-200	36	-500	13	2180	-1000
74550209	74540160	Ah		371121	5759810	INDICE	A10-5591/final REV	-500	400	0.7	42400	120	-0	7000	100	23600	620	2100	45	2300	762	386	373	5850	1410	1340	-300	19	-200	131	600	8	12000	-1000
74550210	74540159	Ah		371119	5759809	INDICE	A10-5591/final REV	-500	-300	-0.5	44100	100	-0	6000	140	25700	560	2200	72	1900	769	381	396	3800	1360	1390	-300	13	-200	130	-500	8	13500	-1000
74550211	74540168	Ah		371129	5759803	INDICE	A10-5591/final REV	-500	500	2.5	32200	90	-0	6000	120	14600	430	3930	48	2900	433	236	243	6250	1420	850	-300	18	-200	85	-500	5	7510	-1000
74550212	74540192	Ah		370559	5758817	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	18900	-50	-0	6000	720	2560	770	800	131	1200	103	47	41	2850	570	168	-300	17	-200	17	-500	9	1410	-1000
74550213	74540189	Ah		370555	5758823	TEMOIN	A10-5591/final REV	-500	500	-0.5	15900	-50	-0	6000	320	3260	310	2100	100	2600	128	48	48	3620	510	215	-300	20	-200	22	-500	6	1740	-1000
74550214		Standard	MRES008				A10-5591/final REV	-500	800	-0.5	91400	-50	-0	5000	390	4190	3070	12400	19	3500	178	85	82	1560	2310	747	-300	14	-200	31	-500	7	2620	42000
74550215	74540165	Ah		371136	5759772	INDICE	A10-5591/final REV	-500	500	3.3	22100	70	-0	7000																				

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 3 : Analyses à la fluorescence X

Echantillon	Numéro Terrain	Type de Matériel	ANALYSE FLUORESCENCE X MICRO XRF														
			Ba	Cs	Co	Te	Te	Sb	Sb	Sn	Cd	Ag	Pd				
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Compte			241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	
Moyenne			22	9	26	9	26	9	26	9	26	9	26	9	26	9	
Erreur Type			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Minimum			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7450001	7450024	An	<LOD	17,25	<LOD	7,01	20,97	<LOD	7,27	<LOD	5,9	<LOD	3,31	<LOD	2,45	<LOD	4,23
7450002	7450010	An	<LOD	18	<LOD	7,29	<LOD	7,54	<LOD	6,17	<LOD	3,45	<LOD	2,56	<LOD	4,44	
7450003	7450011	An	<LOD	17,01	<LOD	6,96	<LOD	20,25	<LOD	7,07	<LOD	3,16	<LOD	2,34	<LOD	4,06	
7450004	7450050	An	<LOD	19,45	<LOD	7,98	<LOD	23,07	<LOD	8,1	<LOD	6,55	<LOD	2,66	<LOD	4,6	
7450005	7450051	An	<LOD	18,38	<LOD	7,53	<LOD	21,87	<LOD	7,63	<LOD	3,43	<LOD	2,49	<LOD	4,51	
7450006	7450052	An	<LOD	22,03	<LOD	9,01	<LOD	25,23	<LOD	9,18	<LOD	4,14	<LOD	3,06	<LOD	5,3	
7450007	7450010DUP	Duplicata	<LOD	19,04	<LOD	7,77	<LOD	22,71	<LOD	8,01	<LOD	6,54	<LOD	3,67	<LOD	2,71	<LOD
7450007.1	7450010DUP	MRES008	<LOD	29,73	<LOD	14,83	<LOD	34,97	<LOD	19,38	<LOD	9,89	<LOD	4,41	<LOD	7,67	
7450008	7450011	Duplicata	<LOD	21,86	<LOD	8,83	<LOD	28,2	<LOD	9,3	<LOD	4,36	<LOD	3,16	<LOD	5,92	
7450009	7450012	An	<LOD	18,4	<LOD	7,83	<LOD	23,23	<LOD	8,24	<LOD	3,78	<LOD	2,83	<LOD	4,83	
7450011	74500134	An	<LOD	21,11	<LOD	8,44	<LOD	25,18	<LOD	8,97	<LOD	4,11	<LOD	3,03	<LOD	5,28	
7450012	7450052	An	<LOD	18,25	<LOD	7,45	<LOD	21,76	<LOD	7,64	<LOD	3,45	<LOD	2,52	<LOD	4,5	
7450013	7450019	An	<LOD	18,5	<LOD	6,72	<LOD	19,67	<LOD	6,94	<LOD	3,12	<LOD	2,34	<LOD	4,06	
7450014	74500136	An	<LOD	22,48	<LOD	8,9	<LOD	26,74	<LOD	9,54	<LOD	4,38	<LOD	3,34	<LOD	5,73	
7450015	74500132	An	<LOD	23,85	<LOD	9,53	<LOD	28,16	<LOD	10	<LOD	4,64	<LOD	3,35	<LOD	5,88	
7450016	MRES007	An	<LOD	29,1	<LOD	11,28	<LOD	34,48	<LOD	12,39	<LOD	5,81	<LOD	4,28	<LOD	7,72	
7450017	74500143	An	<LOD	32,62	<LOD	12,38	<LOD	39,17	<LOD	13,77	<LOD	6,48	<LOD	4,83	<LOD	8,39	
7450018	74500137	An	<LOD	32,98	<LOD	12,48	<LOD	38,11	<LOD	13,95	<LOD	6,58	<LOD	4,92	<LOD	8,52	
7450019	74500123	An	<LOD	33,68	<LOD	12,8	<LOD	40,17	<LOD	14,44	<LOD	6,84	<LOD	5,05	<LOD	8,93	
7450020	74500142	An	<LOD	34,4	<LOD	13,16	<LOD	41,6	<LOD	15,16	<LOD	7,16	<LOD	5,36	<LOD	9,26	
7450021	74500146	An	<LOD	35,65	<LOD	13,7	<LOD	43,32	<LOD	15,84	<LOD	7,54	<LOD	5,64	<LOD	9,52	
7450022	74500153	An	<LOD	36,5	<LOD	14,1	<LOD	45,1	<LOD	16,6	<LOD	8,02	<LOD	6,02	<LOD	10,2	
7450023	74500153	An	<LOD	37,3	<LOD	14,5	<LOD	46,9	<LOD	17,4	<LOD	8,5	<LOD	6,5	<LOD	10,9	
7450024	7450023	An	<LOD	38,1	<LOD	14,9	<LOD	48,7	<LOD	18,2	<LOD	9,0	<LOD	7,0	<LOD	11,6	
7450025	7450023	An	<LOD	38,9	<LOD	15,3	<LOD	50,5	<LOD	19,0	<LOD	9,5	<LOD	7,5	<LOD	12,3	
7450026	7450024	An	<LOD	39,7	<LOD	15,7	<LOD	52,3	<LOD	19,8	<LOD	10,0	<LOD	8,0	<LOD	13,0	
7450027	7450025	An	<LOD	40,5	<LOD	16,1	<LOD	54,1	<LOD	20,6	<LOD	10,5	<LOD	8,5	<LOD	13,7	
7450028	7450026	An	<LOD	41,3	<LOD	16,5	<LOD	55,9	<LOD	21,4	<LOD	11,0	<LOD	9,0	<LOD	14,4	
7450029	7450027	An	<LOD	42,1	<LOD	16,9	<LOD	57,7	<LOD	22,2	<LOD	11,5	<LOD	9,5	<LOD	15,1	
7450030	7450028	An	<LOD	42,9	<LOD	17,3	<LOD	59,5	<LOD	23,0	<LOD	12,0	<LOD	10,0	<LOD	15,8	
7450031	7450029	An	<LOD	43,7	<LOD	17,7	<LOD	61,3	<LOD	23,8	<LOD	12,5	<LOD	10,5	<LOD	16,5	
7450032	7450030	An	<LOD	44,5	<LOD	18,1	<LOD	63,1	<LOD	24,6	<LOD	13,0	<LOD	11,0	<LOD	17,2	
7450033	7450031	An	<LOD	45,3	<LOD	18,5	<LOD	64,9	<LOD	25,4	<LOD	13,5	<LOD	11,5	<LOD	17,9	
7450034	7450032	An	<LOD	46,1	<LOD	18,9	<LOD	66,7	<LOD	26,2	<LOD	14,0	<LOD	12,0	<LOD	18,6	
7450035	7450033	An	<LOD	46,9	<LOD	19,3	<LOD	68,5	<LOD	27,0	<LOD	14,5	<LOD	12,5	<LOD	19,3	
7450036	7450034	An	<LOD	47,7	<LOD	19,7	<LOD	70,3	<LOD	27,8	<LOD	15,0	<LOD	13,0	<LOD	20,0	
7450037	7450035	An	<LOD	48,5	<LOD	20,1	<LOD	72,1	<LOD	28,6	<LOD	15,5	<LOD	13,5	<LOD	20,7	
7450038	7450036	An	<LOD	49,3	<LOD	20,5	<LOD	73,9	<LOD	29,4	<LOD	16,0	<LOD	14,0	<LOD	21,4	
7450039	7450037	An	<LOD	50,1	<LOD	20,9	<LOD	75,7	<LOD	30,2	<LOD	16,5	<LOD	14,5	<LOD	22,1	
7450040	7450038	An	<LOD	50,9	<LOD	21,3	<LOD	77,5	<LOD	31,0	<LOD	17,0	<LOD	15,0	<LOD	22,8	
7450041	7450039	An	<LOD	51,7	<LOD	21,7	<LOD	79,3	<LOD	31,8	<LOD	17,5	<LOD	15,5	<LOD	23,5	
7450042	7450040	An	<LOD	52,5	<LOD	22,1	<LOD	81,1	<LOD	32,6	<LOD	18,0	<LOD	16,0	<LOD	24,2	
7450043	7450041	An	<LOD	53,3	<LOD	22,5	<LOD	82,9	<LOD	33,4	<LOD	18,5	<LOD	16,5	<LOD	24,9	
7450044	7450042	An	<LOD	54,1	<LOD	22,9	<LOD	84,7	<LOD	34,2	<LOD	19,0	<LOD	17,0	<LOD	25,6	
7450045	7450043	An	<LOD	54,9	<LOD	23,3	<LOD	86,5	<LOD	35,0	<LOD	19,5	<LOD	17,5	<LOD	26,3	
7450046	7450044	An	<LOD	55,7	<LOD	23,7	<LOD	88,3	<LOD	35,8	<LOD	20,0	<LOD	18,0	<LOD	27,0	
7450047	7450045	An	<LOD	56,5	<LOD	24,1	<LOD	90,1	<LOD	36,6	<LOD	20,5	<LOD	18,5	<LOD	27,7	
7450048	7450046	An	<LOD	57,3	<LOD	24,5	<LOD	91,9	<LOD	37,4	<LOD	21,0	<LOD	19,0	<LOD	28,4	
7450049	7450047	An	<LOD	58,1	<LOD	24,9	<LOD	93,7	<LOD	38,2	<LOD	21,5	<LOD	19,5	<LOD	29,1	
7450050	7450048	An	<LOD	58,9	<LOD	25,3	<LOD	95,5	<LOD	39,0	<LOD	22,0	<LOD	20,0	<LOD	29,8	
7450051	7450049	An	<LOD	59,7	<LOD	25,7	<LOD	97,3	<LOD	39,8	<LOD	22,5	<LOD	20,5	<LOD	30,5	
7450052	7450050	An	<LOD	60,5	<LOD	26,1	<LOD	99,1	<LOD	40,6	<LOD	23,0	<LOD	21,0	<LOD	31,2	
7450053	7450051	An	<LOD	61,3	<LOD	26,5	<LOD	100,9	<LOD	41,4	<LOD	23,5	<LOD	21,5	<LOD	31,9	
7450054	7450052	An	<LOD	62,1	<LOD	26,9	<LOD	102,7	<LOD	42,2	<LOD	24,0	<LOD	22,0	<LOD	32,6	
7450055	7450053	An	<LOD	62,9	<LOD	27,3	<LOD	104,5	<LOD	43,0	<LOD	24,5	<LOD	22,5	<LOD	33,3	
7450056	7450054	An	<LOD	63,7	<LOD	27,7	<LOD	106,3	<LOD	43,8	<LOD	25,0	<LOD	23,0	<LOD	34,0	
7450057	7450055	An	<LOD	64,5	<LOD	28,1	<LOD	108,1	<LOD	44,6	<LOD	25,5	<LOD	23,5	<LOD	34,7	
7450058	7450056	An	<LOD	65,3	<LOD	28,5	<LOD	109,9	<LOD	45,4	<LOD	26,0	<LOD	24,0	<LOD	35,4	
7450059	7450057	An	<LOD	66,1	<LOD	28,9	<LOD	111,7	<LOD	46,2	<LOD	26,5	<LOD	24,5	<LOD	36,1	
7450060	7450058	An	<LOD	66,9	<LOD	29,3	<LOD	113,5	<LOD	47,0	<LOD	27,0	<LOD	25,0	<LOD	36,8	
7450061	7450059	An	<LOD	67,7	<LOD	29,7	<LOD	115,3	<LOD	47,8	<LOD	27,5	<LOD	25,5	<LOD	37,5	
7450062	7450060	An	<LOD	68,5	<LOD	30,1	<LOD	117,1	<LOD	48,6	<LOD	28,0	<LOD	26,0	<LOD	38,2	
7450063	7450061	An	<LOD	69,3	<LOD	30,5	<LOD	118,9	<LOD	49,4	<LOD	28,5	<LOD	26,5	<LOD	38,9	
7450064	7450062	An	<LOD	70,1	<LOD	30,9	<LOD	120,7	<LOD	50,2	<LOD						

ANNEXE 3 - Analyses géochimiques
Table 3 - Analyses à la fluorescence X

ECHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE DE MATERIEL	ESTANT (Nad 27, Zone 18)	NORDANT (Nad 27, Zone 18)	TRANSECT	MODE D'ANALYSE DU XRF	DUREE (sec)	ANALYSE FLUORESCENCE X MICRO-XRF																													
								Zr	Sr	Sr Error	U	U Error	Rb	Rb Error	Th	Th Error	Pb	Pb Error	Au	Au Error	Sr	Sr Error	As	As Error	Hg	Hg Error	Zn										
7450010	7450069	An	371225	5759593	INDICE	Sol (ppm)	360	19,39	2,77	26,22	3,12	28,78	2,24	6,3	2,24	1,36	<LOD	3,89	<LOD	5,34	<LOD	3,38	<LOD	3,38	<LOD	5,85	<LOD	7450070	7450070	241	85	241	9	241	0	241	155
7450070	7450070	MRS&S007	371225	5759593	INDICE	Sol (ppm)	360	<LOD	4,87	29,8	6,25	254,17	6,61	<LOD	8,2	27,22	2,86	6,17	3,86	23,85	<LOD	7,89	<LOD	7,89	<LOD	6,51	<LOD	7450071	7450071	241	85	241	9	241	0	241	155
7450071	7450038	An	370512	5759628	TEMOIN	Sol (ppm)	360	9,48	2,87	79,51	4,73	31,09	4,41	<LOD	7,24	32,73	2,76	5,41	3,41	18,75	4,52	<LOD	6,94	<LOD	3,26	<LOD	7450072	7450072	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450072	7450111	An	370455	5759545	TEMOIN	Sol (ppm)	360	14,75	3,07	64,95	4,5	70,29	3,98	<LOD	5,88	50,3	3,43	20,98	4,55	18,63	5,29	<LOD	5,09	<LOD	3,61	<LOD	7450073	7450073	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450073	7450071	An	371223	5759591	INDICE	Sol (ppm)	360	20,55	2,73	23,89	3,34	24,71	2,08	6,72	3,41	4,11	<LOD	4,07	5,69	<LOD	5,69	<LOD	5,69	<LOD	3,8	<LOD	7450074	7450074	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450074	7450091	An	371174	5759589	INDICE	Sol (ppm)	360	10,94	2,79	42,53	3,9	136,87	4,36	5,12	4	9,69	1,81	<LOD	4,84	43,15	<LOD	5,46	<LOD	2,85	<LOD	5,73	<LOD	7450075	7450075	241	85	241	9	241	0	241	155
7450075	7450063	An	371203	5759593	INDICE	Sol (ppm)	360	10,14	2,79	25,2	3,21	23,72	2,11	<LOD	4,94	3,02	1,37	<LOD	4,08	<LOD	5,46	<LOD	6,17	<LOD	3,82	<LOD	7450076	7450076	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450076	7450105	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450077	7450077	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450077	7450105	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450078	7450078	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450078	7450105	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450079	7450079	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450079	7450112	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450080	7450080	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450080	7450112	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450081	7450081	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450081	7450112	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450082	7450082	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450082	7450112	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450083	7450083	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450083	7450112	An	371157	5759583	INDICE	Sol (ppm)	360	9,59	2,83	65,46	4,68	136,41	6,79	<LOD	6,79	19,9	3,67	10,9	3,67	10,9	3,67	<LOD	6,79	<LOD	3,82	<LOD	7450084	7450084	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450084	7450026	An	369564	5759776	LELECTR	Sol (ppm)	360	21,55	3,24	34,51	3,91	47,6	3,13	7,46	4,51	12,48	2,17	<LOD	5,32	18,59	5,28	<LOD	7,83	<LOD	3,71	<LOD	7450085	7450085	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450085	7450012	An	369528	5759746	LELECTR	Sol (ppm)	360	20,3	2,77	24,96	3,12	37,18	2,33	<LOD	5,02	4,5	1,45	4,35	2,89	<LOD	5,38	<LOD	6,81	<LOD	3,08	<LOD	7450086	7450086	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450086	7450014	An	369620	5759575	LELECTR	Sol (ppm)	360	19,83	2,84	28,75	3,28	32,98	2,41	5,97	3,6	4,75	1,53	5,02	3,91	<LOD	5,38	<LOD	6,89	<LOD	3,21	<LOD	7450087	7450087	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450087	7450027	An	369554	5759572	LELECTR	Sol (ppm)	360	<LOD	4,75	29,81	8,07	247,48	6,44	<LOD	7,88	24,28	2,89	5,82	3,73	24,92	5,89	<LOD	7,88	<LOD	3,4	<LOD	7450088	7450088	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450088	7450027	An	369554	5759572	LELECTR	Sol (ppm)	360	<LOD	4,75	29,81	8,07	247,48	6,44	<LOD	7,88	24,28	2,89	5,82	3,73	24,92	5,89	<LOD	7,88	<LOD	3,4	<LOD	7450089	7450089	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450089	7450027	An	369554	5759572	LELECTR	Sol (ppm)	360	<LOD	4,75	29,81	8,07	247,48	6,44	<LOD	7,88	24,28	2,89	5,82	3,73	24,92	5,89	<LOD	7,88	<LOD	3,4	<LOD	7450090	7450090	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450090	7450028	An	369555	5759773	LELECTR	Sol (ppm)	360	12,57	2,77	35,35	3,42	40,35	2,57	<LOD	5,89	15,45	2	<LOD	5,38	84,68	7,92	<LOD	6,89	<LOD	3,13	<LOD	7450091	7450091	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450091	7450029	An	369543	5759674	LELECTR	Sol (ppm)	360	10,07	2,71	81,86	4,56	132,6	4,33	<LOD	6,14	14,4	2	<LOD	5,38	84,68	7,92	<LOD	6,89	<LOD	3,13	<LOD	7450092	7450092	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450092	7450029	An	369543	5759674	LELECTR	Sol (ppm)	360	10,07	2,71	81,86	4,56	132,6	4,33	<LOD	6,14	14,4	2	<LOD	5,38	84,68	7,92	<LOD	6,89	<LOD	3,13	<LOD	7450093	7450093	241	85	241	9	241	0	241	155	
7450093	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450094	7450094	241	85	241	9	241	0	241	155
7450094	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450095	7450095	241	85	241	9	241	0	241	155
7450095	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450096	7450096	241	85	241	9	241	0	241	155
7450096	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450097	7450097	241	85	241	9	241	0	241	155
7450097	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450098	7450098	241	85	241	9	241	0	241	155
7450098	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450099	7450099	241	85	241	9	241	0	241	155
7450099	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15	3,86	<LOD	6,09	<LOD	2,82	<LOD	4	<LOD	7450100	7450100	241	85	241	9	241	0	241	155
7450100	7450096	An	371170	5759700	INDICE	Sol (ppm)	360	16,28	2,63	36,62	3,18	17,72	1,83	9	3,7	11,21	7,81	3,07	9,15																		

ANNEXE 3 - Analyses géochimiques
Table 3 - Analyses à la fluorescence X

ECHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE DE MATERIEL	ANALYSE FLUORESCENCE X (MICRO-XRF)															
			Ba	Ba Error	Cs	Cs Error	To	To Error	Tb	Tb Error	Sr	Sr Error	Cd	Cd Error	Ag	Ag Error	Pb	Pb Error
Compte	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241
Moyenne	22	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!	26	#DIV/0!
Erreur type	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!	8	#DIV/0!
Minimum	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
Maximum	16,3	<LOD	6,74	<LOD	19,64	<LOD	6,9	<LOD	5,62	<LOD	3,09	<LOD	2,27	<LOD	3,94	<LOD	3,94	
74500701	74540069	MRES2007	29,14	<LOD	11,37	<LOD	34,6	<LOD	12,45	<LOD	10,29	<LOD	5,79	<LOD	4,35	<LOD	7,42	
74500701	74540139	AH	25,15	<LOD	9,94	<LOD	30,03	<LOD	10,79	<LOD	8,89	<LOD	5,05	<LOD	3,68	<LOD	6,47	
74500702	74540111	AH	22,22	<LOD	8,94	<LOD	26,2	<LOD	9,25	<LOD	7,58	<LOD	4,2	<LOD	3,1	<LOD	5,32	
74500703	74540071	AH	16,17	<LOD	6,58	<LOD	19,27	<LOD	6,91	<LOD	5,51	<LOD	3,08	<LOD	2,26	<LOD	3,89	
74500704	74540091	AH	21,96	<LOD	8,8	<LOD	9,34	<LOD	7,7	<LOD	4,35	<LOD	3,07	<LOD	2,2	<LOD	5,6	
74500705	74540063	AH	16,21	<LOD	6,61	<LOD	19,34	<LOD	6,8	<LOD	5,51	<LOD	4,05	<LOD	3,05	<LOD	3,88	
74500706	74540106	AH	20,64	<LOD	8,27	<LOD	24,81	<LOD	8,8	<LOD	7,2	<LOD	4,05	<LOD	3,05	<LOD	3,33	
74500707	74540133	AH	21,48	<LOD	8,81	<LOD	25,68	<LOD	9,13	<LOD	7,5	<LOD	4,2	<LOD	3,14	<LOD	3,47	
74500708	74540105	AH	19,4	<LOD	6,94	<LOD	20,34	<LOD	10,17	<LOD	8,83	<LOD	3,67	<LOD	2,88	<LOD	6,12	
74500709	74540136	AH	20,84	<LOD	8,2	<LOD	24,81	<LOD	8,8	<LOD	7,2	<LOD	4,05	<LOD	3,05	<LOD	3,33	
74500710	74540137	MRES2008	28,24	<LOD	11,12	<LOD	34,03	<LOD	12,18	<LOD	10,15	<LOD	5,2	<LOD	4,27	<LOD	7,21	
74500711	74540139	AH	17,25	<LOD	7,04	<LOD	20,62	<LOD	7,27	<LOD	5,91	<LOD	3,27	<LOD	2,39	<LOD	4,19	
74500712	74540030	AH	20,75	<LOD	8,26	<LOD	24,99	<LOD	8,74	<LOD	7,14	<LOD	4,03	<LOD	2,95	<LOD	5,23	
74500713	74540023	AH	19,07	<LOD	7,77	<LOD	22,89	<LOD	7,97	<LOD	6,47	<LOD	3,59	<LOD	2,62	<LOD	4,55	
74500714	74540026	AH	18,49	<LOD	7,52	<LOD	21,84	<LOD	7,73	<LOD	6,27	<LOD	3,51	<LOD	2,57	<LOD	4,48	
74500715	74540012	AH	16,95	<LOD	6,91	<LOD	20,21	<LOD	8,14	<LOD	6,83	<LOD	3,21	<LOD	2,4	<LOD	4,29	
74500716	74540014	AH	19,65	<LOD	8,01	<LOD	23,46	<LOD	8,24	<LOD	6,71	<LOD	3,71	<LOD	2,76	<LOD	4,72	
74500717	74540068	AH	32,56	<LOD	12,6	<LOD	38,63	<LOD	13,9	<LOD	11,38	<LOD	6,4	<LOD	4,63	<LOD	8,14	
74500718	74540027	MRES2007	16,93	<LOD	6,88	<LOD	20,23	<LOD	7,17	<LOD	5,91	<LOD	3,25	<LOD	2,41	<LOD	4,18	
74500719	74540142	AH	25,83	<LOD	9,95	<LOD	30,35	<LOD	10,97	<LOD	9,14	<LOD	5,15	<LOD	3,78	<LOD	6,61	
74500720	74540138	AH	17,6	<LOD	6,42	<LOD	19,34	<LOD	6,83	<LOD	5,15	<LOD	4,2	<LOD	3,24	<LOD	5,6	
74500721	74540096	AH	22,68	<LOD	9,12	<LOD	27,53	<LOD	9,83	<LOD	8,03	<LOD	4,52	<LOD	3,4	<LOD	5,56	
74500722	74540029	AH	18,35	<LOD	7,46	<LOD	21,91	<LOD	7,76	<LOD	6,32	<LOD	3,53	<LOD	2,56	<LOD	4,59	
74500723	74540035	AH	17,8	<LOD	7,08	<LOD	21,14	<LOD	7,5	<LOD	6,18	<LOD	3,43	<LOD	2,56	<LOD	4,41	
74500724	74540096	AH	19,37	<LOD	7,74	<LOD	23,08	<LOD	8,22	<LOD	6,72	<LOD	3,74	<LOD	2,77	<LOD	4,81	
74500725	74540093	MRES2007	24,26	<LOD	9,4	<LOD	28,82	<LOD	10,34	<LOD	8,55	<LOD	4,85	<LOD	3,61	<LOD	6,26	
74500726	74540119	AH	22,64	<LOD	8,95	<LOD	26,99	<LOD	9,71	<LOD	7,98	<LOD	4,51	<LOD	3,33	<LOD	5,99	
74500727	74540007	AH	17,07	<LOD	6,92	<LOD	20,38	<LOD	7,21	<LOD	5,86	<LOD	3,29	<LOD	2,43	<LOD	4,18	
74500728	74540006	AH	19,03	<LOD	7,74	<LOD	22,72	<LOD	8	<LOD	6,49	<LOD	3,63	<LOD	2,69	<LOD	4,68	
74500729	74540009	AH	22,18	<LOD	8,92	<LOD	26,49	<LOD	9,41	<LOD	7,73	<LOD	4,31	<LOD	3,16	<LOD	5,46	
74500730	74540121	AH	30,35	<LOD	11,4	<LOD	35,46	<LOD	12,78	<LOD	10,88	<LOD	6,02	<LOD	4,45	<LOD	7,67	
74500731	74540016	AH	24,04	<LOD	9,32	<LOD	28,34	<LOD	10,23	<LOD	8,03	<LOD	4,72	<LOD	3,5	<LOD	6,06	
74500732	74540013	MRES2008	17,38	<LOD	7,07	<LOD	20,76	<LOD	7,36	<LOD	6,02	<LOD	3,36	<LOD	2,45	<LOD	4,32	
74500733	74540120	AH	19,65	<LOD	8,01	<LOD	23,19	<LOD	8,14	<LOD	6,84	<LOD	3,63	<LOD	2,72	<LOD	4,78	
74500734	74540146	AH	26,47	<LOD	10,09	<LOD	31,25	<LOD	11,26	<LOD	9,39	<LOD	5,27	<LOD	3,89	<LOD	6,92	
74500735	74540021	AH	16,22	<LOD	6,62	<LOD	19,3	<LOD	6,81	<LOD	5,55	<LOD	3,08	<LOD	2,25	<LOD	3,92	
74500736	74540097	AH	19,34	<LOD	7,63	<LOD	23,09	<LOD	8,21	<LOD	6,69	<LOD	3,73	<LOD	2,78	<LOD	4,84	
74500737	74540128	AH	16,43	<LOD	7,45	<LOD	21,95	<LOD	7,8	<LOD	6,33	<LOD	3,56	<LOD	2,63	<LOD	4,49	
74500738	74540099	MRES2007	24,67	<LOD	9,84	<LOD	29,44	<LOD	10,55	<LOD	8,69	<LOD	4,92	<LOD	3,63	<LOD	6,39	
74500739	74540104	AH	17,81	<LOD	7,2	<LOD	21,22	<LOD	7,53	<LOD	6,14	<LOD	3,45	<LOD	2,53	<LOD	4,39	
74500740	74540112	AH	22,91	<LOD	9,15	<LOD	27,44	<LOD	9,82	<LOD	8,03	<LOD	4,45	<LOD	3,33	<LOD	5,72	
74500741	74540112	AH	20,98	<LOD	8,62	<LOD	24,8	<LOD	9,81	<LOD	8,13	<LOD	3,94	<LOD	2,94	<LOD	5,1	
74500742	74540115	AH	20,84	<LOD	8,2	<LOD	24,81	<LOD	8,8	<LOD	7,4	<LOD	4,05	<LOD	3,05	<LOD	3,33	
74500743	74540113	MRES2007	30,56	<LOD	11,81	<LOD	36,19	<LOD	12,96	<LOD	10,74	<LOD	6,06	<LOD	4,48	<LOD	7,98	
74500744	74540117	AH	20,28	<LOD	8,19	<LOD	24,18	<LOD	8,58	<LOD	7,28	<LOD	3,92	<LOD	2,88	<LOD	5,07	
74500745	74540118	AH	19,17	<LOD	7,78	<LOD	22,71	<LOD	8,06	<LOD	6,53	<LOD	3,6	<LOD	2,66	<LOD	4,75	
74500746	74540115	MRES2008	27	<LOD	10,37	<LOD	11,42	<LOD	11,42	<LOD	9,45	<LOD	5,32	<LOD	3,94	<LOD	6,83	
74500747	74540070	AH	17,41	<LOD	7,1	<LOD	20,88	<LOD	7,24	<LOD	5,89	<LOD	3,36	<LOD	2,41	<LOD	4,17	
74500748	74540076	AH	18,88	<LOD	6,89	<LOD	20,08	<LOD	7,06	<LOD	5,76	<LOD	3,29	<LOD	2,45	<LOD	4,25	
74500749	74540077	AH	19,8	<LOD	7,88	<LOD	23,58	<LOD	8,38	<LOD	6,85	<LOD	3,86	<LOD	2,88	<LOD	4,03	
74500750	74540144	AH	20,1	<LOD	8,39	<LOD	24,49	<LOD	8,82	<LOD	6,97	<LOD	3,89	<LOD	2,89	<LOD	5,08	
74500751	74540082	AH	23,8	<LOD	9,48	<LOD	28,32	<LOD	10,17	<LOD	8,27	<LOD	4,86	<LOD	3,45	<LOD	6,01	
74500752	74540120	AH	16,28	<LOD	6,18	<LOD	19,34	<LOD	6,82	<LOD	5,55	<LOD	3,09	<LOD	2,28	<LOD	3,98	
74500753	74540033	MRES2007	17,63	<LOD	7,1	<LOD	20,35	<LOD	7,63	<LOD	6,24	<LOD	4,87	<LOD	3,68	<LOD	6,39	
74500754	74540110	AH	18,22	<LOD	7,57	<LOD	22,15	<LOD	7,97	<LOD	6,52	<LOD	3,71	<LOD	2,71	<LOD	4,72	
74500755	74540073	AH	17,18	<LOD	7,01	<LOD	20,43	<LOD	7,21	<LOD	5,82	<LOD	3,25	<LOD	2,4	<LOD	4,19	
74500756	74540087	AH	19,82	<LOD	8,05	<LOD	23,48	<LOD	8,25	<LOD	6,71	<LOD	3,79	<LOD	2,78	<LOD	4,85	
74500757	74540066	AH	28,8	<LOD	10,74	<LOD	32,02	<LOD	11,4	<LOD	9,31	<LOD	5,28	<LOD	3,86	<LOD	6,69	

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 3 : Analyses à la fluorescence X

ECHANTILLON	NUMERO TERRAIN	TYPE DE MATERIEL	ANALYSE FLUORESCENCE X (MICRO-XRF)																		
			Ba	Ca	Ce	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Sh	Sn	Cd	Cu	Ag	Au	Pt	Pd	Pd Error
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Compte			0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0
Moyenne			22	241	9	241	26	241	9	241	9	241	9	241	9	241	9	241	9	241	9
Ecart type			37	241	2	241	46	241	2	241	2	241	2	241	2	241	2	241	2	241	2
Minimum			0	15	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0
74500140	74540127	Ah	<LOD	22,71	<LOD	9,15	<LOD	27,18	<LOD	9,66	<LOD	7,87	<LOD	4,4	<LOD	3,25	<LOD	3,10	<LOD	5,72	0
74500141	74540114	Ah	<LOD	21,4	<LOD	8,45	<LOD	25,45	<LOD	10,08	<LOD	7,45	<LOD	4,19	<LOD	3,14	<LOD	3,10	<LOD	5,49	0
74500142	74540131	Ah	<LOD	24,16	<LOD	9,79	<LOD	28,18	<LOD	10,13	<LOD	8,31	<LOD	4,64	<LOD	3,37	<LOD	3,10	<LOD	6,66	0
74500143	74540098	Ah	<LOD	17,71	<LOD	7,17	<LOD	21,25	<LOD	7,53	<LOD	6,15	<LOD	3,44	<LOD	2,56	<LOD	3,10	<LOD	4,55	0
74500144	74540089	Ah	<LOD	15,71	<LOD	6,41	<LOD	16,78	<LOD	6,62	<LOD	5,39	<LOD	2,98	<LOD	2,22	<LOD	3,10	<LOD	3,84	0
74500145	74540098	MRES2008	<LOD	30,71	<LOD	11,73	<LOD	35,95	<LOD	12,96	<LOD	10,75	<LOD	6,14	<LOD	4,54	<LOD	3,10	<LOD	7,83	0
74540056		Ah	<LOD	20,81	<LOD	8,5	<LOD	24,73	<LOD	8,71	<LOD	7,03	<LOD	3,89	<LOD	2,87	<LOD	3,10	<LOD	4,98	0
74540076		Ah	<LOD	19,84	<LOD	7,8	<LOD	22,22	<LOD	7,8	<LOD	6,35	<LOD	3,4	<LOD	2,82	<LOD	3,10	<LOD	5,98	0
74540101		Ah	<LOD	16,45	<LOD	6,1	<LOD	21,68	<LOD	6,1	<LOD	5,03	<LOD	2,6	<LOD	2,02	<LOD	3,10	<LOD	4,62	0
74540149	74540025	Ah	<LOD	18,4	<LOD	7,43	<LOD	22,38	<LOD	7,83	<LOD	6,32	<LOD	3,56	<LOD	2,65	<LOD	3,10	<LOD	4,2	0
74500150	74540016	Ah	<LOD	16,8	<LOD	6,68	<LOD	19,98	<LOD	7,06	<LOD	5,74	<LOD	3,15	<LOD	2,38	<LOD	3,10	<LOD	4,14	0
74500151	74540065	Ah	<LOD	16,39	<LOD	6,66	<LOD	19,97	<LOD	6,96	<LOD	5,59	<LOD	3,13	<LOD	2,3	<LOD	3,10	<LOD	3,95	0
74500152	74540118	Ah	<LOD	23,76	<LOD	9,3	<LOD	28,04	<LOD	10,09	<LOD	8,37	<LOD	4,62	<LOD	3,48	<LOD	3,10	<LOD	6,02	0
74500153	74540084	Ah	<LOD	20,37	<LOD	8,3	<LOD	24,36	<LOD	8,59	<LOD	7,01	<LOD	3,93	<LOD	2,84	<LOD	3,10	<LOD	5,04	0
74500153.1		MRES2007	<LOD	25,29	<LOD	9,6	<LOD	29,95	<LOD	10,8	<LOD	9,93	<LOD	5	<LOD	3,77	<LOD	3,10	<LOD	6,56	0
74500154	74540129	Ah	<LOD	27,12	<LOD	10,64	<LOD	32,51	<LOD	11,62	<LOD	9,58	<LOD	5,4	<LOD	4,04	<LOD	3,10	<LOD	7,09	0
74500155	74540130	Ah	<LOD	23,67	<LOD	9,53	<LOD	28,19	<LOD	10,06	<LOD	8,18	<LOD	4,6	<LOD	3,37	<LOD	3,10	<LOD	6,05	0
74500156	74540099	Ah	<LOD	20,23	<LOD	8,17	<LOD	24,15	<LOD	8,95	<LOD	7	<LOD	3,95	<LOD	2,88	<LOD	3,10	<LOD	4,97	0
74500157	74540076	Ah	<LOD	19,42	<LOD	7,89	<LOD	23,22	<LOD	8,21	<LOD	6,89	<LOD	3,73	<LOD	2,76	<LOD	3,10	<LOD	4,74	0
74500158	74540081	Ah	<LOD	22,6	<LOD	8,3	<LOD	26,32	<LOD	9,1	<LOD	7,59	<LOD	4,49	<LOD	3,3	<LOD	3,10	<LOD	5,91	0
74500159	74540086	Ah	<LOD	21,65	<LOD	8,72	<LOD	25,82	<LOD	9,21	<LOD	7,59	<LOD	4,49	<LOD	3,3	<LOD	3,10	<LOD	5,91	0
74500160	74540072	Ah	<LOD	18,96	<LOD	7,73	<LOD	22,61	<LOD	7,88	<LOD	6,46	<LOD	3,58	<LOD	2,65	<LOD	3,10	<LOD	4,68	0
74500161	74540075	Ah	<LOD	18,07	<LOD	7,95	<LOD	21,58	<LOD	7,58	<LOD	6,19	<LOD	3,56	<LOD	2,58	<LOD	3,10	<LOD	4,48	0
74500161.1		MRES2007	<LOD	24,3	<LOD	9,4	<LOD	28,9	<LOD	10,34	<LOD	8,57	<LOD	4,88	<LOD	3,57	<LOD	3,10	<LOD	6,32	0
74500162	74540125	Ah	<LOD	23,32	<LOD	9,16	<LOD	27,89	<LOD	9,96	<LOD	8,24	<LOD	4,67	<LOD	3,43	<LOD	3,10	<LOD	6,02	0
74500163	74540081	Ah	<LOD	19,02	<LOD	7,73	<LOD	22,67	<LOD	8,01	<LOD	6,48	<LOD	3,85	<LOD	2,7	<LOD	3,10	<LOD	4,66	0
74500164	74540074	Ah	<LOD	16,29	<LOD	6,63	<LOD	19,45	<LOD	6,88	<LOD	5,6	<LOD	3,12	<LOD	2,32	<LOD	3,10	<LOD	4	0
74500165	74540095	Duplicate	<LOD	19,75	<LOD	7,93	<LOD	23,89	<LOD	8,44	<LOD	6,95	<LOD	3,9	<LOD	2,91	<LOD	3,10	<LOD	4,97	0
74500166	74550088	Doublon 74550088	<LOD	24,42	<LOD	9,41	<LOD	28,95	<LOD	10,4	<LOD	8,6	<LOD	4,81	<LOD	3,62	<LOD	3,10	<LOD	6,44	0
74500167	74550010	Doublon 74550010	<LOD	21,27	<LOD	8,59	<LOD	25,33	<LOD	9,07	<LOD	7,74	<LOD	4,15	<LOD	3,14	<LOD	3,10	<LOD	5,44	0
74500168	74550032	Doublon 74550032	<LOD	16,81	<LOD	6,97	<LOD	20,58	<LOD	7,04	<LOD	5,72	<LOD	3,18	<LOD	2,28	<LOD	3,10	<LOD	4,72	0
74500169	74550014	Doublon 74550014	<LOD	27,64	<LOD	10,4	<LOD	31,93	<LOD	11,41	<LOD	9,45	<LOD	5,32	<LOD	3,85	<LOD	3,10	<LOD	7,4	0
74500170	74550038	Doublon 74550038	<LOD	18,42	<LOD	7,53	<LOD	21,93	<LOD	7,74	<LOD	6,26	<LOD	3,92	<LOD	2,65	<LOD	3,10	<LOD	4,37	0
74500171	74550017	Doublon 74550017	<LOD	27,3	<LOD	10,51	<LOD	32,43	<LOD	11,74	<LOD	10,62	<LOD	5,5	<LOD	4,11	<LOD	3,10	<LOD	7,14	0
74500172	74550041	Doublon 74550041	<LOD	27,3	<LOD	10,49	<LOD	32,43	<LOD	11,62	<LOD	10,65	<LOD	5,38	<LOD	4,04	<LOD	3,10	<LOD	7,01	0
74500173	74550072	Doublon 74550072	<LOD	19,75	<LOD	9,09	<LOD	27,02	<LOD	9,6	<LOD	7,87	<LOD	4,37	<LOD	3,25	<LOD	3,10	<LOD	5,66	0
74500174	74550076	Doublon 74550076	<LOD	22,43	<LOD	7,91	<LOD	27,32	<LOD	8,47	<LOD	6,96	<LOD	3,93	<LOD	2,86	<LOD	3,10	<LOD	5,16	0
74500175	74550099	Doublon 74550099	<LOD	20,37	<LOD	11,1	<LOD	34,46	<LOD	12,47	<LOD	10,35	<LOD	5,85	<LOD	4,31	<LOD	3,10	<LOD	7,55	0
74500176	74550082	Doublon 74550082	<LOD	23,68	<LOD	9,41	<LOD	28,16	<LOD	10,41	<LOD	8,19	<LOD	4,59	<LOD	3,4	<LOD	3,10	<LOD	6,11	0
74500177	74550095	Doublon 74550095	<LOD	19,4	<LOD	7,87	<LOD	23,22	<LOD	8,19	<LOD	6,89	<LOD	3,75	<LOD	2,73	<LOD	3,10	<LOD	4,74	0
74500178	74550093	Doublon 74550093	<LOD	19,94	<LOD	7,95	<LOD	23,3	<LOD	8,52	<LOD	7,03	<LOD	3,95	<LOD	2,99	<LOD	3,10	<LOD	5,14	0
74500179	74550080	Doublon 74550080	<LOD	25,87	<LOD	10,37	<LOD	30,92	<LOD	10,97	<LOD	9,84	<LOD	5,13	<LOD	3,78	<LOD	3,10	<LOD	6,75	0
74500180	74550014	Doublon 74550014	<LOD	28,64	<LOD	11,05	<LOD	33,92	<LOD	12,27	<LOD	10,03	<LOD	5,93	<LOD	4,21	<LOD	3,10	<LOD	7,4	0
74500181		MRES2007	<LOD	19,66	<LOD	7,88	<LOD	23,6	<LOD	8,42	<LOD	6,9	<LOD	3,91	<LOD	2,87	<LOD	3,10	<LOD	5,08	0
74500182	74550158	Doublon 74550158	<LOD	23,91	<LOD	9,41	<LOD	28,49	<LOD	10,25	<LOD	8,41	<LOD	4,72	<LOD	3,5	<LOD	3,10	<LOD	6,18	0
74500183	74550162	Doublon 74550162	<LOD	16,61	<LOD	6,75	<LOD	19,84	<LOD	7,01	<LOD	5,72	<LOD	3,17	<LOD	2,36	<LOD	3,10	<LOD	4,71	0
74500184	74550153	Doublon 74550153	<LOD	23,02	<LOD	9,03	<LOD	27,26	<LOD	9,81	<LOD	8,06	<LOD	4,56	<LOD	3,36	<LOD	3,10	<LOD	6,79	0
74500185	74550152	Doublon 74550152	<LOD	24,93	<LOD	9,65	<LOD	29,73	<LOD	10,78	<LOD	8,84	<LOD	4,89	<LOD	3,72	<LOD	3,10	<		

ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 3 : Analyses à la fluorescence X

ÉCHANTILLON	NUMÉRO TERRAIN	TYPE DE MATÉRIEL	ESTANT (Nad 27, Zone 18)	NORDANT (Nad 27, Zone 18)	TRANSECT	MODE D'ANALYSE DU XRF	DURÉE (sec)	ANALYSE FLUORESCENCE X (MICRO-XRF)																							
								Mo	Mo Error	Zr	Zr Error	Sr	Sr Error	U	U Error	Rb	Rb Error	Th	Th Error	Pb	Pb Error	Au	Au Error	Se	Se Error	As	As Error	Hg	Hg Error	Zn	
								ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Compta								199	241	241	241	241	241	70	241	241	241	103	241	155	241	0	241	85	241	0	241	155			
Moyenne								15	3	99.1	5	123	4	7	6	21	2	8	4	24	6	#DIV/0!	7	4	3	8	4	#DIV/0!	7	43	
Écart type								8	1	94.3	2	99	2	1	2	16	1	4	1	22	1	#DIV/0!	1	1	0	3	1	#DIV/0!	1	57	
Maximum								24	5	331.8	9	366	6	11	10	72	4	24	6	144	10	0	9	5	4	19	8	0	10	284	
Minimum								5	2	18.9	3	17	2	2	5	3	2	1	4	3	6	4	0	5	3	2	4	2	0	5	10
7450211	74540168	Ah	371129	5759803	INDICE	Sol (ppm)	360	< LOD	4.75	179.11	7.15	285.68	7.18	< LOD	8.78	30.87	3.07	6.74	3.89	13.88	5.32	< LOD	7.5	< LOD	3.68	< LOD	5.24	< LOD	7.72	19.53	
7450212	74540192	Ah	370559	5758817	TEMOIN	Sol (ppm)	360	7.76	2.89	92.5	4.97	125.95	4.49	7.72	4.89	26.51	2.62	< LOD	5.04	19.08	5.13	< LOD	6.91	< LOD	3.41	< LOD	5.15	< LOD	6.67	23.78	
7450213	74540189	Ah	370555	5758823	TEMOIN	Sol (ppm)	360	< LOD	4.59	151.08	6.38	213.71	6.06	< LOD	8.25	34.25	3.04	< LOD	5.49	16.89	5.3	< LOD	7.08	< LOD	3.51	< LOD	5.4	< LOD	7.23	19.05	
7450214	Standard	MRESol08				Sol (ppm)	360	6.32	3.35	305.56	8.65	304.53	7.42	< LOD	8.87	32.71	3.13	8.9	4.14	22.87	5.89	< LOD	7.36	< LOD	3.58	< LOD	6.09	< LOD	7.79	214.14	
7450215	74540165	Ah	371136	5759772	INDICE	Sol (ppm)	360	< LOD	4.27	159.77	5.83	97.77	3.99	< LOD	6.2	11.03	1.95	5.12	3.37	11.6	4.63	< LOD	6.71	< LOD	3.2	6.35	3.28	< LOD	6.7	11.84	
7450216	74540196	Ah	370568	5759800	TEMOIN	Sol (ppm)	360	10.98	3.09	117.25	5.65	147.44	5.04	< LOD	7.48	30.18	2.82	5.89	3.88	22.93	5.56	< LOD	6.94	< LOD	3.45	< LOD	5.66	< LOD	7.43	26.55	
7450217	74540175	Ah	370553	5759837	TEMOIN	Sol (ppm)	360	22.27	3.79	41.26	4.83	69.57	4.26	< LOD	7.91	15.85	2.64	< LOD	6.44	23.09	6.7	< LOD	8.97	4.87	3.18	7.98	4.76	< LOD	9.6	67.89	
7450218	74540173	Ah	370547	5758846	TEMOIN	Sol (ppm)	360	8.62	3.21	149.29	6.51	216.7	6.24	< LOD	8.28	37.04	3.17	< LOD	5.73	18.73	5.56	< LOD	7.23	< LOD	3.63	< LOD	5.6	< LOD	7.66	25.17	
7450219	74540171	Ah	370538	5758863	TEMOIN	Sol (ppm)	360	15.54	3.43	82.44	5.6	146.55	5.5	< LOD	8.16	25.13	2.92	< LOD	5.93	16.82	5.73	< LOD	8.32	< LOD	4.02	9.51	4.19	< LOD	8.48	40.74	
7450220	74540161	Ah	371133	5759791	INDICE	Sol (ppm)	360	12.04	3.06	70.85	4.89	145.2	4.99	8.74	5.02	21.1	2.54	5.6	3.65	28.88	9.79	< LOD	7.58	< LOD	3.63	7.07	4.07	< LOD	7.11	33.68	
7450221	Standard	MR3Sol07				Sol (ppm)	360	< LOD	4.88	321.25	8.51	248.49	6.58	< LOD	8.17	27.77	2.86	8.76	3.99	20.73	5.63	< LOD	7.5	< LOD	3.62	8.35	4.02	< LOD	7.5	29.25	
7450222	74540167	Ah	371127	5759802	INDICE	Sol (ppm)	360	10.63	2.92	74.56	4.74	138.49	4.7	< LOD	6.73	20.01	2.35	< LOD	5.09	26.97	5.93	< LOD	6.89	< LOD	3.17	7.6	3.92	< LOD	6.42	28.33	
7450223	74540149	Ah	371115	5759817	INDICE	Sol (ppm)	360	< LOD	4.42	124.88	6.02	243.97	6.38	< LOD	7.84	25.43	2.71	< LOD	5.14	24.77	5.65	< LOD	6.9	< LOD	3.33	< LOD	5.65	< LOD	7.09	24.38	
7450224	74540201DUP	Duplicata	370580	5758772	TEMOIN	Sol (ppm)	360	< LOD	4.46	160.54	6.33	207.19	5.83	< LOD	7.94	35.02	2.98	6.65	3.68	15.6	5.11	< LOD	7.08	< LOD	3.4	5.3	3.53	< LOD	6.9	16.78	
7450225	74540150	Ah	371117	5759818	INDICE	Sol (ppm)	360	< LOD	4.79	191.72	7.7	368.92	8.33	< LOD	9.23	34.83	3.28	< LOD	5.78	10.27	5.24	< LOD	7.23	< LOD	3.76	< LOD	5.33	< LOD	7.89	15.98	
7450226	74540178	Ah	370547	5758854	TEMOIN	Sol (ppm)	360	< LOD	5.22	81.68	5.97	141.1	5.8	< LOD	8.64	24.95	3.15	< LOD	6.1	28.69	6.8	< LOD	8.96	< LOD	4.13	10.14	5.01	< LOD	8.81	20.46	
7450227	74540174	Ah	370549	5758847	TEMOIN	Sol (ppm)	360	< LOD	4.62	154.49	6.53	238.08	6.42	< LOD	8.32	37.21	3.14	7.76	3.87	14.34	5.21	< LOD	7.29	< LOD	3.55	< LOD	5.18	< LOD	7.41	20.36	
7450228	Standard	MR3Sol07				Sol (ppm)	360	6.1	3.22	299.89	8.12	293.6	6.59	8.4	5.55	26.59	2.83	7.36	3.89	25.34	5.85	< LOD	7.44	< LOD	3.56	7.52	4.12	< LOD	7.33	31.84	
7450229	74540170DUP	Duplicata	370539	5758873	TEMOIN	Sol (ppm)	360	< LOD	4.62	219.38	7.82	296.87	7.21	< LOD	8.94	42.89	3.39	< LOD	5.67	15	5.41	< LOD	7.41	< LOD	3.84	< LOD	5.37	< LOD	7.55	15.23	
7450230	74540177	Ah	370545	5758853	TEMOIN	Sol (ppm)	360	6.72	3.41	74.92	5.68	145.2	5.7	< LOD	8.66	24.58	3.06	< LOD	6.17	22.77	6.28	< LOD	8.63	< LOD	4.09	17.52	4.99	< LOD	8.9	13	
7450231	74540202	Ah	370582	5758773	TEMOIN	Sol (ppm)	360	10.71	3.14	129.44	6	165.59	5.67	< LOD	8.24	34.52	3.05	8.23	3.87	15.68	5.22	< LOD	7.78	< LOD	3.44	5.78	3.84	< LOD	7.44	14.64	

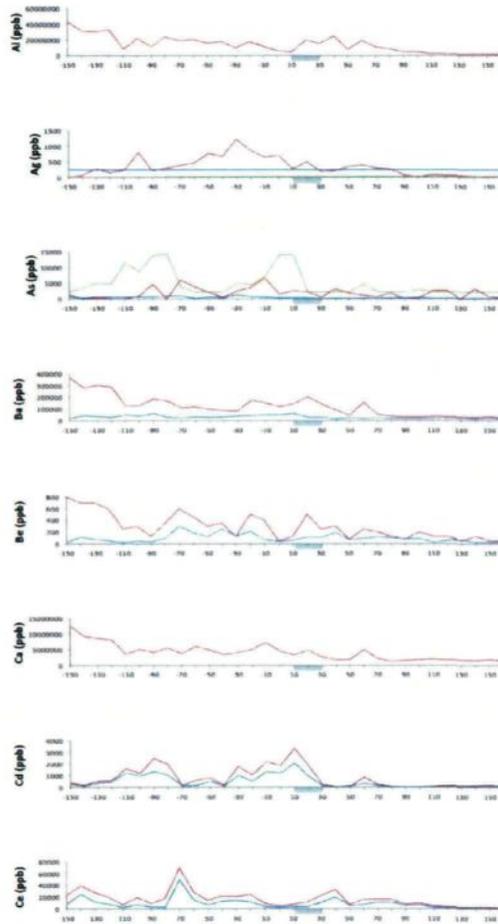
ANNEXE 3 : Analyses géochimiques
Table 3 : Analyses à la fluorescence X

ÉCHANTILLON	NUMÉRO TERRAIN	TYPE DE MATÉRIEL	ANALYSE FLUORESCENCE X (MICRO-XRF)															
			Ba	Ba Error	Cs	Cs Error	Te	Te Error	Sb	Sb Error	Sn	Sn Error	Cd	Cd Error	Ag	Ag Error	Pd	Pd Error
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Compte			0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241	0	241
Moyenne			#DIV/0!	22	#DIV/0!	9	#DIV/0!	28	#DIV/0!	9	#DIV/0!	3	#DIV/0!	4	#DIV/0!	3	#DIV/0!	6
Ecart type			#DIV/0!	5	#DIV/0!	2	#DIV/0!	6	#DIV/0!	2	#DIV/0!	2	#DIV/0!	1	#DIV/0!	1	#DIV/0!	1
Maximum			0	37	0	14	0	44	0	16	0	13	0	7	0	5	0	9
Minimum			0	15	0	6	0	16	0	6	0	6	0	3	0	2	0	4
7450211	74540168	Ah	< LOD	31,32	< LOD	12,04	< LOD	37,01	< LOD	13,28	< LOD	11,02	< LOD	6,2	< LOD	4,52	< LOD	8,11
7450212	74540192	Ah	< LOD	20,48	< LOD	8,13	< LOD	24,52	< LOD	8,75	< LOD	7,13	< LOD	4,08	< LOD	2,99	< LOD	5,25
7450213	74540189	Ah	< LOD	24,85	< LOD	9,68	< LOD	29,59	< LOD	10,64	< LOD	8,73	< LOD	4,91	< LOD	3,66	< LOD	6,21
7450214	Standard	MRESol08	< LOD	26,97	< LOD	10,33	< LOD	31,63	< LOD	11,34	< LOD	9,45	< LOD	5,37	< LOD	3,91	< LOD	6,89
7450215	74540165	Ah	< LOD	27,29	< LOD	10,73	< LOD	33,14	< LOD	11,89	< LOD	9,84	< LOD	5,88	< LOD	4,1	< LOD	7,13
7450216	74540196	Ah	< LOD	28,84	< LOD	11,38	< LOD	34,13	< LOD	12,17	< LOD	10,04	< LOD	5,59	< LOD	4,17	< LOD	7,16
7450217	74540175	Ah	< LOD	22,15	< LOD	8,96	< LOD	26,2	< LOD	9,28	< LOD	7,52	< LOD	4,18	< LOD	3,12	< LOD	5,51
7450218	74540173	Ah	< LOD	26,91	< LOD	11,33	< LOD	34,43	< LOD	12,4	< LOD	10,12	< LOD	5,7	< LOD	4,21	< LOD	7,52
7450219	74540171	Ah	< LOD	26,83	< LOD	10,72	< LOD	31,89	< LOD	11,39	< LOD	9,31	< LOD	5,25	< LOD	3,88	< LOD	6,99
7450220	74540161	Ah	< LOD	21,51	< LOD	8,59	< LOD	25,77	< LOD	9,15	< LOD	7,53	< LOD	4,24	< LOD	3,12	< LOD	5,59
7450221	Standard	MR3Sol07	< LOD	24,9	< LOD	9,67	< LOD	29,48	< LOD	10,56	< LOD	8,75	< LOD	4,93	< LOD	3,67	< LOD	6,37
7450222	74540167	Ah	< LOD	22,07	< LOD	8,75	< LOD	26,44	< LOD	9,47	< LOD	7,78	< LOD	4,46	< LOD	3,32	< LOD	5,57
7450223	74540149	Ah	< LOD	29,24	< LOD	11,33	< LOD	34,94	< LOD	12,6	< LOD	10,37	< LOD	5,84	< LOD	4,32	< LOD	7,64
7450224	74540201DUP	Duplicate	< LOD	28,75	< LOD	11,13	< LOD	34,05	< LOD	12,37	< LOD	10,21	< LOD	5,8	< LOD	4,26	< LOD	7,21
7450225	74540150	Ah	< LOD	31,02	< LOD	11,59	< LOD	36,18	< LOD	13,14	< LOD	10,91	< LOD	6,08	< LOD	4,54	< LOD	7,88
7450226	74540178	Ah	< LOD	36,68	< LOD	14,16	< LOD	43,89	< LOD	15,85	< LOD	13,02	< LOD	7,3	< LOD	5,24	< LOD	9,48
7450227	74540174	Ah	< LOD	23,63	< LOD	9,2	< LOD	28,07	< LOD	10,11	< LOD	8,26	< LOD	4,71	< LOD	3,54	< LOD	6,12
7450228	Standard	MR3Sol07	< LOD	24,89	< LOD	9,65	< LOD	29,41	< LOD	10,56	< LOD	8,72	< LOD	4,94	< LOD	3,65	< LOD	6,4
7450229	74540170DUP	Duplicate	< LOD	29,05	< LOD	11,03	< LOD	34,31	< LOD	12,39	< LOD	10,25	< LOD	5,91	< LOD	4,23	< LOD	7,56
7450230	74540177	Ah	< LOD	29,64	< LOD	11,52	< LOD	35,3	< LOD	12,74	< LOD	10,49	< LOD	5,98	< LOD	4,36	< LOD	7,62
7450231	74540202	Ah	< LOD	23,81	< LOD	9,35	< LOD	28,41	< LOD	10,24	< LOD	8,33	< LOD	4,67	< LOD	3,5	< LOD	6,08

ANNEXE 4

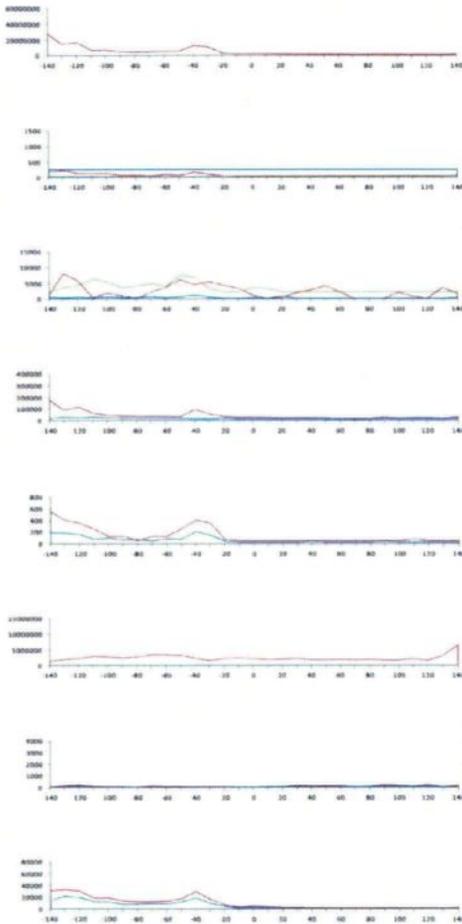
PROFILS DES ETM

Transect indice Chambois



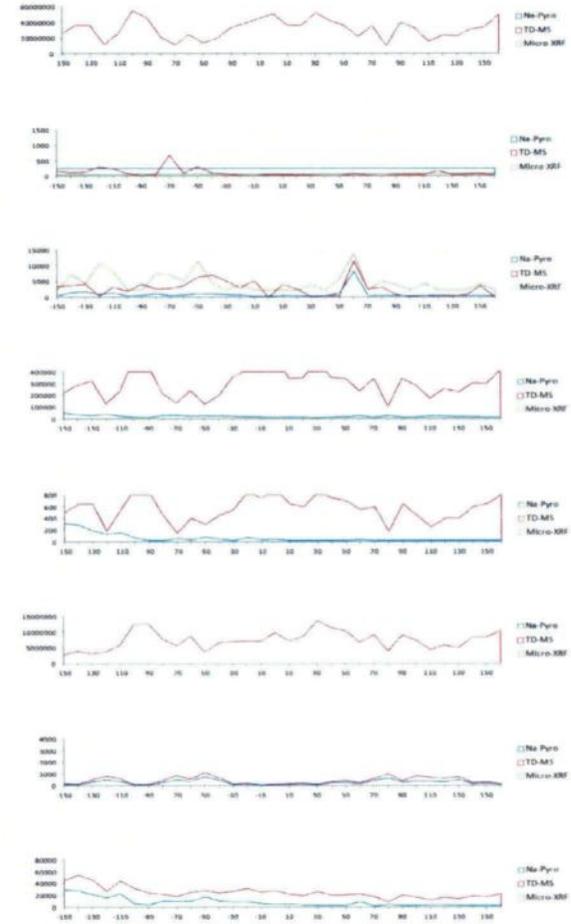
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



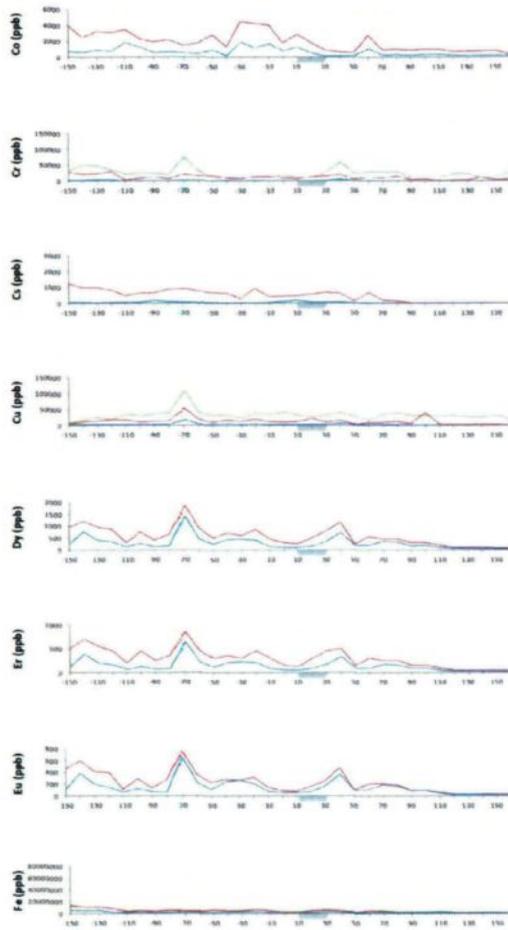
Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



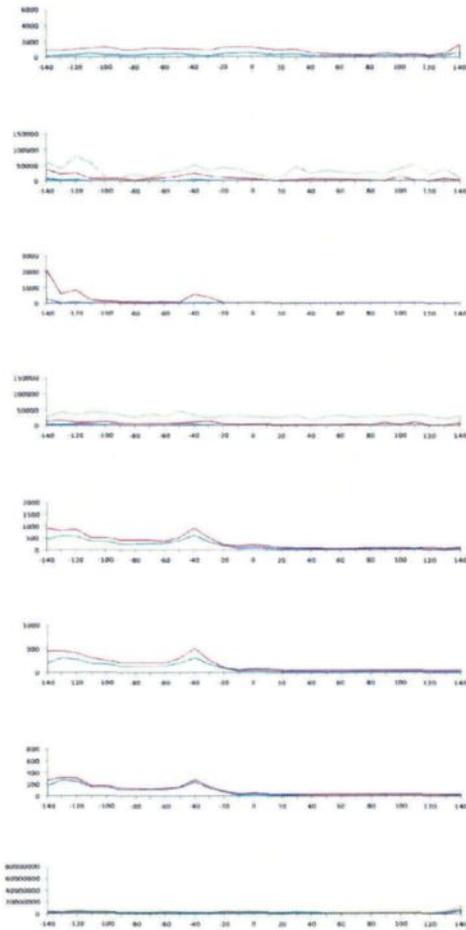
Stations (m), du nord vers le sud

Transect indice Chambois



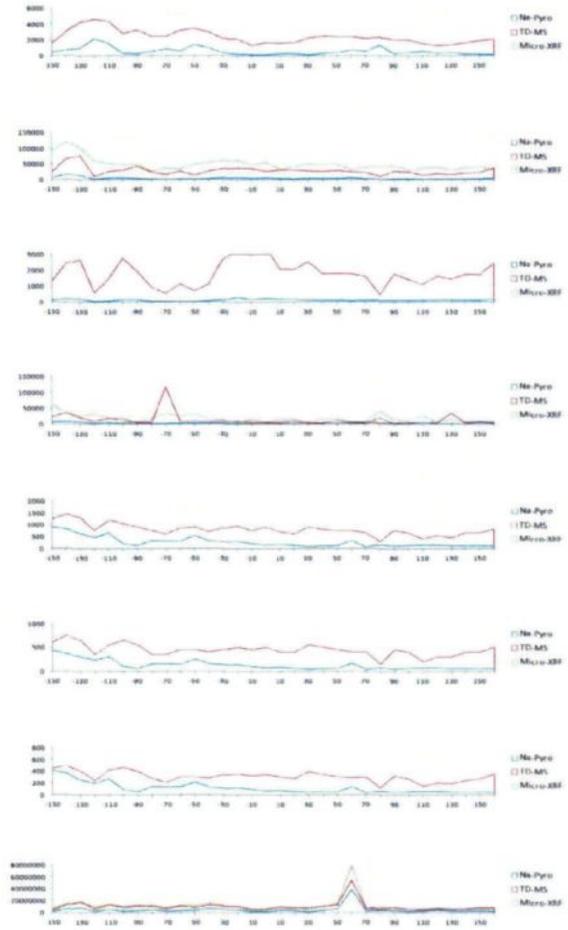
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



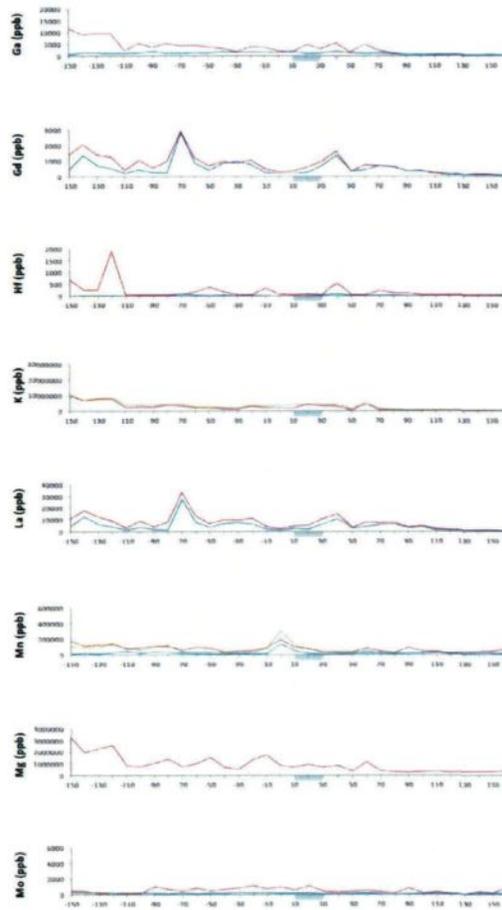
Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



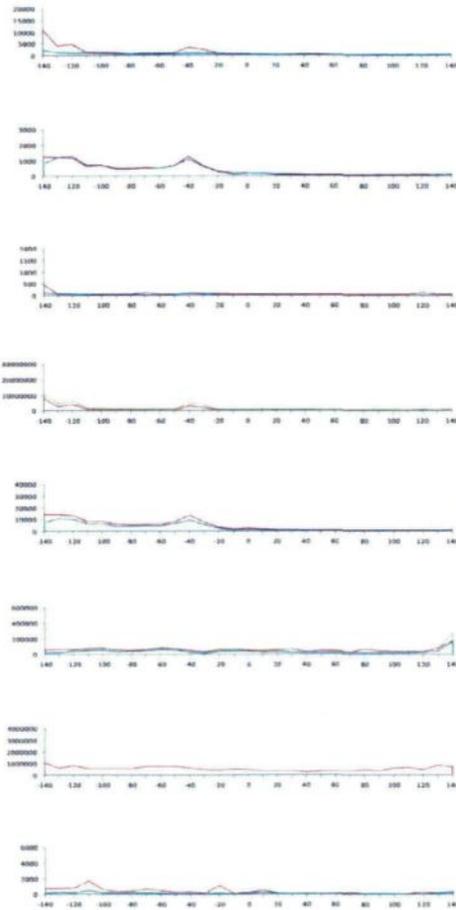
Stations (m), du nord vers le sud

Transect indice Chambois



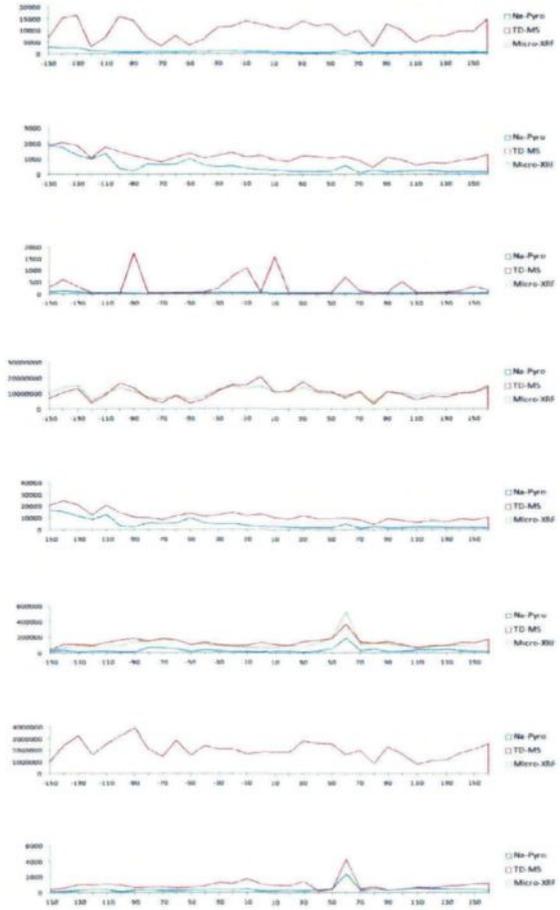
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



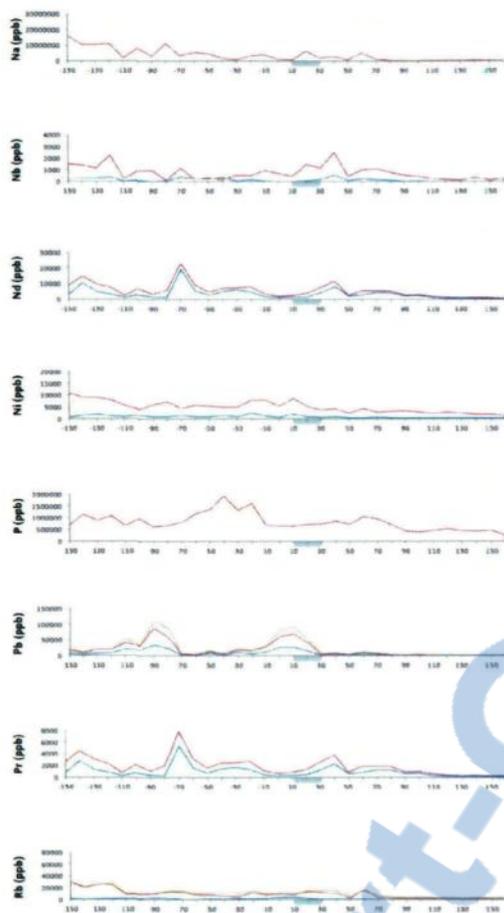
Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



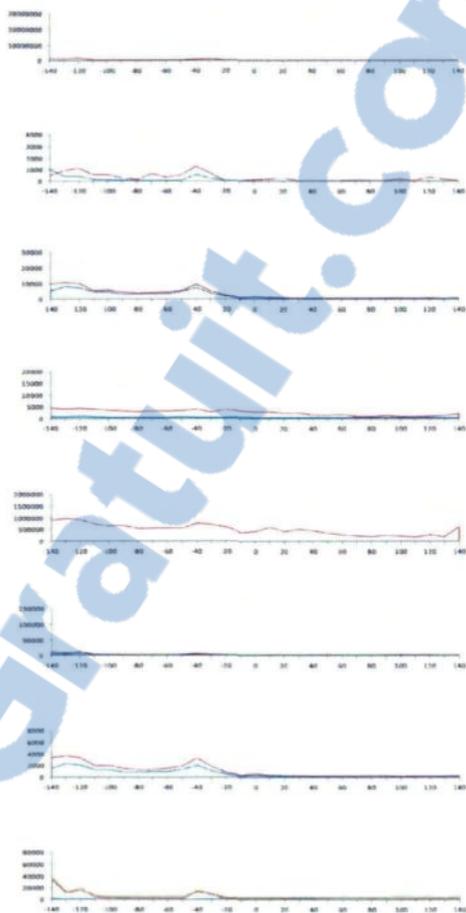
Stations (m), du nord vers le sud

Transect indice Chambois



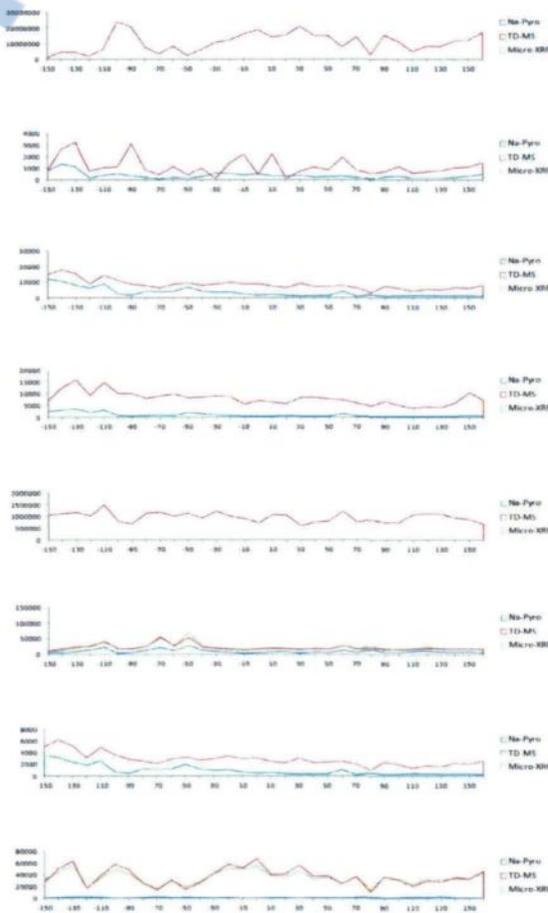
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



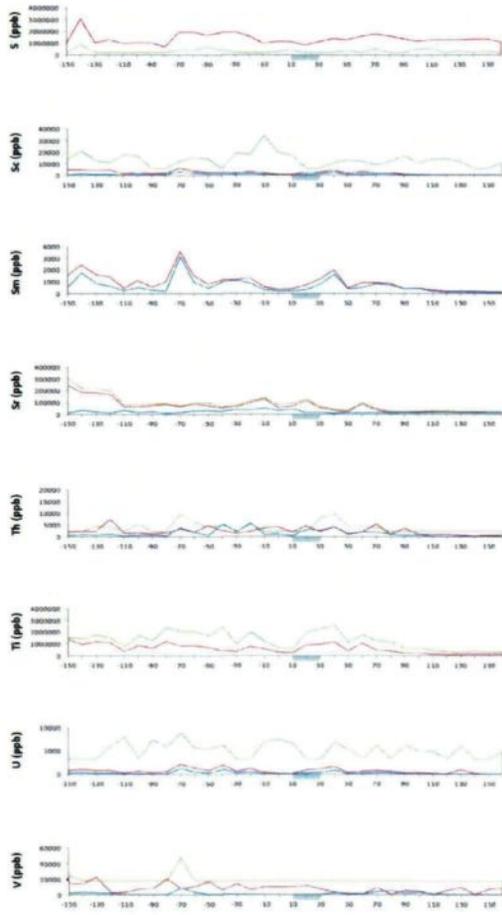
Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



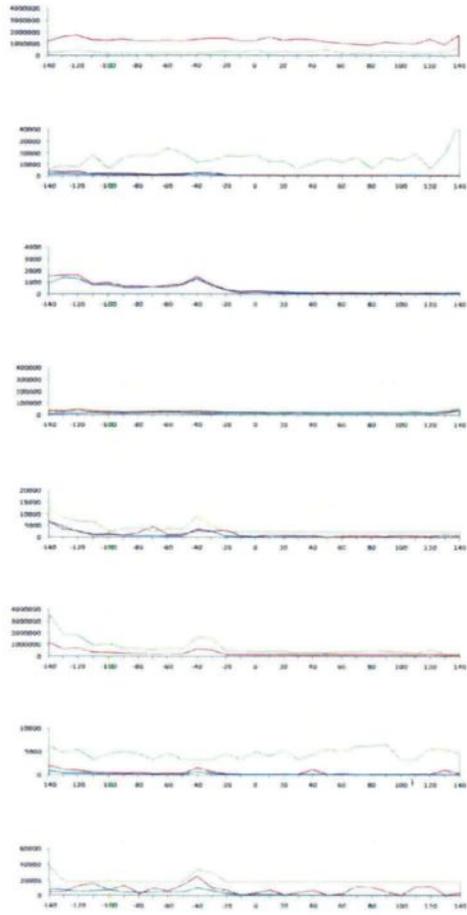
Stations (m), du nord vers le sud

Transect indice Chambois



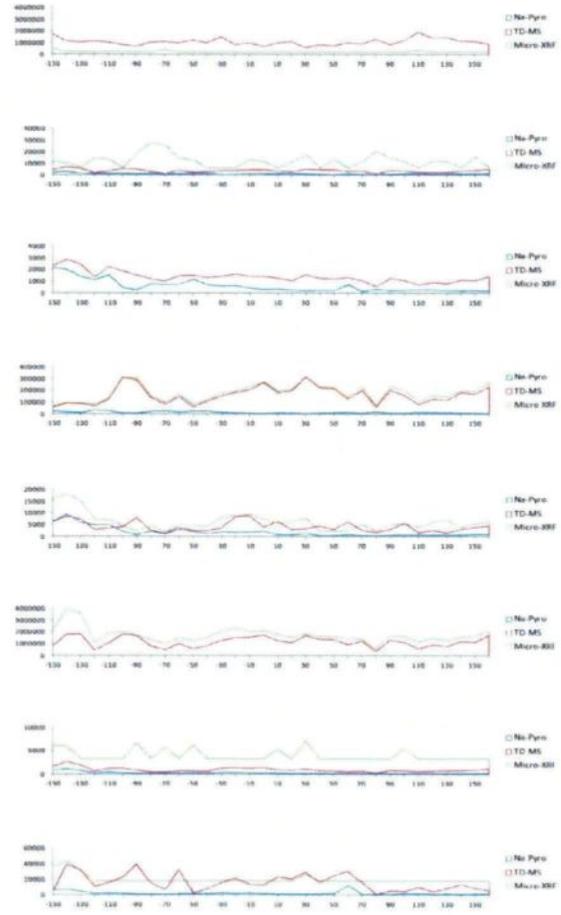
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



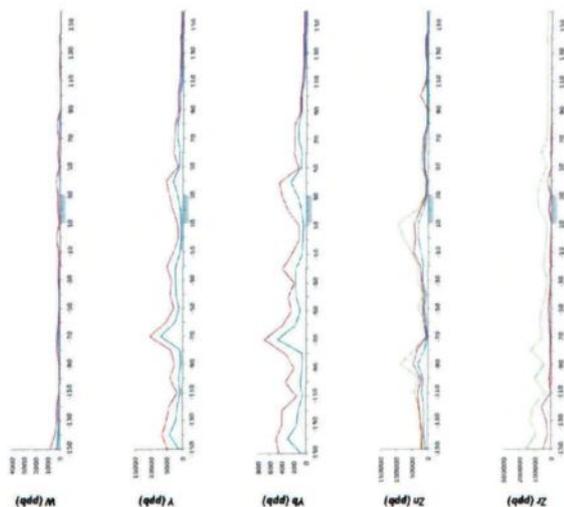
Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



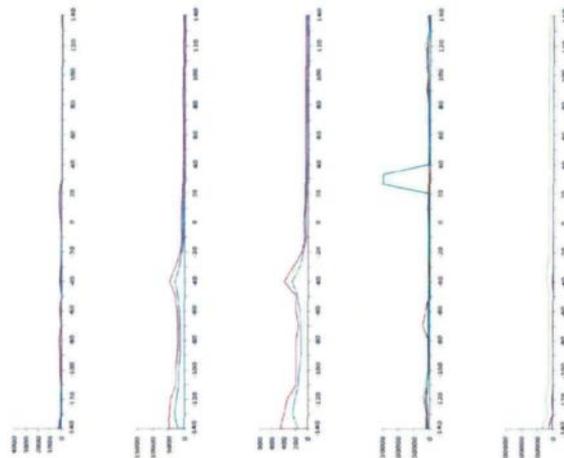
Stations (m), du nord vers le sud

Transect indice Chambois



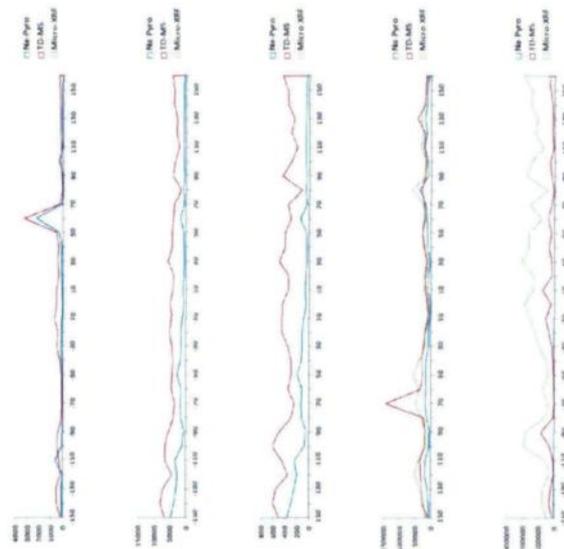
Stations (m), du nord vers le sud

Transect ligne électrique



Stations (m), du nord vers le sud

Transect témoin



Stations (m), du nord vers le sud