UNIVERSITE DE MONTREAL

SENSIBILITE AUX PRECIPITATIONS ACIDES DES SEDIMENTS D'ORIGINE GLACIAIRE AU NORD DU MANITOBA

par

Josée Samson

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION

DU GRADE DE MAITRE ES SCIENCES APPLIQUEES (M.Sc.A.)

Mai 1989

c Josée Samson 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

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

ISBN 0-315-52711-0

Canada

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

SENSIBILITE AUX PRECIPITATIONS ACIDES DES SEDIMENTS D'ORIGINE GLACIAIRE AU NORD DU MANITOBA

présenté par Josée Samson

en vue de l'obtention du grade de

maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

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

M. Raymond Desjardins, ing., M.Ing., président

M. Claude E. Delisle, Ph.D.

Mme Christine A. Kaszycki, Ph.D.

A mon ami et
mes parents...

SOMMAIRE

Dans le nord du Manitoba, la dispersion glaciaire de carbonates d'âge paléozoïque s'est étendue vers l'ouest à partir de la Baie d'Hudson, sur 200 km, à travers le Bouclier canadien. Les débris carbonatés exotiques et la couverture d'argile du lac post-glaciaire Agassiz ont influencé la sensibilité du Bouclier aux précipitations acides dans cette région. Nous avons recueilli des échantillons de till dans l'horizon C sur un transect de 100 km, parallèle à l'écoulement glaciaire, où la teneur en carbonates dans la matrice s'échelonne entre 30% (NE) et 0% (SO). Nous avons aussi réalisé un échantillonnage dans des profils de divers types de séquences sédimentaires et pédologiques, en vue d'évaluer la variabilité in situ et l'influence du couvert d'argile sur la capacité de neutralisation acide (CNA) des sédiments. La méthode de Wyatt (1984) fut utilisée pour déterminer les CNA des sédiments. Les sédiments non calcareux et sableux sont sensibles à l'acidification et libèrent en solution des métaux lourds. Les sédiments calcareux et de granulométrie fine neutralisent bien l'acide. Cependant, l'argile déposée sur le till peut affecter négativement ses propriétés hydrologiques et empêcher la neutralisation. Trois mécanismes de neutralisation furent identifiés. La dissolution des carbonates est un des plus importants. Il est généralement efficace à un pH alcalin. La CEC est le

second mécanisme. Il dépend de la texture du sédiment et est très efficace à un pH supérieur à 5,5. Finalement, la mobilisation de l'aluminium constitue le troisième mécanisme et est fonctionnel à un pH inférieur à 5,5. La chute du pH est freinée par la libération de grandes quantités d'ions aluminium. Cette neutralisation peut engendrer des problèmes de contamination de l'eau de surface et du milieu.

ABSTRACT

Glacial dispersal of Paleozoic carbonate in northern Manitoba, Canada, extends westward from Hudson Bay, 200 km across Precambrian shield terrane. Exotic carbonate debris, coupled with extensive Lake Agassiz clay cover has influenced the sensitivity of shield terrane in the area to acid precipitation. The bedrock covered by the glacial drift can be converted from a potentially poorly buffered terrain to a well buffered terrain. C-horizon till samples were collected along a 100 km transect parallel to ice flow, where matrix carbonate content varies from more than 30% (NE) to 0% (SW). Profile sampling was also carried out within various types of sediment/soil sequences to assess in situ variability and the influence of clay cover on buffering capacity in calcareous and noncalcareous systems. The Wyatt method (1984) was used to determine the acid neutralizing capacity (ANC). In general, coarse-grained noncalcareous sediment is sensitive to acidification and release of heavy metals. Calcareous sediment and fine-grained Lake Agassiz clay buffer acidification. Acid sensitivity in this area therefore, is controlled by carbonate content and texture. The clay cover could prevent the infiltration of rain in the soil and harm neutralisation. The sediments analysed encompass a broad range of grain size and carbonate content characteristics, and provide an opportunity to evaluate three distinct

buffering systems on acidification and cation release. The carbonate buffering system is effective at pH 7.5 and dominates acid neutralization in sediment containing carbonate concentration more than 0 %. The cation exchange buffering process is texturally controlled but is most significant for clayey sediment over the pH range 5.5 to 7.5. The aluminum buffering process is most effective at pH 4.5 and is independant of texture. It is accompanied by large releases of aluminum which may be toxic to many plants and animal species.

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord adresser mes remerciements à Dr. Christine A. Kaszycki, qui m'a proposé un projet de maîtrise et m'a supervisé dans mon travail de terrain. De plus, elle m'a fourni de judicieux conseils lors de ma recherche. Grâce à Mme Kaszycki, j'ai obtenu du laboratoire de la Commission Géologique du Canada les contenus en carbonates et la granulométrie de mes échantillons.

Je désire aussi remercier mon directeur de maîtrise , Dr. Claude E. Delisle pour avoir orienté ma recherche sur la sensibilité des sols aux précipitations acides et pour m'avoir fourni des fonds nécéssaires pour certaines analyses. Mon co-directeur, Dr. Michel Bouchard mérite également des remerciements pour ses pertinentes remarques pendant la rédaction de ce mémoire.

Je ne peux passer sous silence M. Denis Bouchard et M. Marcel Dugal, du laboratoire d'environnement, pour leur aide et pour avoir effectué les analyses d'adsorption atomique ainsi que M. Christian Dallaire du laboratoire de géochimie de l'Ecole Polytechnique.

Je veux remercier tous ceux qui m'ont aidé que ce soit sur le terrain ou lors de la rédaction de ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

Page

SOMMAIRE.....v

ABSTRACT.....vii

REMERCIEMENTS.....ix

LISTE DES TABLEAUX.....xiv

LISTE DES FIGURES.....xv

LISTE DES SYMBOLES.....xviii

LISTE DES ANNEXES.....xix

CHAPITRE 1- INTRODUCTION.....1

1.1 But et objectifs.....1

1.2 Localisation et échantillonnage.....2

1.3 Contexte géologique.....6

1.3.1 Roche de fond.....6

1.3.2 Dépôts meubles.....9

1.4 Sources de précipitations acides et leur pH.....12

CHAPITRE 2- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Définition du concept de sensibilité.....23

2.2 Importance du phénomène glaciaire.....24

2.3 Acidification naturelle et anthropogénique.....25

2.4 Facteurs influencant la neutralisation.....28

2.5 Effets des précipitations acides sur le sol.....36

2.6 Effets des précipitations acides sur la flore et la faune.....37

CHAPITRE 3- METHODOLOGIE

3.1 Protocole.....39

3.2 Principes de la CNA.....40

3.3 Détermination du contenu en carbonates des sédiments.....43

3.4 Détermination de la granulométrie.....43

3.5 Analyse des ions libérés après acidification.....44

CHAPITRE 4- RESULTATS

4.1 Localisation et nature des échantillons.....45

4.1.1 Le long du transect.....45

4.1.2 Dans les profils.....45

4.2 Les résultats de la CNA.....50

4.2.1 CNA selon la granulométrie.....51

4.2.1.1 CNA des tills non calcareux.....51

4.2.1.2 CNA des tills légèrement calcareux.....53

4.2.1.3 CNA des tills très calcareux.....54

4.2.2 CNA selon le pourcentage de $CaCO_3$.....54

4.2.2.1 CNA des tills sableux en fonction du % $CaCO_3$.....56

4.2.2.2 CNA des tills silteux en fonction du % $CaCO_3$.....57

4.2.2.3 CNA des tills argileux en fonction du % $CaCO_3$.....57

4.3 CNA des profils.....59

4.1 CNA des profils ayant subi un lessivage.....60

4.3.1.1 Coupe du Lac Hall.....60

4.3.1.2 Coupe Eden Lake.....62

4.3.1.3 Coupe de One Island Lake.....64

4.3.1.4 Coupe 0192.....64

4.3.2 CNA des profils sans lessivage recouvert ou d'argile.....67

4.3.2.1 Coupe de Hughes River.....67

4.3.2.2 Coupe de Notigi.....67

4.3.2.3 Coupe de Wheatcroft Lake.....70

4.3.2.4 Coupes de South Seal.....72

4.3.2.4.1 South Seal I.....72

4.3.2.4.1 South Seal II.....72

4.3.2.5 Coupe 0199.....75

4.3.3 Profil non calcareux.....75

4.3.3.1 Coupe Cartwright.....75

4.4 Ions relargués après l'acidification.....78

4.4.1 Calcium et magnésium.....78

4.4.2 Potassium.....80

4.4.3 Aluminium.....80
4.4.4 Influence de la texture.....82
4.4.5 Influence des horizons.....84

CHAPITRE 5- DISCUSSION

5.1 Les relations entre les processus de neutralisation et la granulométrie des sédiments.....86
5.2 Les relations entre les processus de neutralisation et les ions libérés.....88
5.3 Les processus de neutralisation selon les profils....94
5.4 Comparaison des CNA des profils de la région.....96
5.5 Corrélations multiples.....98
5.6 Comparaison des CNA moyennes avec d'autres régions...100
5.7 Evaluation de la méthode.....102

CONCLUSION.....106
BIBLIOGRAPHIE.....108
ANNEXES.....115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau — Page

1. Analyse de la pluie du réseau de collecte pour les années 1980-1987.....22
2. CEC des différents constituants du sol.....31
3. Localisation et description des échantillons du transect.....47
4. Localisation des profils.....48
5. Description des échantillons dans les profils.....49
6. Variations du pH après l'ajout de 0,1 mL H_2SO_4.....87
7. Matrice de corrélation.....99
8. Echelle de sensibilité des profils en fonction de leur CNA exprimée selon le pH final à une CNA standard de 4,0 meq/100g de sédiments.....101

LISTE DES FIGURES

Figure — Page

1. Localisation de la région à l'étude.....3

2. Localisation des profils et du transect.....5

3. Carte géologique du Manitoba.....7

4. Géologie de la région à l'étude.....8

5. Carte des mouvements glaciaires.....10

6. Source des carbonates du Protérozoïque.....11

7. Carte de la phase finale du lac Agassiz.....13

8. Emissions de SO_2 au Manitoba.....15

9. Emissions de NO_x au Manitoba.....15

10. Directions des vents dominants à Fort McMurray.....17

    a)au sol

    b) 850 mb de pression

11. Carte du réseau de collecte de précipitations au Manitoba.....18

12. Roses des vents des stations

    a)Norway House.....20
    b)Island Lake.....20
    c)Brochet.....21
    d)Gillam.....21

13. Profil d'un podzol typique.....30

14. Exemple de courbe de CNA pour l'échantillon 3069....41

15. Localisation des échantillons le long du transect...46

16. Courbes de CNA de tills non calcareux.....52

17. Courbes de CNA de tills légèrement calcareux.....52
18. Courbes de CNA de tills très calcareux.....55
19. Courbes de CNA de tills sableux versus différents % $CaCO_3$.....55
20. Courbes de CNA de tills silteux versus différents % $CaCO_3$.....58
21. Courbes de CNA de tills argileux versus différents % $CaCO_3$.....58
22. Courbes de CNA du profil 1.....61
23. Localisation des échantillons dans le profil 1.....61
24. Localisation des échantillons dans le profil 5.....63
25. Courbes de CNA du profil 5.....63
26. Courbes de CNA du profil 6.....65
27. Localisation de échantillons dans le profil 6.....65
28. Courbes de CNA du profil 10.....66
29. Localisation de échantillons dans le profil 10.....66
30. Courbes de CNA du profil 2.....68
31. Localisation de échantillons dans le profil 2.....68
32. Courbes de CNA du profil 3.....69
33. Localisation de échantillons dans le profil 3.....69
34. Courbes de CNA du profil 7.....71
35. Localisation de échantillons dans le profil 7.....71
36. Courbes de CNA du profil 8.....73
37. Localisation de échantillons dans le profil 8.....73
38. Courbes de CNA du profil 11.....74
39. Localisation de échantillons dans le profil 11.....74

40. Courbes de CNA du profil 9.....76
41. Localisation de échantillons dans le profil 9.....76
42. Courbes de CNA du profil 4.....77
43. Localisation de échantillons dans le profil 4.....77
44. Concentration d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % $CaCO_3$.....79
45. Concentration d'ions Al libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % $CaCO_3$.....79
46. Concentration d'ions Al libérés en fonction d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4.....81
47. Concentration d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % de silt et d'argile...81
48. Concentration d'ions Al libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % de silt et d'argile...83
49. Variations du pH (0 mL et 1,5 mL H_2SO_4) en fonction du pH initial pour les tills sableux.....90
50. Variations du pH (0 mL et 1,5 mL H_2SO_4) en fonction du pH initial pour les tills siteux et argileux.....92
51. a) Courbes moyennes des CNA des profils 1 à 6.....97
b) Courbes moyennes des CNA des profils 7 à 11.....97
52. Echelle comparative de la sensibilité des sites des régions du nord du Manitoba, du lac Kempt, du lac Mégantic, d'Ungava, de l'Ontario, de Mistassini et de Thetford Mines exprimée selon le pH final en fonction d'une CNA standard de 4,0 meq/100 g de sédiments.....103

LISTE DE SYMBOLES

Symbole

A	horizon du sol enrichi en matière organique
B	horizon illuvié du sol
C	horizon qui contient le sédiment non altéré dérivé de la roche mère
CEC	Capacité d'échange cationique
CNA	Capacité de neutralisation acide
g	gramme
LHF	Horizon organique du sol dévellopé principalement de l'accumulation de feuilles et de brindilles.
m	mètre
meq	milliéquivalent
mL	millilitre
mm	millimètre
ΔpH	variation de pH
SB	saturation en bases
uL	microlitre
um	micron
UTM	Universel transverse mercator grid

LISTES DES ANNEXES

Annexe page

A: Conversion de mg/L en kg/ha/an (SO_4).....115

B: Résultats détaillés du calcul de CNA.....117

C: Diagrammes ternaires.....125

D: Résultats détaillés de la granulométrie et du contenu en $CaCO_3$ des échantillons.....128

E: Résultats détaillés de la libération de substances après l'acidification.....131

F: Diagrammes montrant la libération d'ions en fonction deshorizons des profils.....139

Chapitre 1- INTRODUCTION

1.1 But et objectifs

Une préoccupation croissante des canadiens concernant la pollution de leur environnement caractérise cette décennie. Des sondages révèlent que les sujets tels que les précipitations acides, les produits chimiques toxiques, la diminution de la couche d'ozone, l'effet de serre sont en tête de liste de leurs inquiétudes.

Le terme "précipitation acide" englobe la pluie, la grêle, la neige et le brouillard. Au Canada, il est estimé que les deux tiers des précipitations acides sont causés par les émissions de dioxyde de soufre (SO_2) et le tiers restant par les oxydes d'azote (NO_x) (Shewchuk, 1982). Dues aux vents dominants, environ 50% des précipitations acides ont leur source aux Etats-Unis.

Parmi les polluants atmosphériques au Canada, les oxydes de soufre et d'azote sont principalement émis par les fonderies de métaux non-ferreux, les centrales thermiques, les industries utilisant un combustible fossile ainsi que les automobiles. Ces contaminants gazeux transportés sur de longue distance atteignent le sol par l'entremise des précipitations qui deviennent alors acides. Ce phénomène est largement répandu en Amérique du Nord et très étudié depuis une décennie. Différents domaines de la science s'y intéressent que ce soit pour constater ces effets ou pour tenter de prédire la réaction d'un milieu face à une

acidification. Cette étude a pour but de déterminer la sensibilité aux précipitations acides de sédiments d'origine glaciaire recueillis au Nord du Manitoba. Afin de déterminer la capacité de neutralisation acide (CNA) des sédiments , la méthode de Wyatt (1984) fut utilisée. L'acidification d'échantillons de diverses textures et de contenus en carbonates variés ainsi que la mesure des ions libérés en solution après l'acidification permettent l'étude des mécanismes de neutralisation.

1.2 Localisation et échantillonnage.

La région étudiée au Manitoba est située entre la latitude 55° et 58° et entre la longitude 98° (Thompson) et 101° (Lynn Lake) soit les cartes (échelle 1:250000) NTS 64B, NTS 64C , NTS 64G et NTS 630 (figure 1). Dans le centre-nord du Manitoba, la topographie réflète la structure géologique du Précambrien. Le relief rencontré varie (Klassen, 1976) entre 3,0 m à 7,6 m, rarement jusqu'à 23 m. Le pergélisol se trouve à quelques centimètres sous les tourbières et à une plus grande profondeur sous les versants boisés. Cependant, il est absent des régions sableuses et graveleuses bien drainées et couvertes de till (Klassen, 1976). La forêt boréale recouvrant cette partie du Manitoba, est constituée majoritairement d'épinettes noires et de pins. Son sol est recouvert de lichens dont Cladina stellaris. Dans les endroits bien drainés, la forêt

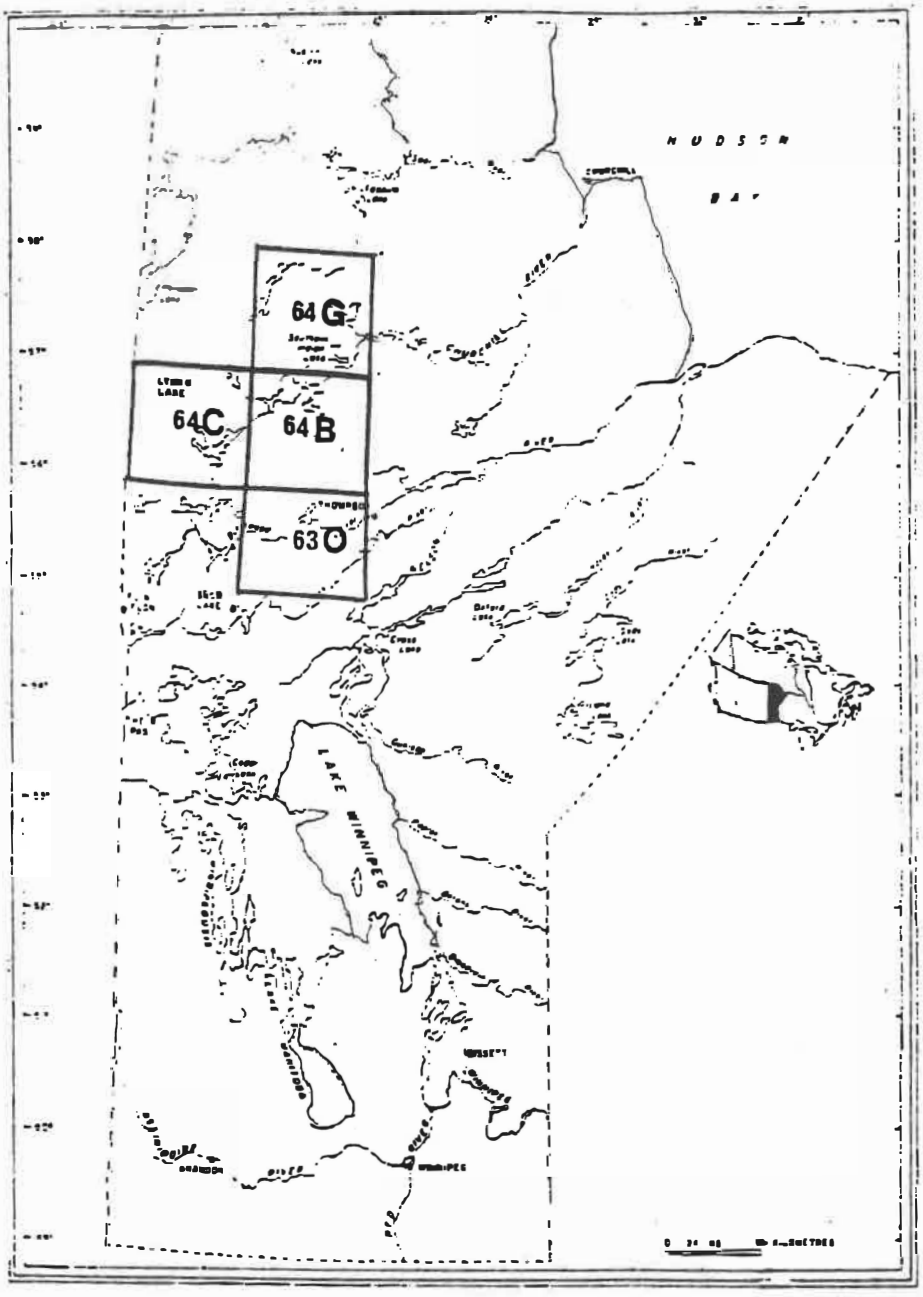


Figure 1. Localisation de la région à l'étude.
Tiré et adapté de Richardson et Ostry (1987)

mixte contient des peupliers, des bouleaux, des trembles et des sapins (Klassen, 1976). La végétation est caractérisée par le développement de tourbières et de marais dans les dépressions du socle rocheux.

Onze coupes stratigraphiques (figure 2) furent dégagées manuellement ou à l'aide d'une pelle hydraulique. Ces sites furent sélectionnés pour leurs sols de différentes composition et origine. Les trois types de profils sont:

a)profil non calcareux (no 4)

b)profil ayant subi un lessivage en $CaCO_3$ (no 1, no 5, no 6, no 10)

c)profil sans lessivage recouvert ou non d'argile (no 2, no 3, no 7, no 8, no 9, no 11)

Dans ces coupes, les échantillons furent pris systématiquement à tous les 20 cm. Cependant, seulement deux à sept échantillons par coupe, soit les plus représentatifs des horizons, furent utilisés pour cette étude.

Egalement, afin de bien comprendre l'importance du contenu en carbonates dans le pouvoir neutralisant du sol, une collecte d'échantillons fut effectuée le long d'un transect où le contenu en $CaCO_3$ dans la matrice des sédiments s'échelonne selon un gradient de 0% à 35% (Kaszycki et Dilabio, 1986) (figure 2). Le sol fut échantillonné dans l'horizon C, en moyenne à 45 cm de la surface. Le diamicton recueilli est de couleur olive à gris pâle à texture sableuse à silteuse. La collecte des

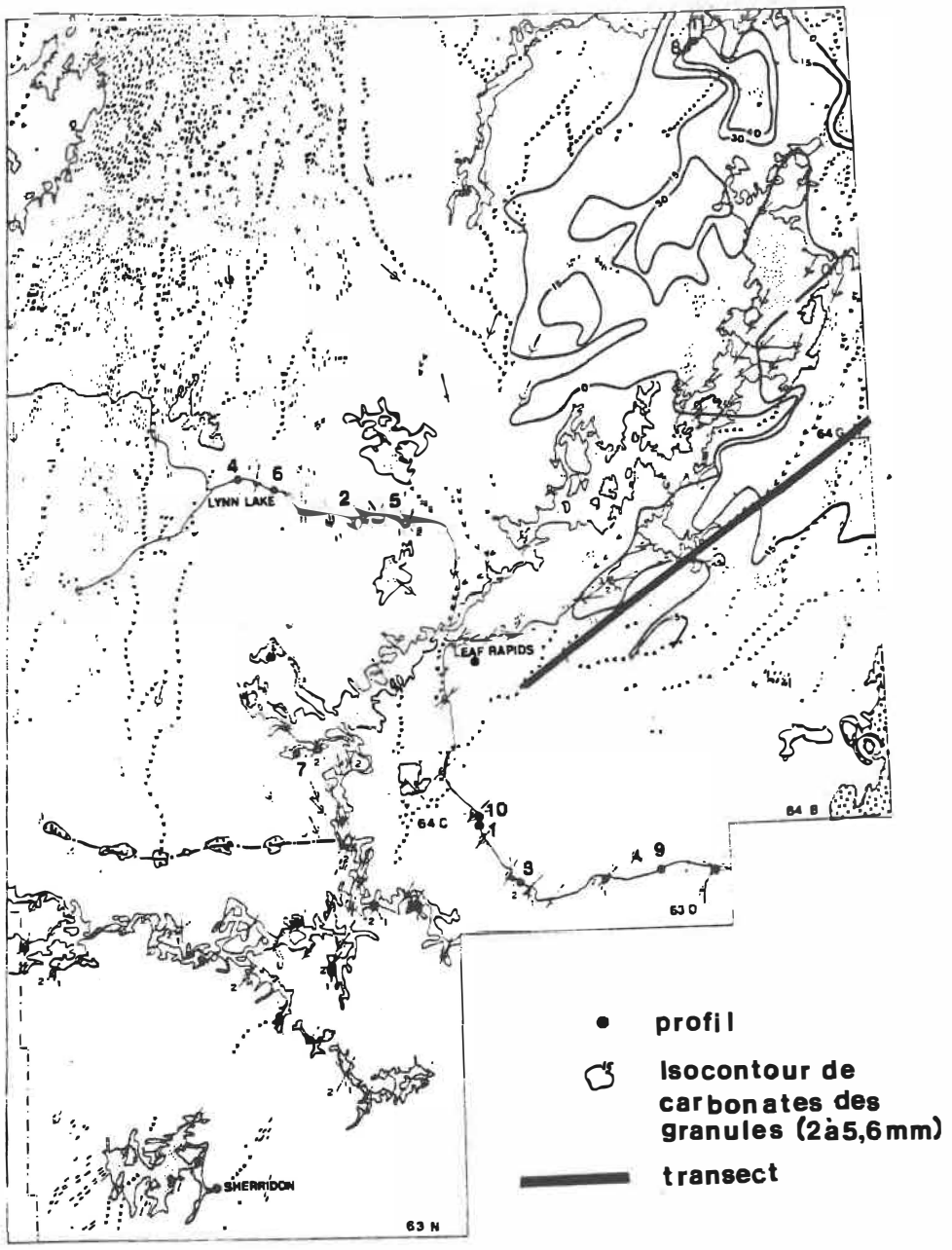


Figure 2. Localisation des profils et du transect. Tiré et adapté de Kaszycki (1989)

échantillons fut effectuée en général sur les pentes sud-est des collines ou le long des rivages des lacs et des rivières.

1.3 Contexte géologique

1.3.1 Roche de fond

Dans la province du Manitoba, les trois grandes divisions géologiques sont le Bouclier canadien, les basses-terres de la Baie D'Hudson (N-E) et celles de Williston (S-O) (figure 3). Les basses-terres de l'Hudson contiennent des roches sédimentaires telles des calcaires, des dolomites, des shales, du gypse par endroit ainsi que des grès. La division de Williston comprend également des roches sédimentaires ainsi que des shales bentonitiques et kaolinitiques. Quant au Bouclier, il se divise en provinces du Supérieur et de Churchill ainsi que la zone de transition entre les deux provinces (Richardson et Ostry, 1987). La région étudiée dans la province de Churchill se compose des ceintures sédimentaires gneissiques de Kisseynew et de Southern Indian et des ceintures vertes de Lynn Lake et de Leaf Rapids (figure 4) Des roches volcaniques et volcano-sédimentaires caractérisent les deux ceintures vertes. Les ceintures gneissiques se composent de paragneiss, de migmatites, de granitoïdes anatectiques et de quelques roches volcaniques.

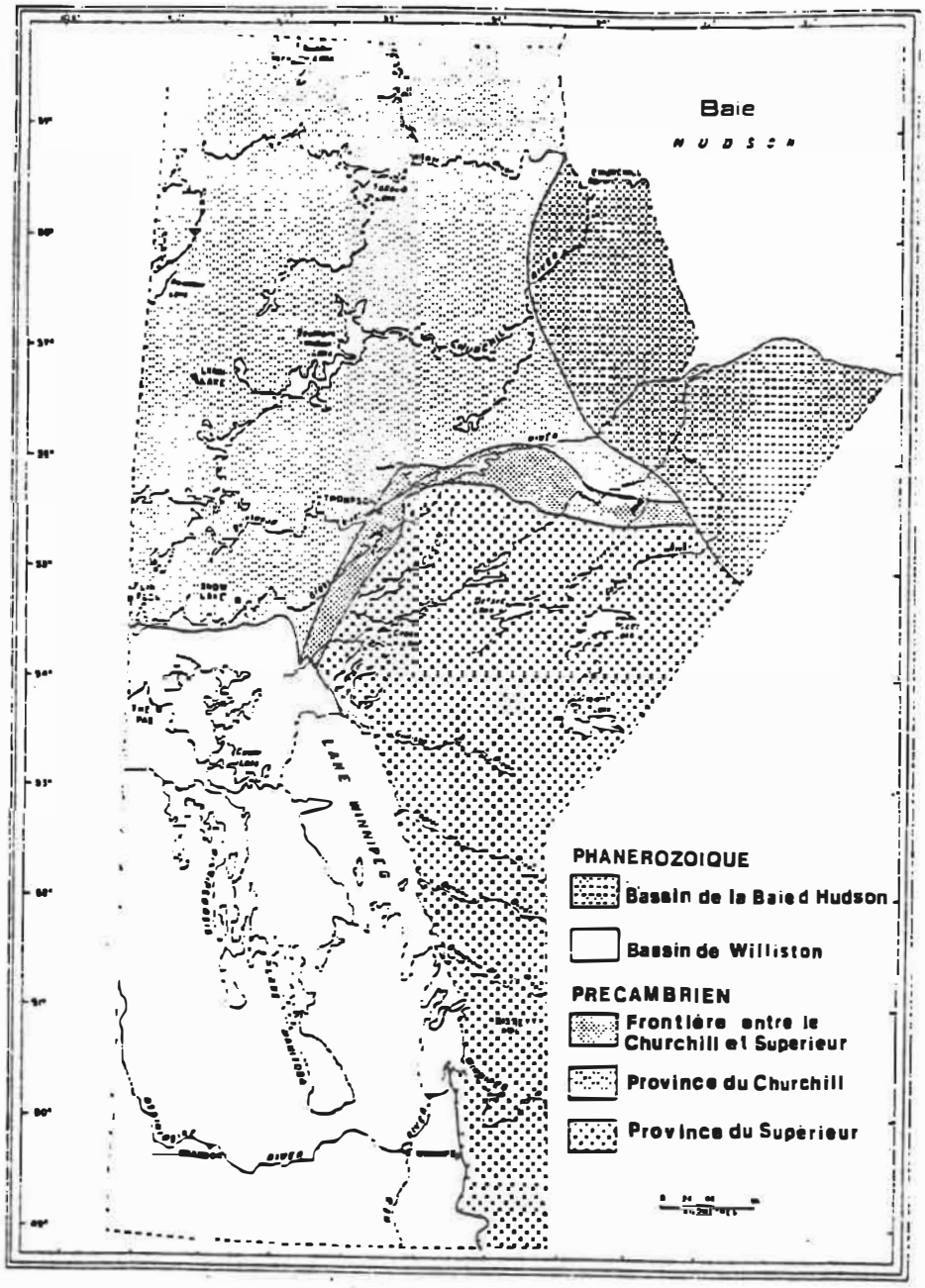


Figure 3. Carte géologique du Manitoba.
Tiré de Richardson et Ostry (1987)

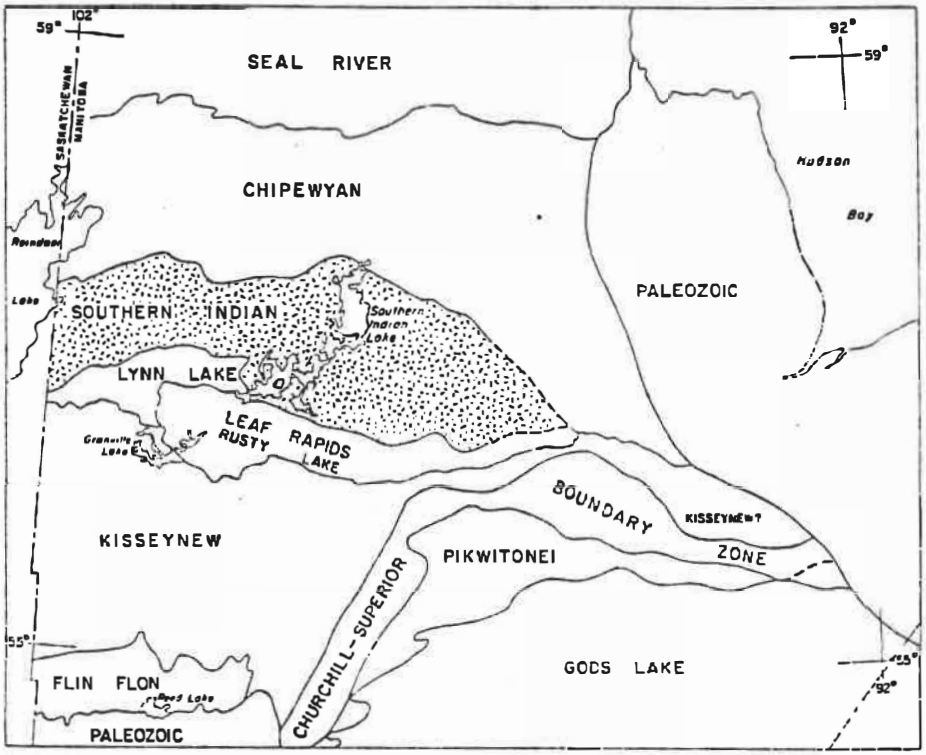
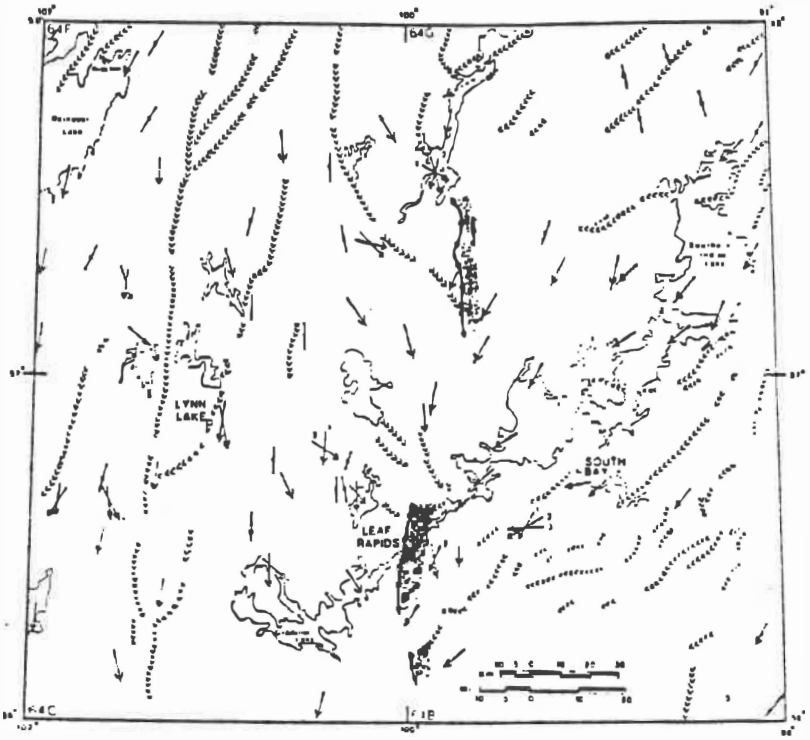


Figure 4. Géologie de la région à l'étude. Tiré de Richardson et Ostry (1987)

1.3.2 Dépôts meubles

Des dépôts dont l'épaisseur moyenne varie de quelques centimètres à six mètres laissés par les glaciers du Pleistocène recouvrent le Manitoba. Le till de texture sableuse à silteuse, présent dans cette région, a deux sources possibles: le lobe du Keewatin (N-O) et le lobe d'Hudson provenant du Nouveau-Québec (Kaszycki et Dilabio, 1986). Ceux-ci convergent dans la région de Leaf Rapids où s'est développée la moraine interlobaire du même nom. Les stries révèlent que l'écoulement glaciaire général du Keewatin était de 190°-210° et que l'Hudson s'écoulait à 225°-260° (figure 5) (Kaszycki et Dilabio, 1986). La composition clastique des deux tills réflète étroitement leur provenance. Celui du Keewatin est riche en roches cristallines du Bouclier tandis que celui de l'Hudson contient des carbonates des basses-terres de la Baie d'Hudson et des greywackes du Protéozoïque (affleurant au S-E de la Baie) en plus des cristallines (figure 6) (Kaszycki et Dilabio, 1986). La minéralogie de la fraction granulométrique inférieure à 63 um des deux tills illustre aussi leur origine. Le till provenant du lobe de l'Hudson semble contenir selon Kaszycki, de la vermiculite, de l'illite et un peu de chlorite et/ou kaolinite et des minéraux carbonatés. Celui du Keewatin semble contenir également de l'illite-muscovite, de la chlorite et/ou kaolinite dérivé du Précambrien. Un gradient de carbonates



Stries
Flute
Queue de rat

Esker
Moraine interlobaire
Limite Ouest de la dispersion des carbonates dans le till (approx.)

Figure 5. Carte des mouvements glaciaires.
Tiré de Kaszycki et Dilabio (1986)

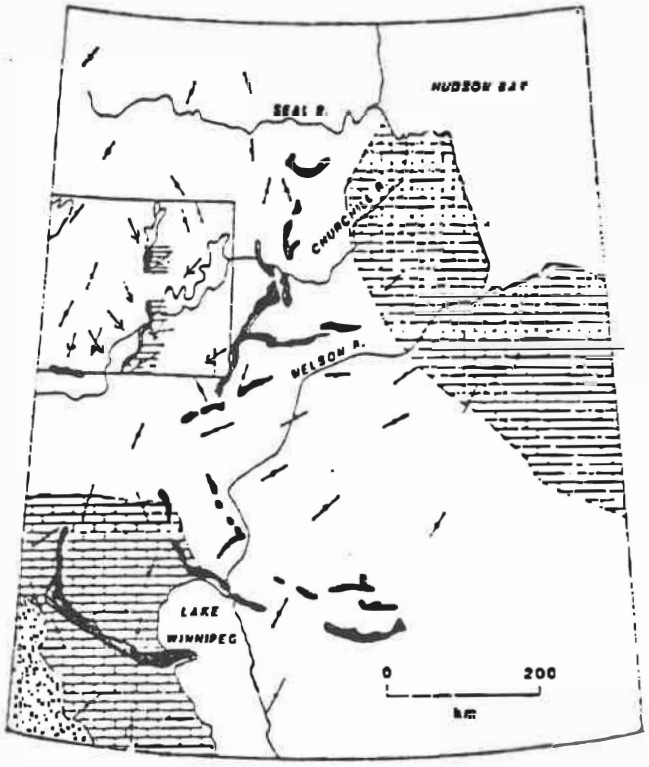


Figure 6. Source des carbonates du Protérozoïque. Tiré de Kaszycki et Dilabio (1986)

contenus dans les granules et dans la fraction granulométrique inférieure à 2 um du till fut établi par Kaszycki. Celui-ci montre une forte concentration en $CaCO_3$ au nord-est de 35% comparativement à 0% au sud-est (figure 2). Un transport glacaire sur une distance de plus de 200 km fut nécéssaire pour retrouver ces débris de calcaires exotiques dans le diamicton.

Ce dernier est par endroit recouvert de silt et d'argile laissés par le lac Agassiz lors de la dernière déglaciation. L'épaisseur de ces dépôts varvés ou non varie en général de quelques centimètres à 3 m et quelques fois jusqu'à 5 m (Klassen, 1986). Le lac Agassiz fut le plus grand lac post-glaciaire du Canada et il a recouvert presque tout le Manitoba. Le lac a fluctué selon les avancées glaciaires, la figure 7 illustre son étendue de lors de la phase finale de son histoire. L'argile du lac Agassiz possède une minéralogie différente des tills sous-jacents; elle est composé de smectite-muscovite, d'illite, de chlorite et/ou kaolinite et enfin de minéraux carbonatés (Kaszycki et Dilabio, 1986).

1.4 Sources des précipitations acides et leur pH

Des composés gazeux comme le bioxyde de soufre et les oxydes d'azote, reliés à l'activité humaine polluent l'atmosphère. L'anhydride sulfureux (SO_2) s'oxyde en SO_3 (trioxyde de soufre) au contact de l'atmosphère. Cette



Figure 7. Carte de la phase finale du lac Agassiz.
Tiré de Dredge et al. (1986)

réaction est catalysée par la présence de particules telles le fer et le manganèse (Bisson, 1986). Le trioxyde de soufre se combine ensuite avec l'humidité de l'air pour former de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

$$SO_3 + H_2O \rightleftharpoons H_2SO_4$$

Les molécules d'oxydes d'azote se comportent de la même manière et se transforment en acide nitrique (HNO_3).

Au Manitoba, de 1970-1980, les principales sources de SO_2 sont les fonderies de métaux non-ferreux (96%), la combustion des installations fixes (2%), le transport (1%) et les industries (figure 8) (Envir. Canada, 1986). La fonderie de Hudson Bay Mining & Smelting Company localisée à Flin Flon, produisait en 1986, 256000 t/an de SO_2 (Fenco Engineers, 1985). Afin de favoriser une bonne dispersion des émissions dans l'environnement, une cheminée haute de 251 m fut érigée en 1974 mais cette technologie n'est pas satisfaisante. Une diminution des contaminants de 25% devra s'effectuer d'ici 1994 afin d'atteindre les exigences de la province du Manitoba. La fonderie de cuivre et zinc de Inco Limitée à Thompson produisait 71683 tonnes de SO_2 de novembre 1984 à mars 1985 (McEachern et Phillips, 1987). En 1981, les émissions de Inco. pour une année complète se chiffraient à 154000 tonnes de SO_2. Les fonderies de métaux non-ferreux du Québec, de l'Ontario et du Manitoba produisent jusqu'à 50% du SO_2 au Canada (Envir. Manitoba, 1985). Quant aux émissions de NO_x (figure 9), 87% proviennent du

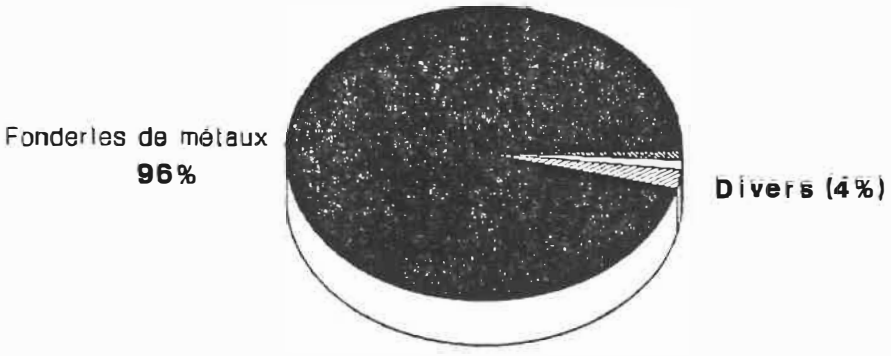


Figure 8. Emissions de SO_2 au Manitoba

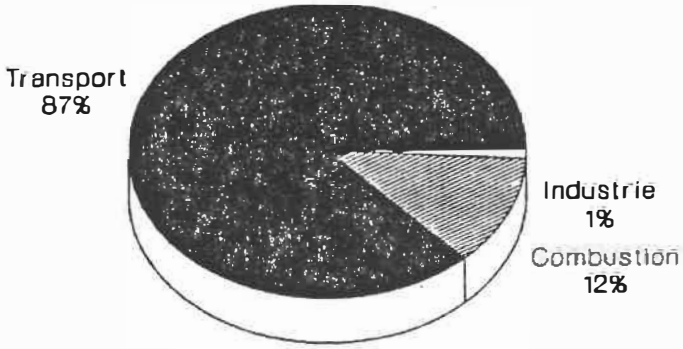
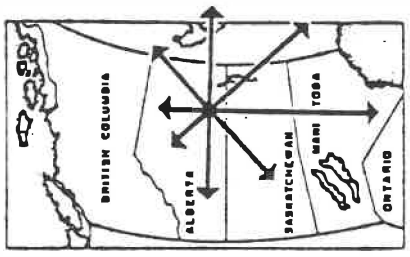


Figure 9. Emissions de NO_x au Manitoba

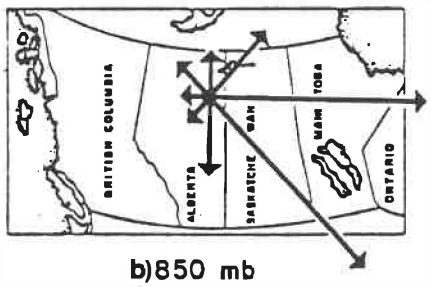
transport (les véhicules à moteur), 12% de la combustion des installations fixes (comme les centrales thermiques de Brandon et Selkirk) (Envir. Manitoba, 1985; Rae, 1985) et le reste des incinérateurs et des industries. D'autres activités, pratiquées dans cette région du Manitoba, comme l'extraction de minerais et de roche produisent des oxydes de soufre. De plus, des phénomènes naturels tels les incendies de fôrets émettent également des oxydes d'azote.

Le Manitoba reçoit aussi des polluants atmosphériques des autres provinces comme l'Alberta et la Saskatchewan. Le complexe de sable bitumineux localisé dans le nord de l'Alberta, à proximité de Fort McMurray, produit des NOx et du SO_2 de ces centrales thermiques. Les vents dominants vers l'est transportent ces émissions en Saskatchewan et au Manitoba (Sandhu et Blower, 1986) (figure 10).

Un réseau de collecte de précipitations au Manitoba fut développé afin d'obtenir de l'information sur celles-ci. Cinq collecteurs de précipitations furent implantés selon des critères évitant la contamination de sources avoisinantes (Rae, 1985). Les sites choisis sont à Norway House (54°00' N, 97°48'O), Island Lake (53°52'N, 94°40'O), à Brochet (47° 54'N, 101°41'O), à Gillam (56°21'N, 94°40'O) ainsi qu'à Pointe du Bois (50°18'N, 95°33'O)(figure 11). Une rose des vents pour chacune des stations exceptée pour Pointe du Bois permet d'évaluer les vents dominants du nord-ouest (Norway House, Island Lake, Brochet) et du nord-



a) SURFACE



b)850 mb

Figure 10. Directions des vents dominants à Fort McMurray

a) au sol

b) à 850 mb de pression

tiré de Sandhu et Blower (1986)

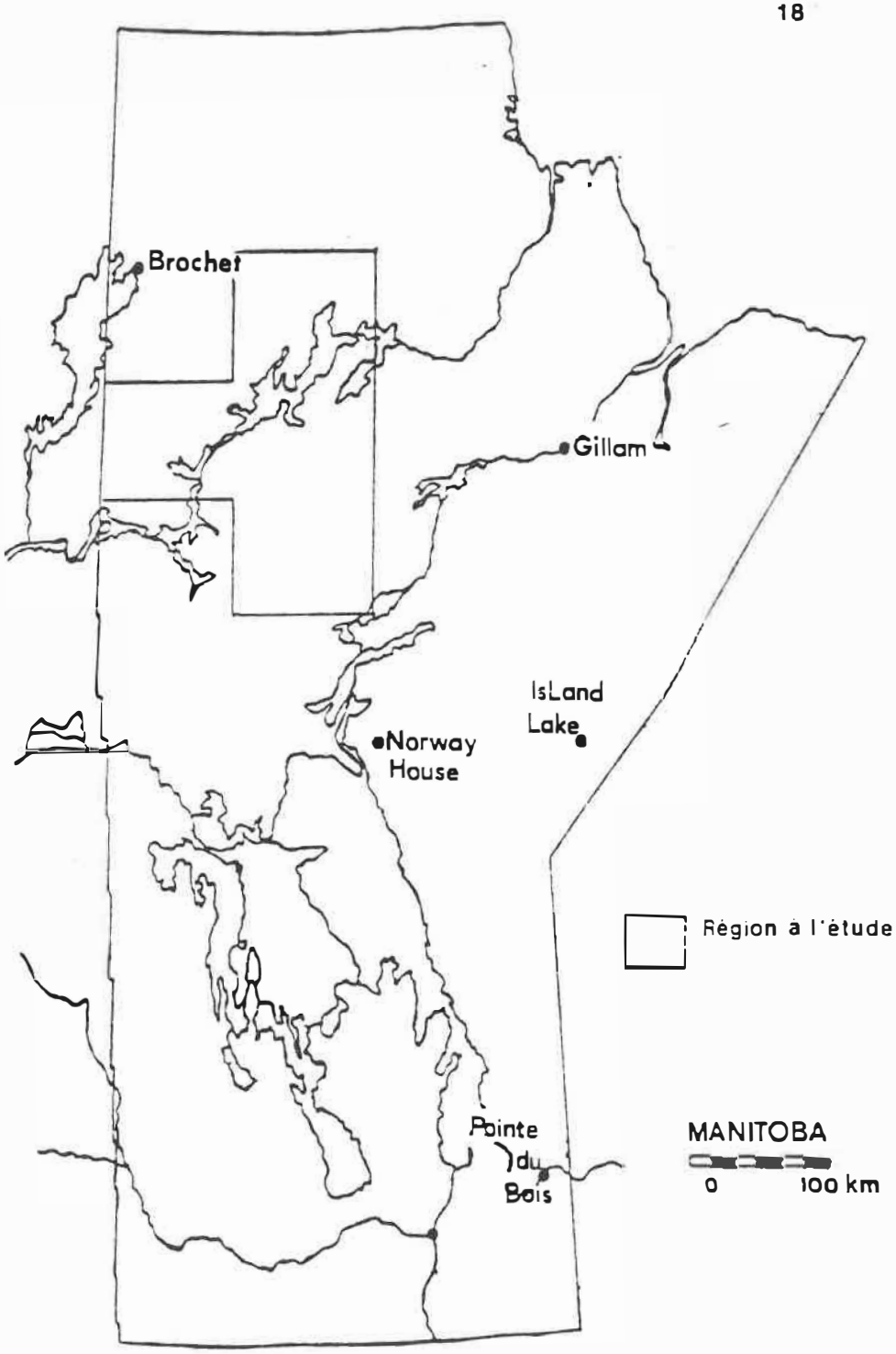


Figure 11. Carte du réseau de collecte de précipitations au Manitoba. Tiré de Bezak et Rae (1987)

est (Gillam). Cette compilation de fréquence des vents montrent que ceux dominants ne constituent qu'en moyenne 20 % de la direction totale des vents (figure 12). Ceux du sud, sud-ouest et du sud-est ont des fréquences non négligeables et cela permet le transport des polluants du sud de la province vers le nord. Le pH moyen des pluies pour les sites (incluant Winnipeg) pour l'année 1987 est de 5,21. Il est bien connu que le pH normal d'une pluie est de 5,6. Brochet, situé à proximité de la région à l'étude, possède le pH le moins élevé même s'il est localisé à contre vent des fonderies (tableau 1). La conversion de mg/L à kg/ha/an du tableau A est détaillée dans l'annexe A. Le dépôt massique de sulfate (SO_4) pour l'année 1987 au Manitoba est de 4,08 kg/ha/an, ce qui est peu comparativement aux Etats-Unis (1980: 11,9 $\pm$ 4,7 kg/ha/an) et à la Grande Bretagne (1980: 8 à 12 kg/ha/an) (Shewchuk, 1982). De même en 1985, une comparaison entre les dépôts massiques de sulfate de Brochet (2,83 kg/ha/an) et de la Forêt de Montmorency au Québec (29,1 kg/ha/an) suggère que les précipitations acides existent au Manitoba mais dans des conditions beaucoup moins alarmantes qu'au Québec.

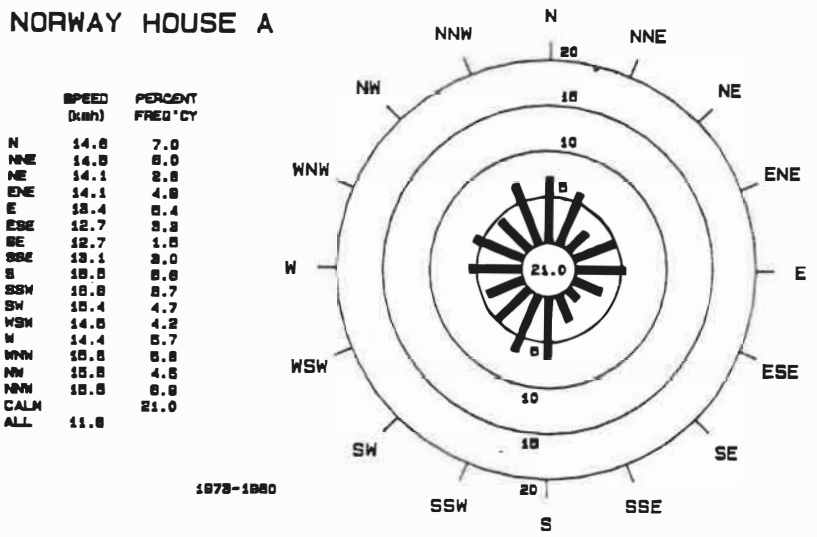


Figure 12. Rose des vents (tiré de Rae, 1985)

a)Norway House

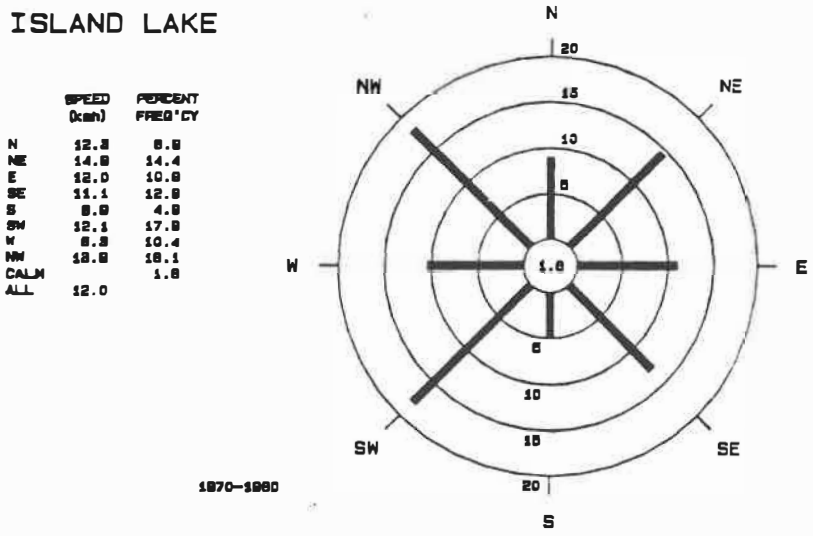


Figure 12. Rose des vents (Tiré de Rae, 1985)

b)Island Lake

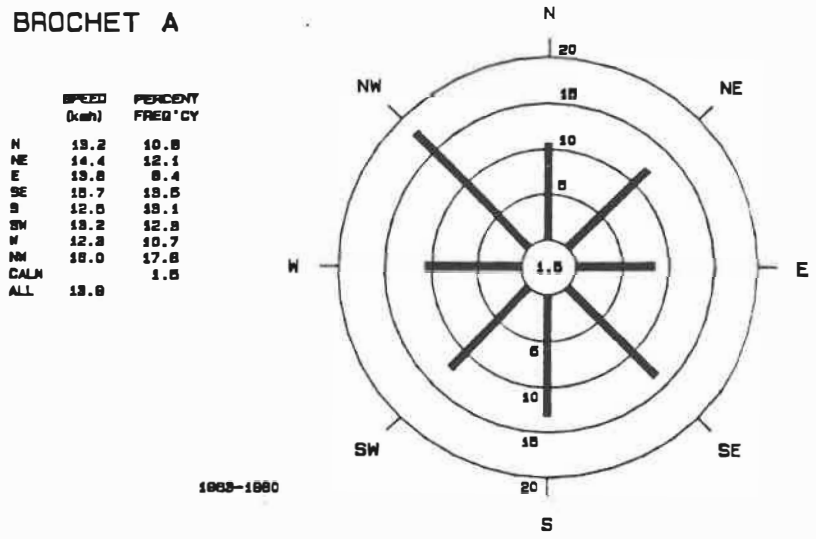


Figure 12. Rose des vents (tiré de Rae, 1985)

d)Gillam

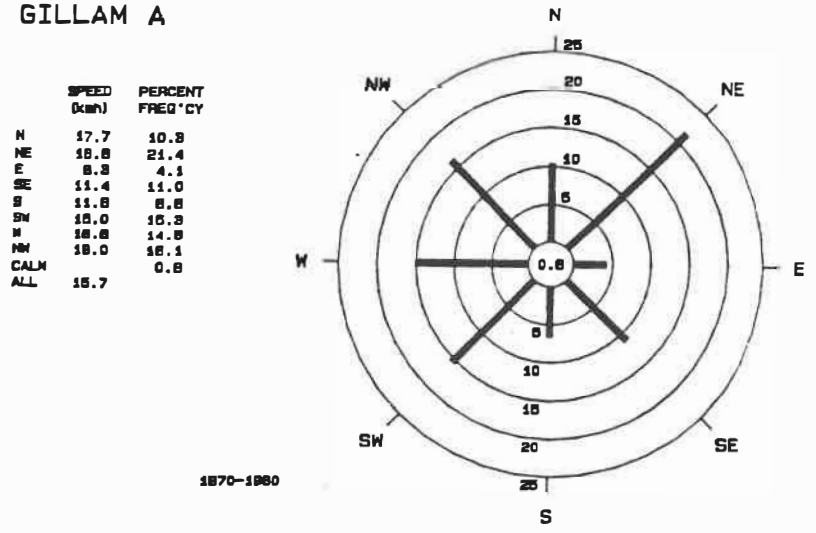


Figure 12. Rose des vents (Tiré de Rae, 1985)

c)Brochet

Tableau 1. Analyse des pluies du réseau de collecte pour les années 1980-1987

Annee	Localisation	pH min	pH max	pH moyen	SO4 mg/L	NO3 mg/L	SO4 kg/ha/an
1980	Island Lake	4.34	5.00	4.79	0.69	1.19	N/A
	Norway House	5.61	7.5	6.08	0.60	0.86	N/A
1981	Island Lake	3.92	6.73	4.47	1.61	0.68	7.63
	Norway House	3.40	7.28	4.64	1.65	1.01	9.45
1982	Island Lake	4.00	7.00	4.42	1.52	0.79	8.65
	Norway House	4.79	5.85	4.97	1.09	1.88	7.15
1983	Island Lake	4.09	6.58	5.06	1.27	0.81	7.66
	Norway House	4.61	6.13	5.16	1.29	1.29	8.18
1984	Island Lake	4.06	7.19	4.91	0.83	0.54	4.88
	Norway House	4.17	7.00	4.87	1.21	0.63	6.00
	Gillam	4.43	7.39	5.17	1.48	0.82	5.80
	Brochet	4.29	5.73	4.74	1.33	0.59	5.96
	Pointe du Bo	4.25	7.15	5.08	0.93	0.83	5.64
1985	Island Lake	4.05	6.71	4.91	0.65	0.51	3.69
	Norway House	4.29	6.48	5.09	0.68	0.52	4.11
	Gillam	4.17	7.01	4.91	0.82	0.42	3.93
	Brochet	4.22	5.53	4.85	0.56	0.24	2.83
	Pointe du Bo	3.87	7.97	5.14	1.32	0.99	9.14
1986	Island Lake	3.82	6.00	4.91	0.63	0.48	3.27
	Norway House	4.32	6.80	5.07	0.66	0.45	4.19
	Gillam	4.68	7.45	5.30	0.61	0.46	3.41
	Brochet	4.24	5.98	4.87	0.62	0.23	3.41
	Pointe du Bo	4.15	7.14	5.10	0.83	0.86	4.50
1987	Island Lake	4.45	6.78	5.09	0.86	0.74	4.66
	Norway House	4.49	6.34	5.16	0.68	0.73	3.63
	Gillam	4.43	7.30	5.33	0.84	0.52	3.29
	Brochet	4.03	5.75	4.78	0.80	0.43	3.23
	Pointe du Bo	4.51	7.49	5.28	0.92	1.03	3.76
	Winnipeg	5.12	7.75	5.61	1.29	1.08	5.93

Chapitre 2- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Définition du concept de sensibilité

La sensibilité s'évalue soit par l'observation de la réaction d'un milieu ayant subi des précipitations acides, soit simplement par une constatation des propriétés du sol et de la roche de la région. Le terme sensibilité peut ainsi se définir de différentes façons et ce, en fonction des paramètres auxquels il est associé. La sensibilité des sols peut se traduire en une diminution de pH et du pourcentage de saturation en bases, et en des variations de la composition de l'eau du sol en fonction d'une augmentation de l'acidité (Petersen, 1986; Wiklander, 1980). Le taux de changement de pH de l'eau souterraine, du contenu en bases échangeables du sol ou de la concentration en aluminium dissous dans un plan d'eau, et ce en fonction d'un ajout d'acide, est aussi une démonstration de sensibilité (Edmunds et Kinniburgh, 1986). Pour Reuss et al. (1987), le concept de région sensible signifie que la roche en place est granitique ou siliceuse et que les dépôts meubles sont minces et discontinus. Le terme sensibilité peut aussi désigner la capacité d'un drift, des réseaux hydrographiques ou des soubassements à atténuer les effets négatifs des précipitations acides (Shilts et al., 1981). Elle peut s'évaluer par la capacité tampon d'un sol ou de la roche par une titration acide-base (Edmunds et Kinniburgh, 1986; Wyatt, 1984). Dans cette étude, elle fut déterminée en

acidifiant des sédiments, à l'aide de différents volumes d'acide, permettant d'obtenir la quantité de protons d'hydrogène neutralisés (CNA). Un sol possédant une CNA élevée sera alors peu sensible et l'inverse représente des milieux très sensibles aux précipitations acides.

2.2 Importance du phénomène glaciaire

Pour bien évaluer la sensibilité d'une région aux précipitations acides, il est important de considérer les sédiments quaternaires. Une zone géologique sensible peut être recouverte d'un sol tamponnant l'acidification (Hornbrook et al., 1986). Le matériel transporté par les glaciers peut posséder une source exotique plus neutralisante que la roche sensible en place. Dans l'est du Canada, un matériel détritique riche en calcaire déposé sur la roche en place, peut transformer une zone potentiellement sensible en une zone ayant un bon pouvoir tampon (Shilts et al., 1981). Wilson (1985) mentionne trois points montrant l'importance de ces sédiments dans la neutralisation:

1) Les sédiments peuvent provenir, par le transport glaciaire, d'une source différente de la roche sous-jacente. Par leur composition, ils peuvent réagir différemment aux précipitations acides.

2) Les sédiments glaciaires sont le produit de broyage et d'abrasion de débris de roches. Des fragments de

toutes les grosseurs s'y retrouvent. Les grains les plus fins ont de plus grandes surfaces de contact et peuvent neutraliser davantage l'acide.

3) Dû à leur infiltration, les dépots glaciaires modifient les caractéristiques hydrologiques de la région.

2.3 Acidification naturelle et anthropogénique

Le dépôt des polluants atmosphériques affecte tous les constituants du sol: le matériel solide, l'eau interstitielle et l'eau souterraine. Ces contaminants souvent acides favorisent l'acidification du sol. Ceux-ci font des ravages dans les sols où l'eau interstitielle a un pH plus élevé que le pH de l'eau polluée y pénétrant (Bache, 1980a; Petersen, 1986). La fertilisation des terrains agricoles ainsi que des changements d'utilisation de ces derniers (Krug et Frink, 1983; Reuss et al., 1987) sont des causes de l'acidification du sol et des cours d'eau. L'ajout de fertilisants agricoles comme le sulfate d'ammonium, un des plus acidifiants, modifie énormément la chimie du sol et de l'eau interstitielle (Bache, 1980a). Des études ont révélé que 100 kg de N^{+}, sous forme de sulfate d'ammonium, entraîne la libération de 210 kg de Ca^{++} dans l'eau de drainage (Bache, 1980a). Une autre étiologie de l'acidification des sols est celle d'origine naturelle. En Amérique du Nord et en Europe, le climat humide facilite ce

phénomène (Krug et Frink, 1983; Petersen, 1986). Par les processus biologiques, des acides carboniques, nitriques, sulfuriques et organiques sont produits. L'acide carbonique et les acides organiques solubles causent les effets les plus considérables dans l'acidification naturelle (Petersen, 1986). De plus, la consommation de nutriments par les plantes ainsi que la décomposition d'humus peut affecter l'acidité d'un sol. Wiklander (1980) a détaillé ces processus naturels:

a) la production de CO_2 par les racines des plantes et par les microorganismes augmente la solubilité du carbonate de calcium ainsi que la désorption des bases cationiques dans le sol (pH 5,5). A un pH supérieur à 6, l'énergie de liaison entre H^+ et les particules du sol est élevée, l'acide carbonique joue alors un rôle important dans l'acidification.

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

$$SOL{+}Ca + 2H^+ \rightleftharpoons SOL{-}H_2 + Ca^{++}$$

b) L'oxydation de NH_4^+ et de NH_3 en acide nitrique et l'oxydation de S, FeS, FeS_2 et H_2S en acide sulfurique favorise l'acidification du sol:

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightleftharpoons H_2O + NO_3^- + 2H^+$$

$$H_2S + 2O_2 \rightleftharpoons SO_4 + 2H^+$$

Cependant le phénomène de réduction dans le sol est non négligeable et peut contrebalancer la réaction:

$$SO_4 + 2CH_2O + 2H^+ \rightleftharpoons 2CO_2 + H_2S + 2H_2O$$

c) Les forêts de conifères produisent un humus très acide contenant des acides organiques solubles et des fluvioacides. Ceux-ci sont lessivés de l'humus et causent une altération du sol (formation d'un podzol). Ces acides combinées au groupe carboxyle (COOH) provenant de l'oxydation de l'humus sont les facteurs principaux de l'acidification des forêts de conifères.

d) L'apport de nutriments aux plantes consiste en un échange ionique entre les particules du sol et leurs racines. Les cations (nutriments) échangés sont remplacés par des ions H^+ sur les particules, acidifiant ainsi ces dernières.

Certains auteurs (Krug et Frink, 1983) croient que les processus naturels du développement du sol sont plus souvent la cause de l'acidité des lacs et des rivières que les pluies acides. Il est vrai que des acides organiques naturels peuvent acidifier l'eau de surface (Reuss et al., 1987). Deux conditions sont nécéssaires pour ce processus:

a) le pH doit être inférieur à 5;

b) les anions organiques et les acides forts doivent être en plus grande quantité que les cations basiques comme dans les lacs très colorés des tourbières au Canada.

Ces derniers ont alors un contenu élevé en carbone organique dissous (Reuss et al., 1987). De nos jours, les

lacs acidifiés sont surtout riches en sulfates alors que ceux acidifiés naturellement sont très colorés et contiennent surtout des anions organiques. L'acidification naturelle ne peut être la seule explication car les apports atmosphériques riches en sulfates sont parfois importants. Il semble que l'acidification des eaux de surface soit le résultat des précipitations acides combinés à l'acidification naturelle des sols (Reuss et al., 1987).

2.4 Facteurs influencant la neutralisation

La nature du sol, sa localisation, le climat, la végétation, son type de roche de fond contribuent tous à la neutralisation acide et ce, dans des proportions variables. Le sol possède des propriétés très reliées les unes aux autres. Celles-ci jouent un rôle important dans la neutralisation. Ces propriétés sont: le type de sol, la texture, le pH, la capacité d'échange cationique, la saturation en bases échangeables, le contenu en $CaCO_3$, la perméabilité et l'épaisseur. N'utiliser qu'une seule d'entre-elles pour évaluer la neutralisation du sol ne rend pas justice au problème (Lau et Mainwaring, 1985).

La description des propriétés s'avère nécéssaire pour bien cerner les processus. Le type de sol tel le podzol est un milieu déjà acide. Il réagira différemment d'un chernozem ou d'un brunisol à l'acidification. Morphologiquement, un sol podzolique a un horizon B podzolé et le

chernozem n'en n'a pas (Agriculture Canada, 1987). Le brunisol se distingue du podzol par son horizon Bf moins épais que celui du podzol. Un podzol ayant un pH de 3,0 à 3,5 comparativement à 7,0 pour un chernozem développé à partir d'un sol calcareux canadien n'adsorbe qu'une fraction de l'acide de l'eau interstitielle (Vanloon, 1984). Au Canada, un podzol dérivé du Bouclier consiste en un horizon d'humus superposé à un horizon lessivé gris pâle (éluvial) (figure 13). Cette couche est lessivée des sesquioxydes de fer et d'aluminium qui ont migré vers les horizons inférieurs (B ou illuvial). Ce lessivage s'effectue sous l'influence de la percolation d'eau contenant de l'acide humique de la couche organique (Petersen, 1980). Ainsi le phénomène de podzolisation résulte d'une réaction acide et se caractérise par un faible contenu en nutriments. Il est inversement relié au contenu en fer et argile du sol (Petersen, 1986). Les sols argileux ne deviendront pas podzolisés même s'ils ont un pH faible. Cela peut s'expliquer par le fait que ces sols sont riches en aluminium et en fer comparativement aux sols sableux (Petersen, 1980).

La texture du sol est une propriété importante qui affecte la neutralisation (Lau et Mainwaring, 1985; Vanloon, 1984). Elle est reliée à la capacité d'échange cationique (CEC), dépendante de la saturation en bases, elle-même fonction du pH. La CEC est associée au contenu en

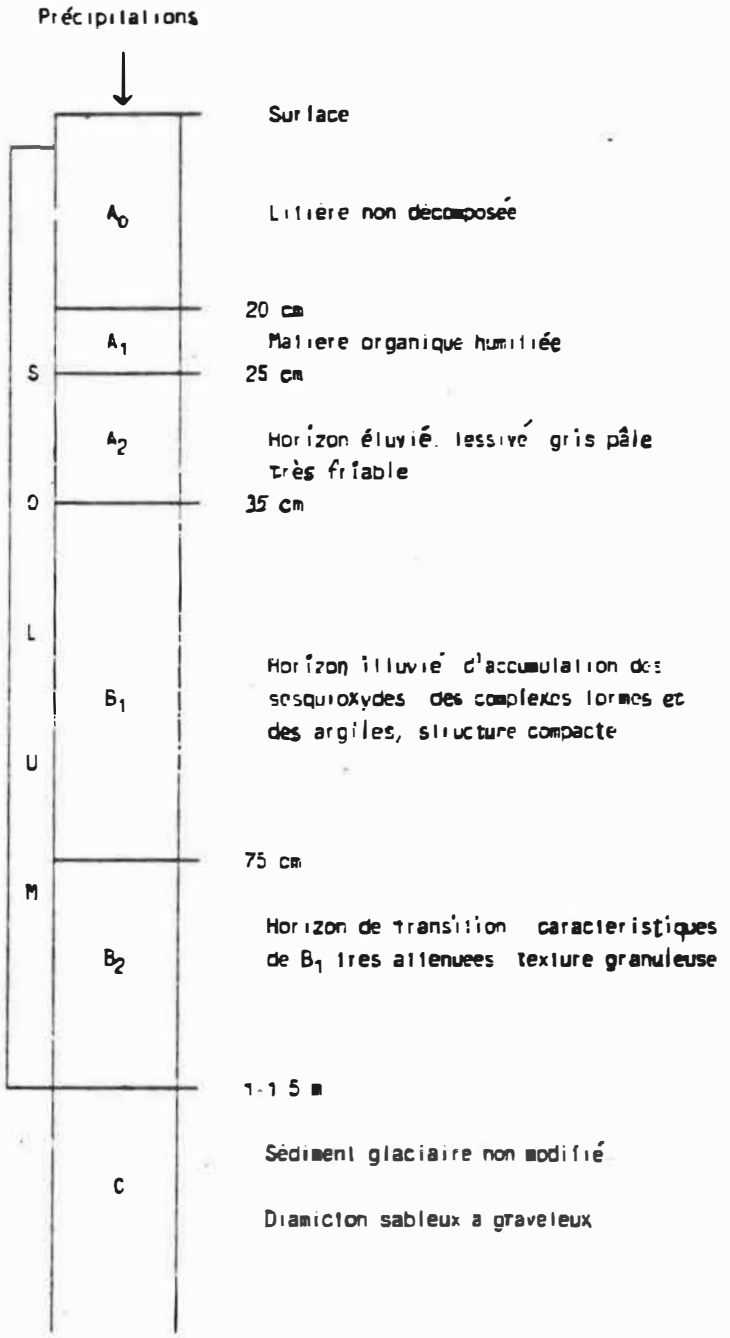


Figure 13. Profil d'un podzol typique (Tiré de Aubertin, 1988)

humus, à la présence d'argile (inférieur à 2 um) et à la nature de l'argile (Lau et Mainwaring, 1985; Petersen, 1986). Certains minéraux silicatés (phyllosilicates), de par leur nature, ont une plus grande CEC que d'autres:

TABLEAU 2. CEC (meq/100 g) des différents constituants du sol (GRGI, 1986).

Kaolinite	3-5
Montmorillonite	70-100
Illite	10-40
Vermiculite	100-150
Chlorite	10-40
Acide humique	410-430

La saturation en bases (SB) est la portion de la capacité d'échange cationique occupée par les bases échangeables (Na^+,K^+,Mg^{++},Ca^{++}). Les bases adsorbées sont en grande quantité dans les sols ayant un pH élevé comparativement aux sols acides riches en ions aluminium et hydrogène (Petersen, 1986). Des sols avec un SB élevée, ont une meilleure capacité d'échange avec les composés acides, donc une plus grande capacité de neutralisation acide (CNA) (Lau et Mainwaring, 1985; Petersen, 1986). Selon Brady (1974), plus le contenu en silt et en argile est élevé, plus il existe des sites pour l'échange ionique dans la matrice du sol. La relation étroite entre la saturation en bases et le contenu en argile et en silt démontre bien que la texture est un bon indicateur de la sensibilité du sol à

l'acidification. Dans les sols non calcareux, les acides réagiront avec les cations échangeables: Na^{+}, K^{+}, Mg^{++}, Ca^{++}, H^{+}, Al^{+++}. Ces cations sont retenus par des forces électrostatiques sur des particules chargées négativement telles l'argile et l'humus (Petersen, 1986). Les charges négatives dépendent non seulement des silicates et du contenu en matière organique mais aussi du pH (Bache, 1980a). Des sols avec un faible pH n'adsorbent qu'une fraction de l'acide. Parfois, certains sols ont un pH si bas qu'aucun acide n'y sera adsorbé. Pour neutraliser l'apport de protons, il y a un lessivage des nutriments du sol. Les ions hydrogènes provenant des précipitations acides déplacent les cations des sites d'adsorption et les relarguent en solution (Vanloon, 1984; Wilson, 1985). Parfois, ils réagissent avec les minéraux primaires entraînant alors la dissolution d'éléments comme le fer, l'aluminium (Vanloon, 1984) et rarement le calcium (Bache, 1980a). Par contre, certains sols ont une faible saturation en bases et ils contiendront beaucoup d'aluminium (hydrolyse acide) en solution suite à une acidification (Wilson, 1985). Celui-ci se retrouve dans les réseaux cristallins des minéraux, dans les couches d'argile et les minéraux faiblement ordonnés (allophanes et hydroxydes) (Bache, 1980a). La quantité d'aluminium libérée dépend de sa solubilité, des coefficients de l'échange ionique et de la saturation en cations (Reuss et al., 1987).

Dans un sol calcareux, la neutralisation acide entraîne une réduction du contenu en $CaCO_3$ (Petersen, 1986):

$$H^+ + CaCO_3 = Ca^{+2} + HCO_3^-$$

Une quantité infime (1%) de carbonate de calcium empêchera une diminution de pH (Petersen, 1986). Le sol sera alors insensible à une acidification. Bache (1980a) affirme que le pH ne diminuera pas en bas de 6,5 à 7,0 tant que tout le calcium ne sera dissous. La quantité de Ca^{++} et Mg^{++} dissous par les précipitations dans un sol calcareux est faible par rapport au contenu du sol (Vanloon, 1984). Selon Vanloon, un tel sol sera peu affecté par une acidification pour plusieurs années.

Une étude de April et Newton (1985) compare deux lacs identiques du point de vue de la roche de fond et des précipitations mais différents au niveau de l'épaisseur et la perméabilité des dépôts détritiques. Celle-ci démontre que le lac possédant un till épais sous-jacent contrôle mieux le pH de ses eaux. La perméabilité de son bassin de drainage est meilleure que celui ayant une mince couche de dépôts. Sa grande perméabilité favorise un long temps de résidence de l'eau dans le sol. Cela permet une neutralisation plus importante de l'eau acidifiée avant qu'elle n'atteigne le lac par l'écoulement de surface (April et Newton, 1985). Le taux d'infiltration est un processus qui dépend de deux facteurs: la perméabilité et le gradient hydraulique. Un taux trop élevé diminue le temps de

rétention de l'eau dans le sol (Bache, 1980a). Alors qu'un faible taux favorisé un temps de résidence plus long et permet une meilleure réaction entre sédiments et la solution (Bache, 1980a). Un sol perméable comme le sable avec un taux d'infiltration moyen neutralise probablement mieux les acides qu'un sol argileux imperméable favorisant le ruissellement. Malgré le fait que l'argile contient beaucoup de bases échangeables pour réagir avec l'eau acidifiée, celle-ci doit cependant pénétrer par des fissures ou dans les structures pour effectuer de tels échanges. Un sol argileux et silteux riche en structures (perméable) est idéal pour la neutralisation des précipitations acides. La présence de permafrost rend un sol imperméable et favorise l'eau de ruissellement. Dans un tel sol, les précipitations ou la fonte de la neige entraînent un effet de "choc chimique" sur la faune et la flore. Ce phénomène est aussi observable dans le sud du Québec, lors du dégel hatif pendant que le sol est encore gelé. Tel que démontré par April et Newton (1985), l'épaisseur et la continuité de la couverture de sédiments influencent positivement la capacité tampon du sol (Shilts et al., 1981; Edmunds et Kinniburgh, 1986).

Tout comme les sols, la roche de fond peut également tamponner les précipitations acides. La roche, recouverte d'un dépôt de sédiments mince et discontinu, régit alors la chimie des systèmes aquatique et terrestre (Shilts et al.,

1981). Deux constituants permettent d'établir une échelle de sensibilité de la roche soit les minéraux carbonatés et les micas. Ces premiers confèrent la meilleure capacité de neutralisation par unité de volume de roche (Shilts et al., 1981). Les processus d'échange cationique et d'hydrolyse (dissolution des minéraux) des micas donnent aussi un pouvoir tampon élevé. L'échelle de Shilts concernant la sensibilité de la roche fut développée en fonction de ces deux constituants.

Sensibilité élevée: granite, gneiss granitique, orthoquartzite, syénite.

Sensibilité élevée à intermédiaire: roches volcaniques, argiles litées, graywacke, roches utramafiques, gabbro, mudstone et équivalents métamorphiques.

Sensibilité faible à intermédiaire: roches clastiques calcaires et roches carbonatés interstratifiées ou intercalées de roches sédimentaires, ignées et métamorphiques de caractères non calcaire.

Sensibilité faible: Calcaire, dolomite et équivalents métamorphiques.

D'autres échelles similaires furent développées (Edmunds et Kinniburgh, 1986) en considérant la roche présente dans la région à l'étude. Edmunds souligne l'importance de la minéralisation secondaire dans l'évaluation de la sensibilité de la roche aux précipitations acides. En effet, la présence de ciment de carbonate dans un grès augmente

énormément sa capacité tampon.

2.5 Effets des précipitations acides sur le sol

En Norvège, l'acidification accélérée a provoqué une diminution de la saturation en bases du sol. Parallèment, en Suède, le pH du sol a diminué de 0,7 unité depuis 1953 (Andersson, 1986). En Europe centrale, la composition du sol a changé (horizons organique et minéral) depuis 12 à 30 ans. Afin de vérifier ces observations, des chercheurs ont procédé à des simulations de pluies acides sur le sol. Un traitement du sol à l'acide sulfurique (pH 3) a favorisé une migration des ions Ca^{++} et Mg^{++} de la surface vers le fond (Lee, 1984). Une acidification d'une durée de sept ans a provoqué une diminution de l'horizon A_o de 40% et une augmentation de la zone de lessivage (Baath et al., 1980). Elle affecte également la production de nitrates par les microorganismes. De même, certains micronutriments comme le Cu^{++}, Zn^{++} et Mn^{++} sont plus solubles suite à une acidification (Vanloon, 1984).

En résumé, les effets principaux de l'acidification du sol sont:

1) la perte de bases échangeables
2) la réduction de la CEC
3) la mobilisation de l'aluminium
4) la dégradation des minéraux

5) la changement de l'activité biologique

6) la modification des réactions dans le sol due aux changements de composition (Bache, 1980a; Seip et Freedman 1980).

2.6 Effets des précipitations acides sur la flore et la faune

Les précipitations acides sur la végétation causent à la fois des effets néfastes directs (par contact) et indirects (par les variations de composition du sol). Les précipitations acides lessivent les feuillages des conifères et des feuillus des éléments tels que K^{+}, Mg^{++}, Mn^{++}, et Ca^{++} (Bernier et Brazeau, 1986). Ce lessivage provoque des lésions, des déformations et même la perte de certaines couches protectrices de la feuille. Dans une étude, une corrélation fut établie entre la perte d'aiguilles des conifères et un milieu riche en émissions polluantes (Andersson, 1986). Cependant, l'âge des arbres et l'altitude sont des phénomènes naturels qui provoquent aussi la perte d'aiguilles (Andersson, 1986).

Les changements dans le sol sont des facteurs additionnels au stress des arbres (Andersson, 1986). La productivité des forêts sur un sol acide podzolique touché par les pluies acides est affectée d'une diminution de la décomposition de l'humus et du cycle normal des nutriments (Abrahansen et al., 1980; Roberts et al., 1980). La

diminution de l'activité des champignons Mycelium sp. et de la biomasse bactérienne dans les coupes acidifiées indique une diminution du potentiel de décomposition (Baath et al., 1980). La mise en solution de l'aluminium, du fer et du mercure les rend biodisponibles. Ces éléments peuvent détruire les plantes les plus sensibles. L'aluminium est reconnu pour empêcher la croissance des racines des semis (Vanloon, 1984). Par contre, dans une région tempérée, il a été rapporté que les plantes s'adaptent à l'acidité du milieu ou encore qu'elles sont remplacées par d'autres variétés (Robert, 1980). De même, les précipitations acides ont peu d'effets sur les racines de ces plantes.

La faune subit les effets indirects des précipitations acides. Le pH de l'eau de surface est très important pour la reproduction des poissons. La ponte des oeufs des animaux aquatiques peut être supprimée si l'eau possède un pH trop acide. Aucune reproduction n'est possible à un pH inférieur à 4,5. L'acidification favorise la libération de métaux biodisponibles pouvant s'accumuler dans les tissus vivants (Delisle et al., 1986). Certains métaux (Hg, As, Cd etc..) sont reconnus pour leur toxicité. Facilement absorbables, ils se concentrent alors dans la chaîne alimentaire pour finalement atteindre l'homme. Delisle et al. (1986) rapportent des concentrations de métaux lourds chez les poissons du Nouveau-Québec.

Chapitre 3 - METHODOLOGIE

3.1 Protocole

La méthode de Wyatt (1984) modifiée de celle de Kramer et al. (1979), fut utilisée pour déterminer la capacité de neutralisation acide (CNA) des sédiments. Celle-ci fut choisie pour faire suite et continuité à deux études antérieures sur le même sujet portant l'une sur la région du lac Kempt (Aubertin, 1988) et l'autre en l'Ungava (Wilson, 1985).

Les échantillons sont séchés et tamisés afin de recueillir la fraction granulométrique inférieure à 1 mm. Quatre sous-échantillons de 3 g approximativement sont mis dans une solution de 30 mL de NaCl 0,01 M (H^+ initial). Par la suite, nous ajoutons à chacun des sous-échantillons 0 mL, 0,1 mL, 0,5 mL et 1,5 mL d'acide sulfurique 0,1 N (H^+ ajouté). Afin d'obtenir un milieu à l'équilibre, un brassage continuel des sédiments en solution s'effectue pendant vingt-quatre heures. Un brassage de 72 heures fut testé par Wilson (1985) et n'a pas démontré de différence significative avec celui de 24 heures. Les sous-échantillons sont centrifugés durant quinze minutes à 2000 tours par minute. Ils sont filtrés à l'aide d'une membrane de 45 um afin de recueillir le surnageant. Cette opération est nécéssaire afin d'éviter que les particules fines des sédiments n'interfèrent avec l'électrode du pH-mètre digital servant à la lecture du pH final du surnageant. Cet

appareil "Ionalyser Orion Research model 401" possède une précision au cinq centième d'unité.

La capacité de neutralisation acide (CNA) est définie ainsi:

$$CNA\ (meq/100\ g) = H^+\ initial + H^+\ ajouté - H^+\ final$$

Des exemples de calculs de CNA se retrouvent en annexe B.

3.2 Principes de la CNA

La CNA s'exprime en meq de H^+ par 100 g de sédiments. Elle représente donc la quantité de protons hydrogènes ajoutés que le sédiment a neutralisés. Le graphique des CNA des quatre sous-échantillons en fonction du pH final réflète la réaction du sédiment fâce à une acidification. Chaque échantillon étant mis en contact avec 4 volumes différents d'acide sulfurique, le pH final de la solution dépend alors de la capacité de neutralisation du sédiment. Lorsque la solution du sol est acidifiée, les protons non neutralisés par le sol provoquent une diminution son pH . Un sédiment montrant un pH beaucoup plus acide après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 qu'initialement pour le témoin (0 mL) neutralise peu l'acide, alors qu'une faible variation entre le pH de départ (0 mL) et le pH final (1,5 mL) caractérise un sédiment peu sensible à l'acidification.

L'échantillon (no 3069) de la coupe 4 à la figure 14

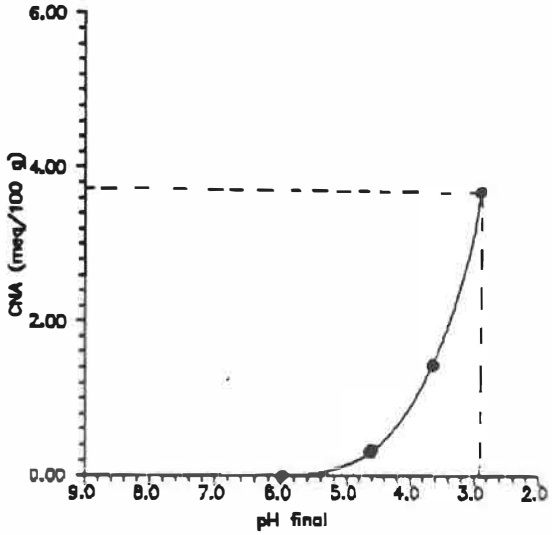


Figure 14. Exemple de courbe de CNA pour l'échantillon 3069 du profil 4

sert d'exemple. Ce sédiment, après une acidification de 1,5 mL de H_2SO_4 0,1 N, a neutralisé 3,68 meq H^+/100 g et son pH initial de 6,0 a chuté à 2,9 unités.

La courbe de CNA d'un échantillon est constituée de 4 points correspondant au pH mesuré après l'acidification séparée des 4 sous-échantillons. Elle se caractérise en premier lieu par sa pente. Un sédiment sensible à l'acidification se reconnaît par une faible pente, associée à une grande variation de pH. Inversement, un sédiment neutralisant montre par une pente forte. Une seconde caractéristique est le point d'inflexion de la courbe de CNA. S'il est bas dans la courbe, cela implique que la courbe est abrupte rapidement (avec une faible variation de pH). S'il est élevé, le changement de pente se produit à un pH bas donc le sédiment est peu neutralisant (Wilson, 1985). Le graphique sert à visualiser la capacité de neutralisation acide du sédiment et permet de comparer les réactions des sédiments en fonction de leurs caractéristiques texturales ou de leur composition telle que leur contenu en carbonates. Il sert aussi à estimer le nombre de protons neutralisés à un certain pH sur la courbe. Chaque sédiment possède donc ses propres caractéristiques et, par analogie, leurs empreintes digitales sont représentées par les pentes provenant de leurs titrations.

3.3 Détermination du contenu en carbonates des sédiments

Le contenu en carbonates des sédiments exprimé en équivalent de $CaCO_3$ est mesuré comme un pourcentage. Il fut évalué par le laboratoire de Sédimentologie de la Commission Géologique du Canada à Ottawa, selon la méthode Leco qui mesure le dégagement en CO_2 après une combustion à très haute température. Les fractions granulométriques étudiées sont: celle comprise entre 2 à 4 mm et celle inférieure à 1 mm. Ces deux fractions furent broyées jusqu'à 63 um afin de pouvoir procéder à leur analyse. La fraction granulométrique acidifiée lors de la détermination de la CNA est celle inférieure à 1 mm. En procédant à l'analyse du contenu en carbonates de cette même fraction, cela permet de mieux comprendre la réaction à l'acidification. Quant à la fraction de 2 à 4 mm, elle sert à confirmer les résultats obtenus pour la fraction inférieure. Généralement, les deux fractions du même échantillon possèdent un pourcentage en équivalents $CaCO_3$ similaire. Les sédiments furent échantillonnés afin que l'étude puisse contenir une grande variété du contenu en $CaCO_3$. À l'intérieur de la fraction inférieure à 1 mm, le pourcentage varie de 0 à 30% et pour la fraction de 2 à 4 mm, de 0 à 49%.

3.4 Détermination de la granulométrie

L'évaluation de la granulométrie s'avère essentielle pour comprendre les résultats de la CNA. Celle-ci fut

analysée par le laboratoire de Sédimentologie de la Commission Géologique du Canada par des méthodes conventionnelles. Les échantillons situés le long du gradient en carbonates et dans les coupes contiennent respectivement en moyenne 51,49% et 60,79% de sable, 34,67 et 27,16% de silt et 13,84% et 12,16% d'argile. Les sédiments à l'étude regroupent toutes les catégories de granulométrie (texture) soit argileuse, silteuse et sableuse.

3.5 Analyse de substances libérées après acidification

Après l'acidification des sédiments, le surnageant fut utilisé pour déterminer la quantité de substances libérées. La majorité des ions, le calcium, le magnésium, le potassium, le mangagnèse, le cuivre, le zinc et le cadmium furent analysés par absorption atomique par le laboratoire du génie de l'Environnement de l'Ecole Polytechnique de Montréal. L'aluminium, exigeant une équipement plus sophistiqué, fut analysé par le laboratoire de Géochimie de l'Ecole Polytechnique. Le Ca^{++}, Mg^{++}, K^{++} et Mn^{++} sont des constituants principaux du sol. Le Cu^{++}, Zn^{++}, Cd^{++}, Al^{+++} parfois toxiques pour la végétation et la faune sont analysés afin d'observer l'importance de leur libération après l'acidification. En général, la concentration de K^{+}, Zn^{++}, Cu^{++}, Cd^{++} se situe sous à la limite de détection de l'appareil. Par contre, les résultats obtenus pour le Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} et Al^{+++} sont fort intéressants.

Chapitre 4 - RESULTATS

4.1 Localisation et nature des échantillons

4.1.1 Le long du transect

Les échantillons sont tous des diamictons d'origine glaciaire (till) dont on a prélevé en moyenne 1 kg à une profondeur moyenne de 45 cm dans l'horizon C des sols (figure 15). Des précautions furent prises lors de leur collecte afin d'obtenir des sédiments comparables. Les roches altérées, les racines et les zones oxydées furent évitées lors de l'échantillonnage du till. Seul l'échantillon 2240 fut pris dans l'horizon B. Dans cette région (sud de Leaf Rapids), le sédiment est peu épais et il fut impossible de prendre un échantillon dans l'horizon C. Dans le tableau 3, la localisation des échantillons est définie par les coordonnées UTM de cartes topographiques. Les coordonnées sont décrites dans les tableaux (3 et 4) par "Easting" et "Northing". Le tableau 3 comprend aussi un résumé des descriptions des échantillons ainsi que le type de roche de fond sous-jacent au sédiment.

4.1.2. Dans les profils

Onze coupes furent décrites afin d'étudier la variabilité in situ de la CNA dans les différents horizons du sol et l'effet d'un couvert d'argile sur la CNA des sédiments. Dans le tableau 4, chaque site se réfère à un numéro permettant de le localiser sur la figure 2. Un résumé des

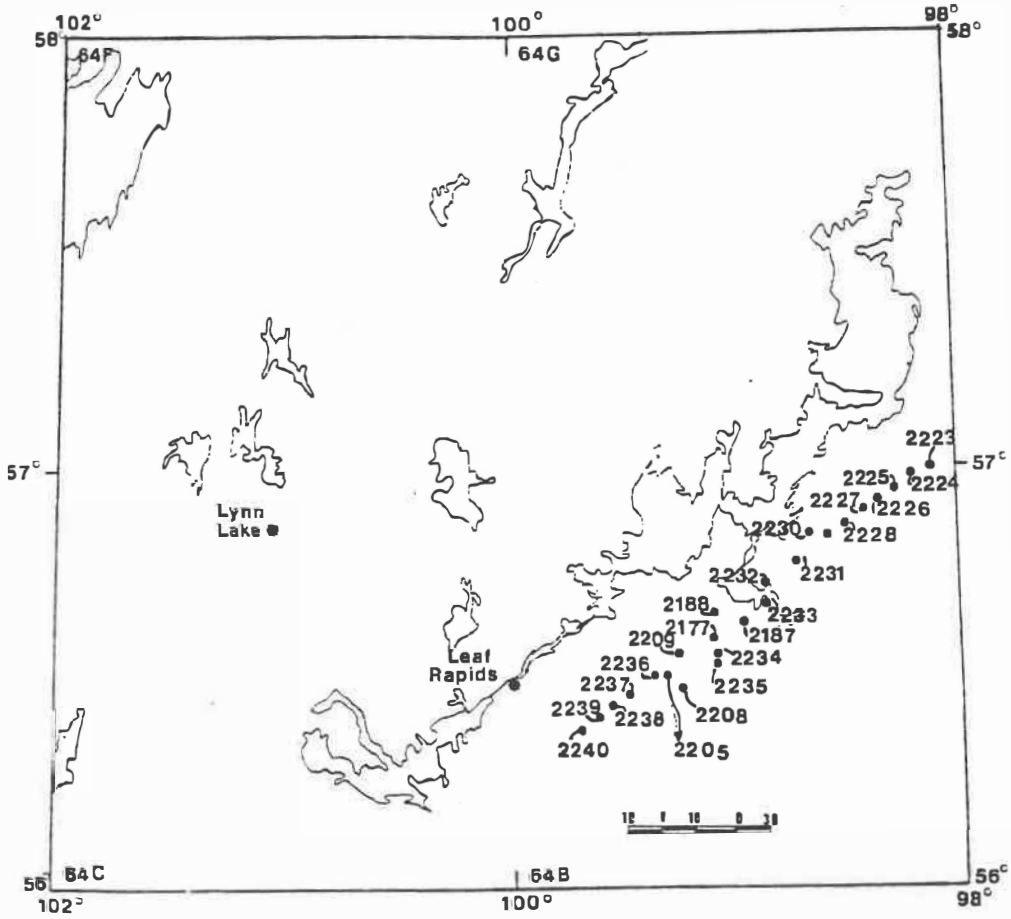


Figure 15. Localisation des échantillons le long du transect. Tiré et adapté de Kaszycki et al., 1988

Tableau 3. Localisation et description des échantillons du transect

#	Easting	Northing	prof (cm)	horizon	couleur	substrat
2177	491500	6274020	30	C	olive	granodiorite
2187	498600	6277980	30	"	olive	greywacke
2188	491220	6279080	35	"	olive	granodiorite
2205	482850	6258350	55	"	gris	greywacke
2208	479750	6263830	55	"	gris o.	greywacke
2209	481800	6267780	65	"	brun o.	granodiorite
2223	554200	6316110	65	"	gris o.	granodiorite
2224	548930	6312200	50	"	brun o.	granite
2225	543250	6309700	50	"	brun	granite
2226	538920	6307740	80	"	gris	granite
2227	534550	6305070	110	"	gris	granite
2228	529180	6300080	40	"	gris	granite
2229	524620	6297020	60	"	gris	granite
2230	518100	6294210	50	"	gris b.	granite
2231	515480	6290500	60	"	gris	granite
2232	508100	6284700	25	"	gris	granite
2233	504550	6280950	20	"	gris	granite
2234	489700	6269410	25	"	gris	granodiorite
2235	489020	6267350	20	"	olive	granodiorite
2236	474950	6262000	23	"	brun g.	greywacke
2237	466410	6254870	30	"	olive	granodiorite
2238	460090	6253500	30	"	brun g.	granodiorite
2239	456900	6249400	35	"	brun	diorite
2240	453600	6249950	40	B	brun r.	granodiorite

gris o.= gris olive
gris b.= gris brun
brun o.= brun olive
brun g.= brun gris
brun r.= brun rouge

descriptions des échantillons pour chaque coupe est donné dans le tableau 5. Il est à noter que le substrat, sous-jacent aux sédiments, provient d'une compilation à l'aide de cartes géologiques et il ne fut pas observé sur le terrain. Tel que mentionné auparavant, seulement 2 à 6 échantillons par coupe furent utilisés malgré l'échantillonnage systématique de celle-ci à tous les 20 cm.

Tableau 4. Localisation des profils.

# site	Nom du site	Easting	Northing	nombre d'éch.
1	Hall lake I	452200	6197350	5
2	Hughes River	418900	6293350	4
3	Notigi	479050	6189600	4
4	Cartwright	398500	6296350	4
5	Eden Lake	424550	6291350	6
6	One Island	414900	6293100	4
7	Wheatcroft	395175	6226775	4
8	South Seal I	509625	6417650	2
9	0199	495800	6192100	4
10	0192	449900	6199300	3
11	South Seal 2	510800	6416800	3

Tableau 5. Description des échantillons dans les profils.

# du site	# éch.	prof (cm)	Horizon	couleur	nature	substrat
1	3003	380	C	gris	Till	leucotona-
	3008	280	C	gris	"	lite
	3010	240	B	gris	"	
	3012	180	B	gris	"	
	3016	70	B	brun	"	
2	3471	540	C	gris	Till	basalte
	3477	420	C	gris	"	
	3484	260	B	brun	"	
	3488	160	B	brun	"	
3	3037	260	C	gris	Till	greywacke
	3040	180	C	gris	"	
	3045	80	C	gris	"	
	3046	40		brun	"	
4	3053	540	C	gris	Till	basalte en
	3059	420	C	gris	"	coussinets
	3069	260	C	gris	"	
	3083	80	C	olive	"	
5	3091	560	C	gris	Till	granite
	3096	460	C	gris	"	
	3133	260	C	brun	"	
	3135	240	B	brun	"	
	3136	220	B	brun	Till	
	3140	120	B	brun	"	
6	3437	640	C	gris	Till	tuff inter-
	3441	600	C	gris	"	médiaire
	3456	260	B	brun	"	
	3466	40	B	brun	"	
7	136	100	C	-	Till	metagreywa-
	139	60	C	-	Till	cke
	140			-	Argile	
	142			-	Argile	
8	3407	240	C	gris o.	Till	N/D
	3417	20	C	brun	Till	

Suite du tableau 5.

# du site	# éch.	prof (cm)	Horizon	couleur	nature	substrat
9	3430	370	C	gris	Till	greywacke
	3431	220	C	gris	"	
	3432	100	C	brun	"	
	3433	80	C	brun	"	
10	3434	220	C	brun g.	Till	greywacke
	3435	160	C	brun	"	
	3436	60	B	gris	"	
11	3420	180	C	olive	Till	N/D
	3426	65		brun r.	Argile	

gris o.= gris olive
brun g.= brun gris
brun r.= brun rouge
N/D = non disponible

4.2 Les résultats de CNA

Les courbes de la CNA sont utilisées pour étudier les trois phénomènes suivants:1) l'effet de la granulométrie des sédiments sur la CNA, 2) l'effet du contenu en carbonates sur la CNA et 3) la variation de la CNA le long de différents profils verticaux.

Dans la première partie, les CNA de tills de granulométries diverses contenant un pourcentage de carbonates fixe sont étudiées. Dans la deuxième partie, la relation inverse est observée i.e. l'influence du contenu en $CaCO_3$ sur la CNA d'échantillons de même granulométrie. La troisième partie est constituée des variations des CNA selon les

différents horizons des profils. Pour déterminer le type de granulométrie des échantillons, deux diagrammes ternaires furent utilisés (annexe C); un premier pour les profils et un second pour le transect. Ces diagrammes permettent de visualiser les granulométries et de grouper les dépôts selon leurs propriétés texturales, exprimées par le ratio moyen de sable-silt-argile. Dans notre étude, un échantillon est sableux s'il contient plus de 56% de sable. Un sédiment silteux se compose de moins de 56% sable et de 28% à 56% de silt. Quant au sédiment argileux, il contient plus de 20% d'argile et moins de 56% de sable.

4.2.1 CNA selon la granulométrie

Les graphiques suivants sont composés d'un ensemble de trois courbes de CNA provenant respectivement d'échantillons sableux, silteux et argileux pour différents niveaux de teneur en carbonates. Les détails de la granulométrie et du contenu en $CaCO_3$ des échantillons utilisés sont inclus à l'annexe D.

4.2.1.1 CNA des tills non calcareux (figure 16)

La courbe de CNA de l'échantillon argileux (#3436) possède la pente la plus forte (presque verticale). Cet échantillon neutralise bien l'acide et freine ainsi l'abaissement du pH. La pente du till silteux (#3012) est plus grande que celui du sableux mais leur principale dif-

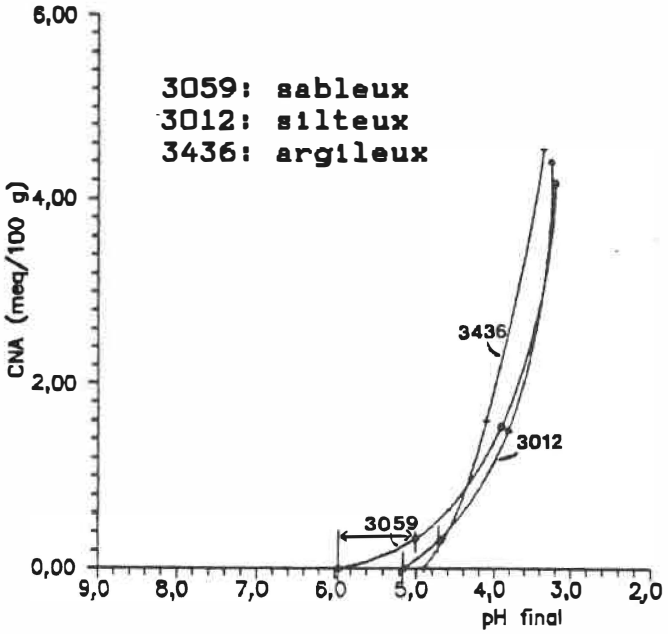


Figure 16. Courbes de CNA des tills non calcareux (0% $CaCO_3$)

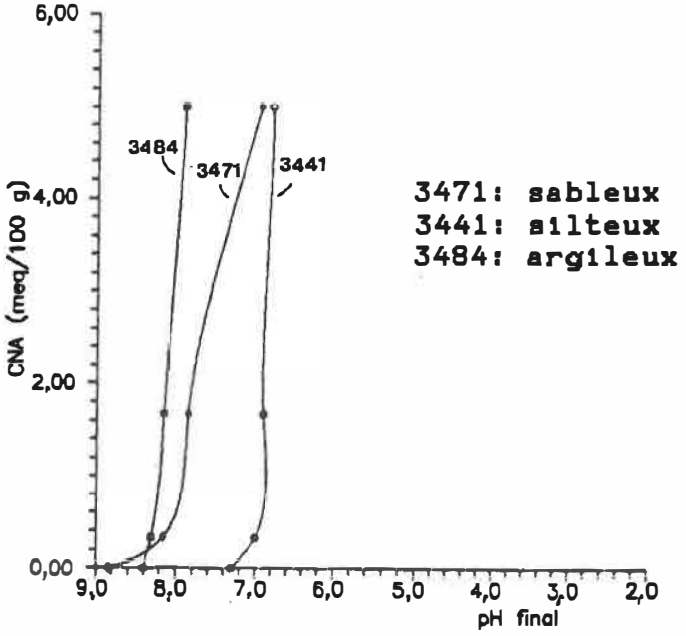


Figure 17. Courbes de CNA des tills légèrement calcareux (2,5% $CaCO_3$)

férence concerne la forme de la courbe entre les deux premiers points (tel qu'indiqué sur la figure 16). Après l'ajout de 0,1 mL H_2SO_4 0,1 N, le sédiment silteux a neutralisé davantage de protons que celui sableux. Le faible pouvoir neutralisant du sédiment sableux se traduit par une courbe plus évasée à sa base. Ainsi, le point d'inflexion de la courbe du sédiment silteux est plus bas que celui du sableux entraînant une pente plus abrupte pour le premier. Les trois sédiments de différentes textures ont ainsi des courbes caractéristiques et distinctes.

4.2.1.2. CNA des tills légèrement calcareux (2,5% $CaCO_3$)

La principale différence entre la figure précédente et la figure 17 est le contenu en $CaCO_3$ (2,5%) qui affecte la zone de pH parcourue par les courbes (de 6,8 à 8,85). La courbe de CNA du till argileux (3483) possède un allure similaire à l'échantillon 3436 de la figure 16 (presque verticale) malgré que l'un soit calcareux et l'autre non. Le till silteux (3441) se distingue surtout du sableux (3471) par la base de sa courbe soit entre 0 mL et 0,1 mL d'acide ajouté. La courbe de CNA du sableux est plus évasée due à une variation de pH plus grande que le silteux. Les distinctions entre les courbes de CNA sont comparables à celles de la figure précédente, mais fortement décalées vers la gauche (pH élevé).

4.2.1.3 CNA des tills très calcareux (15% $CaCO_3$)

A la figure 18, aucun sédiment n'est purement argileux l'échantillon 2232 ayant une texture silteuse à argileuse fut choisi pour pallier à ce problème. Les trois échantillons neutralisent très bien les acides et se distinguent par la base de leur courbe. Encore une fois, l'influence de la granulométrie est observable par l'allure des courbes. Cette figure diffère peu de la précédente malgré le fait que les échantillons contiennent six fois plus de carbonates. Plus le contenu en silt et en argile du till est élevé, moins la base de la courbe a tendance à être évasée. Les échantillons 2231 et 2232 ont une CNA très similaire malgré le fait que 2232 soit beaucoup plus argileux. La CNA du sédiment sableux (2233) parcourt un intervalle de pH plus grand que celle du silteux et du silteux-argileux. La plage de pH parcouru se situe dans un milieu alcalin. Un diagramme de la CNA de tills très calcareux (25% à 30% de $CaCO_3$) fut tracé afin d'observer des variations possibles avec celui contenant 15% de $CaCO_3$. Aucune différence ne fut observée, les courbes étant similaires.

4.2.2 CNA selon le pourcentage de $CaCO_3$

Une sélection parmi tous les échantillons analysés a permis d'identifier des tills sableux, silteux et argileux contenant divers pourcentages de carbonates. La comparaison de leur CNA permet de noter certaines tendances reliées aux

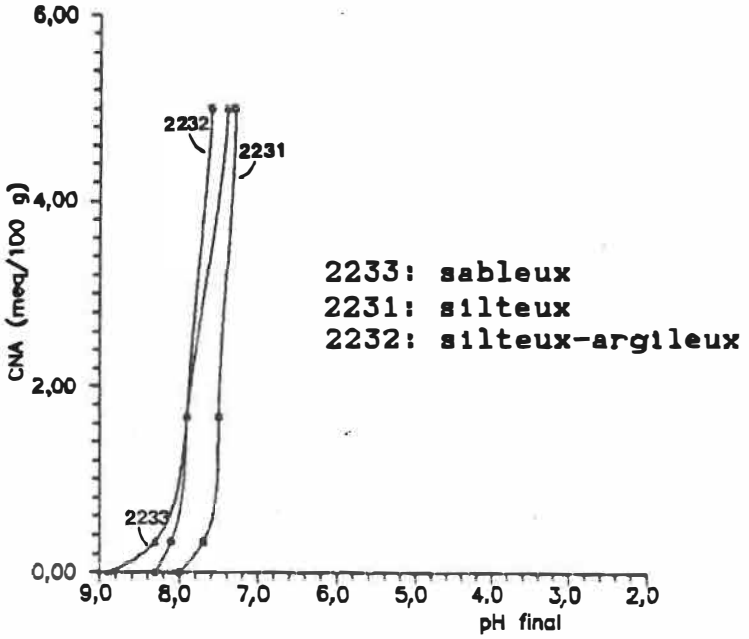


Figure 18. Courbes de CNA des tills très calcareux (15% $CaCO_3$) .

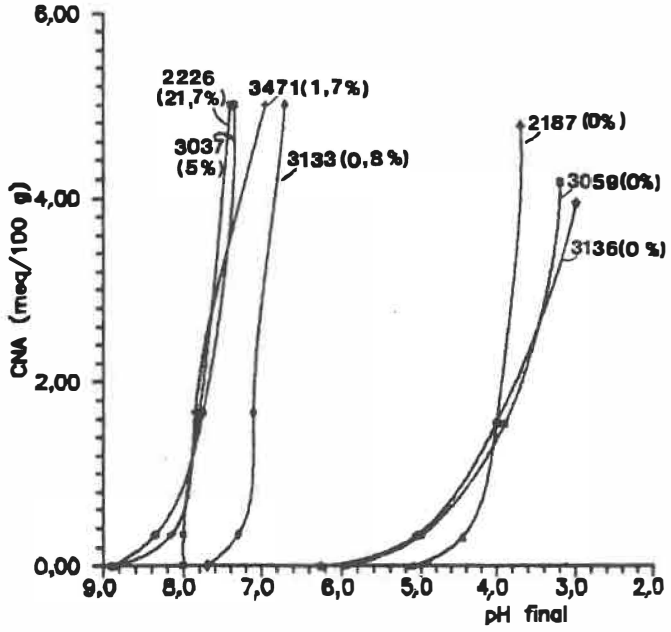


Figure 19. Courbes de CNA de tills sableux versus différents % $CaCO_3$.

contenus en carbonates.

4.2.2.1. CNA des tills sableux en fonction du % de $CaCO_3$

Ces échantillons contiennent tous plus de 56% de sable, la plupart en contenant plus de 70%. Deux des échantillons non calcareux (3059 et 3136) ont des comportements similaires: ils neutralisent peu ou pas l'acide ajouté (figure 19). Ceci est observable par la grande variation de pH après l'acidification. L'échantillon 2187 semble mieux résister à l'acidification que ces premiers échantillons même s'il n'est pas calcareux. En fait, il libère plus d'aluminium (pour freiner la chute du pH) après l'acidification que 3059 et 3136. Quant aux échantillons 3037, 3133 et 3471, leur pente et leur point d'inflexion sont similaires malgré des pourcentages de $CaCO_3$ différents. En fait, le contenu en carbonates de calcium semble peu influencer l'allure de la courbe. Ainsi, il existe peu de différence entre une courbe dont le till contient 0,8% et 5% de carbonates de calcium. Cependant, un till calcareux possède une courbe moins évasée à sa base qu'un till non calcareux de même texture. La courbe de CNA de l'échantillon 2226 a une pente presque verticale et se distingue ainsi des courbes des autres échantillons. Cependant, celui-ci est moins sableux que les précédents (61% comparativement à 71%). Cet échantillon (2226) contient alors plus de silt et d'argile que les autres. La plage de

pH parcouru des tills non calcareux est acide, tandis qu'elle est alcaline pour les tills calcareux.

4.2.2.2 CNA des tills silteux en fonction du % de $CaCO_3$

Ce graphique (figure 20) regroupe cinq courbes de CNA de tills silteux contenant de 0% à 26,7% de $CaCO_3$. Trois comportements différents sont identifiables. Premièrement, l'échantillon 2239 non calcareux possède une courbe caractéristique de sédiments silteux dans une zone de pH acide (faible variation de pH entre 0 et 0,1 mL d'acide). Deuxièment, les échantillons 2231, 2234, 3441 ont des courbes de CNA de même allure quoique leur pH initial soit différent (de 8,8 à 7,3). L'échantillon 2331 possède un pH initial plus élevé que 3441 mais ces derniers neutralisent bien l'acide. Finalement, les échantillons 2237, 2205 (non indiqués sur la figure) sont caractérisés par des courbes verticales généralement observées pour des tills argileux. Il est à remarquer que ces échantillons sont très riches en silt (43% et 47%). Cependant, deux autres échantillons 2188 et 2231 contiennent autant de silt mais ils ont des courbes de CNA typiques de tills silteux.

4.2.2.3 CNA des tills argileux en fonction du % de $CaCO_3$

Ce graphique (figure 21) montre six courbes dont trois dans un intervalle de pH alcalin et trois dans un intervalle de pH acide. Toutes ces courbes sont presque verticales. Les échantillons 3436 et 2240, démunis de

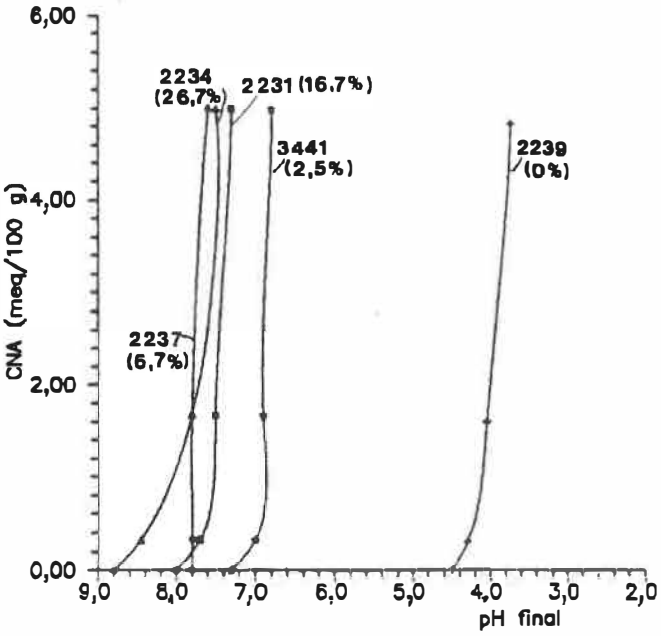


Figure 20. Courbes de CNA de tills silteux versus différents % $CaCO_3$

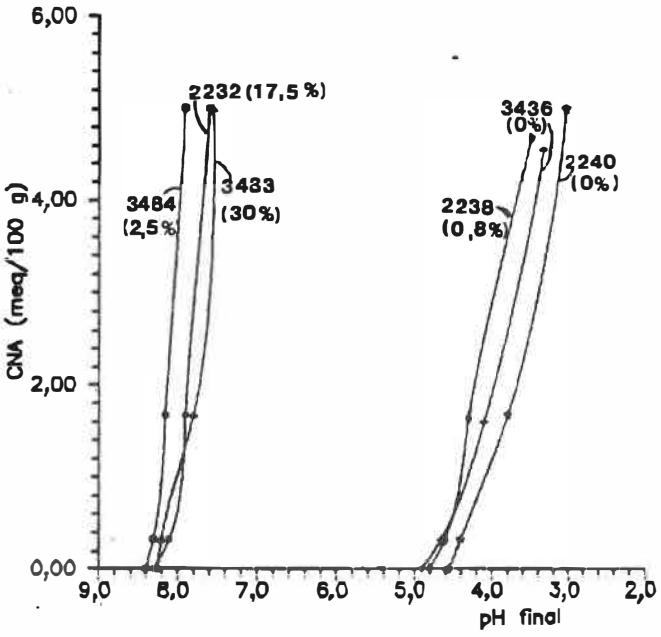


Figure 21. Courbes de CNA de tills argileux versus différents % $CaCO_3$

$CaCO_3$, neutralisent bien l'acide. La majorité des échantillons cités précédemment contenaient un faible poucentage de $CaCO_3$ et avaient un pH plutôt alcalin. Mais la CNA de l'échantillon calcareux 2238 (0,8% de $CaCO_3$) est dans un intervalle de pH acide. Aubertin (1988) et Wilson (1985) obtiennent aussi des sédiments légèrement calcareux ayant des CNA dont les pH finaux sont acides. Quant aux tills 2232, 3433 et 3484, ils ont tous des CNA dans la zone de pH alcalin. Ils ont tous la même capacité de neutralisation acide malgré leur contenu variable en $CaCO_3$.

Certains échantillons ne furent pas utilisés car ils n'apportaient aucun renseignement supplémentaire. Les détails de leurs analyses et de leur CNA sont inclus aux annexes A et B.

4.3 CNA des profils

Pour bien comprendre l'influence de l'horizonation des sols dans la capacité de neutralisation, des sédiments de onze coupes furent utilisés. Parmi ces coupes, quatre ont subi un lessivage de carbonates, six sont calcareuses et une est non calcareuse. Au niveau de la géologie, tous les profils sont situés sur le Bouclier dans la Province de Churchill. Dans tous les cas, si nous omettons les sédiments glaciaires, le substrat fournirait à la région une faible capacité tampon à l'acide (Shilts et al., 1981).

4.3.1 CNA des profils ayant subi un lessivage

Les sédiments glaciaires de ces coupes proviennent de la région du lobe de l'Hudson (Kaszycki et Dilabio, 1986). Leur composition calcareuse d'origine, fut modifiée par les processus naturels de développement des horizons du sol (podzols).

4.3.1.1. Coupe du Lac Hall (no1) (figure 22 et 23)

Ce site est localisé le long de la route 391 entre Leaf Rapids et Thompson. Les dépôts meubles recouvrant cette région sont épais et continus. La roche sous-jacente est une leucotonalite conférant théoriquement à ce site une sensibilité intermédiaire à élevée (sans tenir compte des sédiments en place). Tous les échantillons sont sableux. Ce profil a subi un lessivage jusqu'à une profondeur de 2,6 m. Les échantillons 3010, 3012, 3016 de l'horizon B sont non calcareux. Les échantillons calcareux 3003 et 3008 neutralisent bien l'acide (horizon C). Les échantillons 3012 et 3016 ont des courbes typiques de sédiments sableux non calcareux (CNA sur un grand intervalle de pH acide). L'échantillon 3010 a une CNA qui possède une allure particulière car elle débute dans un milieu alcalin et se termine dans un milieu acide soit une variation de 3,9 unités de pH. Selon les descriptions de terrain, des cailloux de calcaire furent observés au niveau de cet échantillon. Cela peut expliquer le fait que ce sédiment

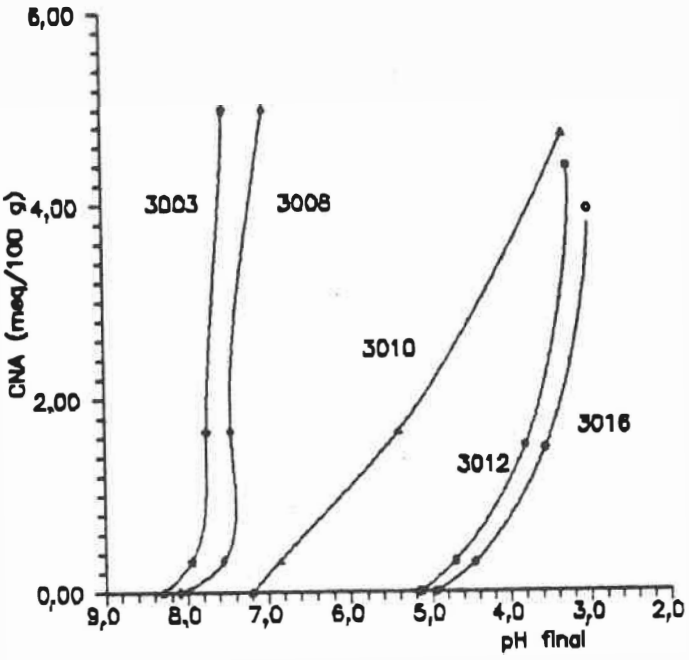


Figure 22. Courbes de CNA du profil 1

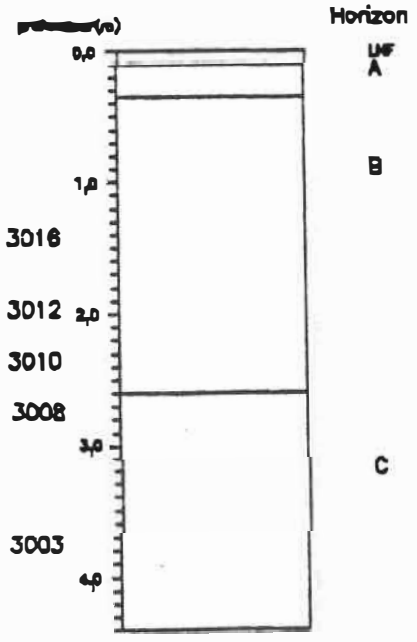


Figure 23. Localisation des échantillons dans le profil 1

possède un pH initial si élevé. On lui attribue cependant une faible CNA. De plus, sa localisation dans le profil, soit à la limite entre le sédiment lessivé et non lessivé, est peut-être reliée à sa faible performance. Les échantillons situés dans l'horizon B ont des comportements différents de ceux de l'horizon C qui neutralisent bien les acides (3003, 30008). L'influence du contenu en carbonates sur le pouvoir neutralisant est évidente à ce site.

4.3.1.2. Coupe de Eden Lake (no5)

C'est dans un ancien banc d'emprunt à proximité de la route 391 entre Leaf Rapids et Lynn Lake que ce profil fut dégagé. Il est constitué d'un diamicton (till) en alternance avec des lits de sable en profondeur. Tous les échantillons sont sableux et la zone de lessivage s'étend jusqu'à 2,4 m de profondeur (figure 24). Le substrat sous-jacent est un granite très sensible aux précipitations acides. Les échantillons supérieurs à 2,4 m ne contiennent pas de $CaCO_3$ et ont une faible capacité tampon en surface (figure 25). Les échantillons calcareux de l'horizon C (3091, 3096 et 3133) neutralisent bien l'acide. L'échantillon 3140 possède une courbe particulière, difficilement compréhensible qui suggère une erreur de manipulation. Encore une fois, les sédiments calcareux montrent une bonne CNA comparativement aux non calcareux.

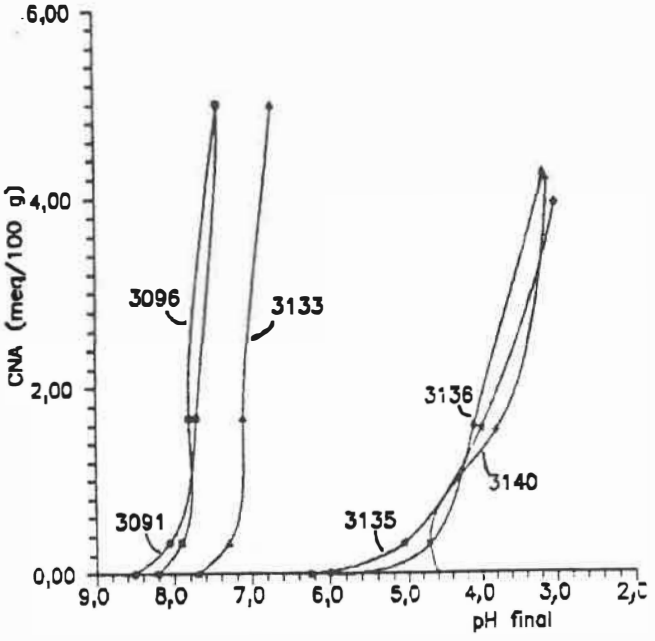


Figure 25. Courbes de CNA du profil 5

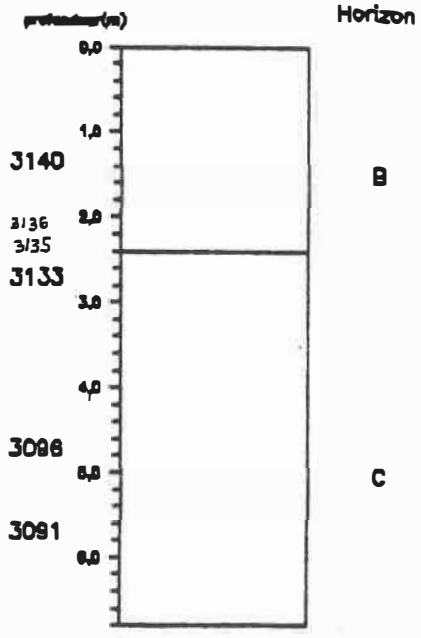


Figure 24. Localisation des échantillons dans le profil 5

4.3.1.3. Coupe de One Island Lake (no6)

Ce profil est localisé dans un banc d'emprunt entre Leaf Rapids et Lynn Lake. La roche de fond est un greywacke conférant à cette région géologique une sensibilité intermédiaire à élevée. Les diamictons recouvrant cette dernière sont épais et continus. Dans ce profil, le sédiments sont non calcareux jusqu'à 3,9 m de profondeur. Des sédiments sableux non calcareux déposés sur des sédiments silteux calcareux caractérisent ce profil. Les échantillons 3437, 3456 et 3466 sont sableux et 3441 est plutôt silteux. Les échantillons 3441 et 3437 riches en $CaCO_3$ (1,7% et 2,5%) de l'horizon C neutralisent bien l'acide (figure 26). Quant aux échantillons 3456 et 3466 démunis de $CaCO_3$, ils ont des courbes parcourant de grand intervalle de pH (acide).

4.3.1.4 Coupe 0192 (no10) (figure 28 et 29)

Ce profil se situe à proximité de la route 391 entre Leaf Rapids et Thompson. Le substrat sous-jacent est un greywacke (sensible). Ces échantillons possèdent une texture argileuse. Les échantillons (3434 et 3435) en profondeur sont riches en $CaCO_3$ comparativement à 3436 de l'horizon B situé dans la zone lessivée. Tous neutralisent bien l'acide, même 3436 qui opère à pH acide. Sa texture lui confère cependant une bonne capacité de neutralisation.

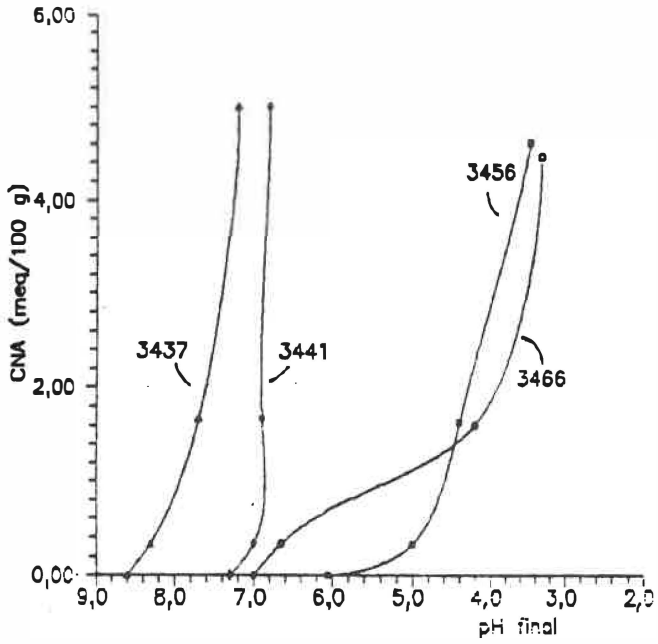


Figure 26. Courbes de CNA du profil 6

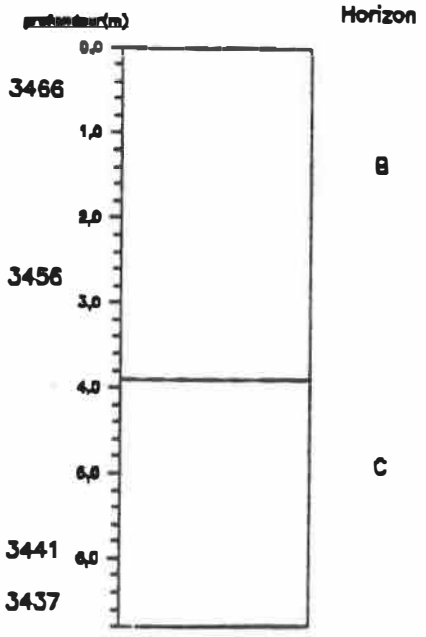


Figure 27. Localisation des échantillons dans le profil 6

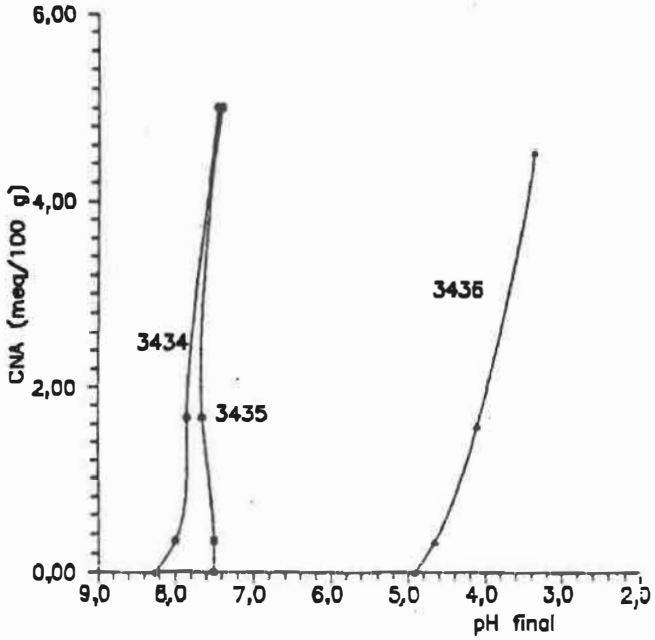


Figure 28. Courbes de CNA du profil 10

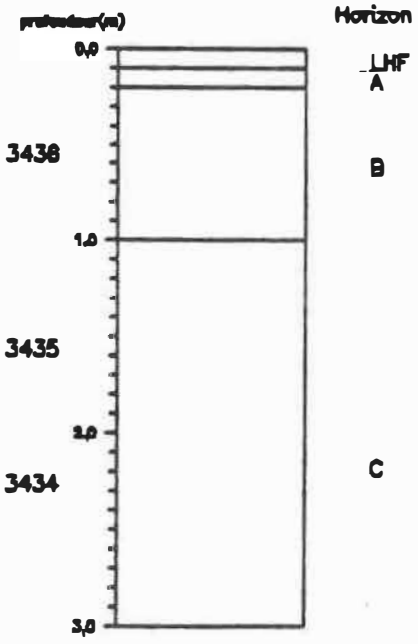


Figure 29. Localisation des échantillons dans le profil 10

4.3.2 Profil sans lessivage recouvert ou non d'argile

Les six coupes suivantes représentent des échantillons qui n'ont subi aucun ou peu de lessivage par les processus naturels. Cinq d'entre elles sont protégées par un couvert d'argile d'une épaisseur variable. L'argile étant un sédiment peu perméable, empêche ainsi le développement d'horizon dans le sol sous-jacent. Les échantillons furent prélevés dans le diamicton calcareux laissé par le lobe de l'Hudson et dans l'argile.

4.3.2.1 Coupe Hughes River (no2)

Ce site est localisé à proximité de la coupe numéro 6 (One Island). La roche de fond est un basalte possédant une faible capacité tampon. Ce profil est protégé par 20 cm d'argile (figure 31). Les échantillons en surface (3484 et 3488) sont argileux comparativement aux échantillons sableux en profondeur (3471, 3477). Ils sont tous calcareux (1,7% à 2,5%). Les sédiments 3484 et 3488 ont des courbes de CNA verticales caractéristiques de tills argileux et neutralisent bien (figure 30). Les échantillons 3471 et 3477 ont des courbes évasées typiques de tills sableux et possèdent une capacité tampon moyenne.

4.3.2.2 Coupe de Notigi (no3) (figure 32 et 33)

Ce profil est localisé à plus de 100 km au sud-est de Leaf Rapids. La roche sous-jacente est un greywacke (sen-

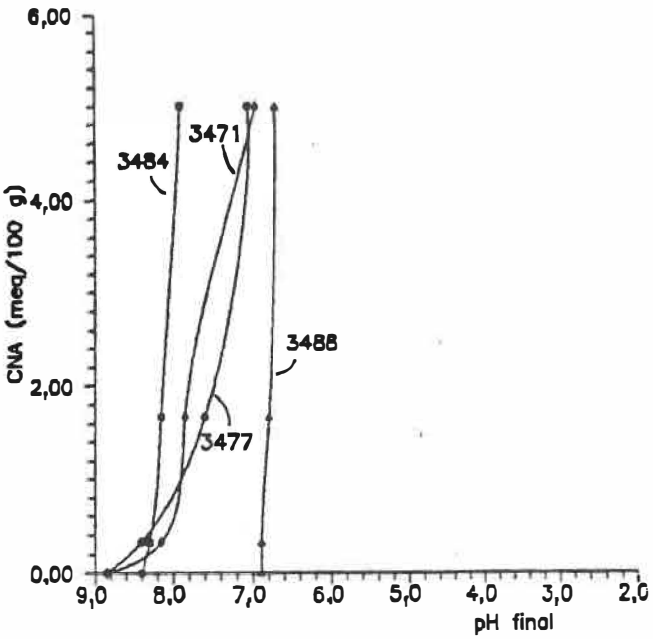


Figure 30. Courbes de CNA du profil 2

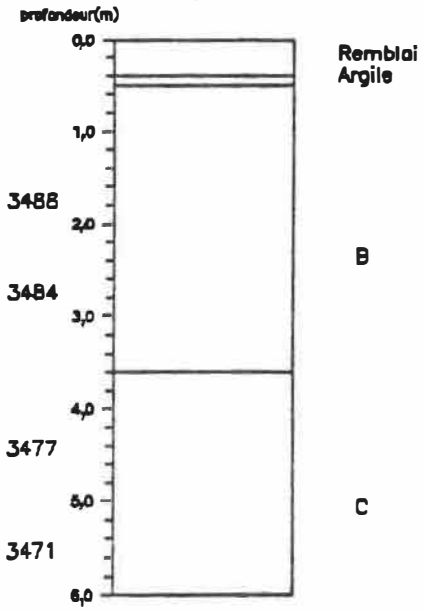


Figure 31. Localisation des échantillons dans le profil 2

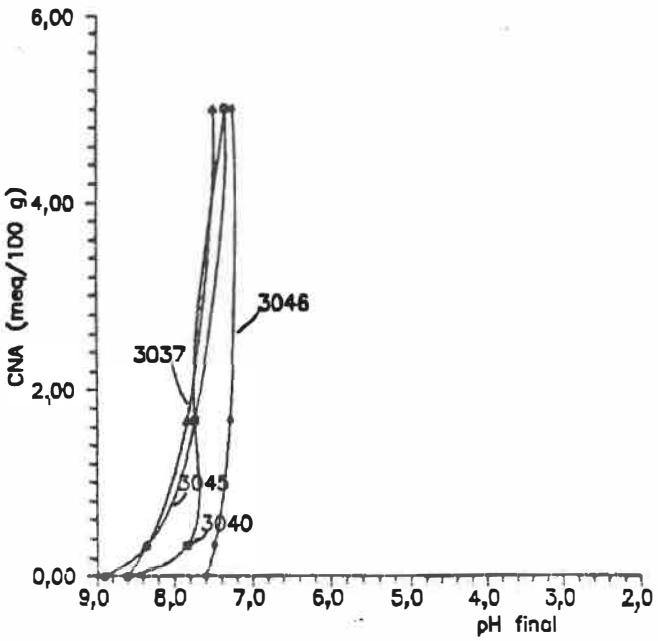


Figure 32. Courbes de CNA du profil 3

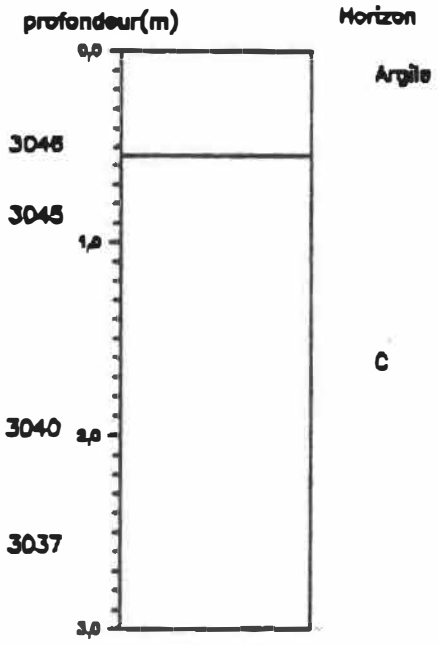


Figure 33. Localisation des échantillons dans le profil 3

sibilité élevée). L'argile calcareuse varvée d'une épaisseur de 55,0 cm recouvre le diamicton calcareux en alternance avec des lits de sable. Les échantillons 3037 et 3040 sont sableux. Cependant, les échantillons localisés près du couvert d'argile (0,55m) sont plus silteux (3045). L'échantillon 3046 est constitué d'argile et neutralise bien l'acide. Tous ces échantillons sont calcareux (5% à 7,5%). Les deux échantillons sableux ont des courbes caractéristiques des sédiments sableux, soit plus évasées que 3045.

4.3.2.3 Coupe de Wheatcroft Lake (no 7) (figure 34 et 35)

Cette coupe est située au sud-ouest de Leaf Rapids et n'est accessible que par voie aérienne. Des metagreywackes et des amphibolites constituent la roche de fond. Géologiquement, cette région est sensible aux précipitations acides. Aucune granulométrie ou contenu en carbonates ne fut analysé pour ces échantillons. Cependant, la présence de $CaCO_3$ fut testée à l'acide chlorhydrique 10%, et seul l'échantillon 142 est non calcareux. Les échantillons 140 et 142 furent prélevés dans l'argile alors que les échantillons 136 et 139 furent prélevés dans un till silteux. Tous ont des courbes de CNA très neutralisantes et plutôt typiques des sédiments argileux. Ceci met en doute l'évaluation visuelle de leur granulométrie. L'échantillon 142 ne contient pas de $CaCO_3$ et se situe dans un intervalle

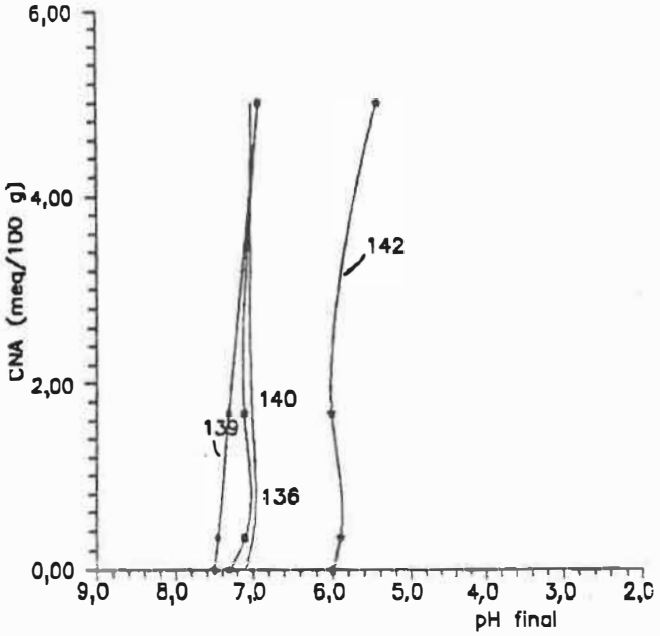


Figure 34. Courbes de CNA du profil 7

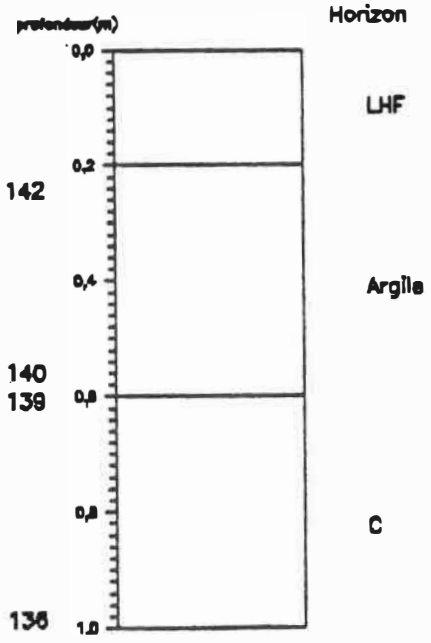


Figure 35. Localisation des échantillons dans le profil 7

de pH plus acide que les autres mais neutralise les acides tout aussi bien.

4.3.2.4. Coupes de South Seal

La rivière South Seal est localisée dans la partie la plus au nord de la région à l'étude. Deux coupes furent étudiées le long de cette rivière (no 8 et no 11).

4.3.2.4.1. South Seal I (no 8) (figure 36 et 37)

Cette coupe n'est pas recouverte d'argile et a été échantillonnée pour comparer les CNA des coupe South Seal I et II. Cette dernière seulement est protégée par l'argile. Ce profil est constitué de deux échantillons sableux-silteux (3407 et 3417) soit un pris en surface et l'autre en profondeur. Ils sont calcareux (9,2%) et neutralisant. Malgré leur différente position dans la coupe, leur courbe de CNA est très similaire. Même si les sédiments ont une granulométrie bi-modale (sableuse-silteuse), les courbes de CNA sont typiques de tills silteux.

4.3.2.4.1 South Seal II (no 11) (figure 38 et 39)

Les CNA de ces deux coupes se ressemblent qu'elles soient recouvertes ou non d'argile. Le till silteux 3420 a une aussi bonne CNA que le till 3407 de la figure 36. Quant à l'échantillon 3426, il est constitué d'argile calcareuse très neutralisante.

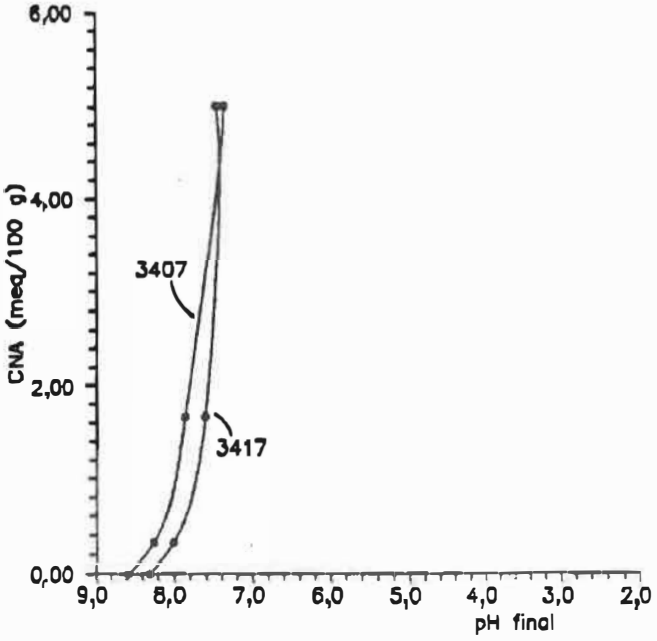


Figure 36. Courbes de CNA du profil 8

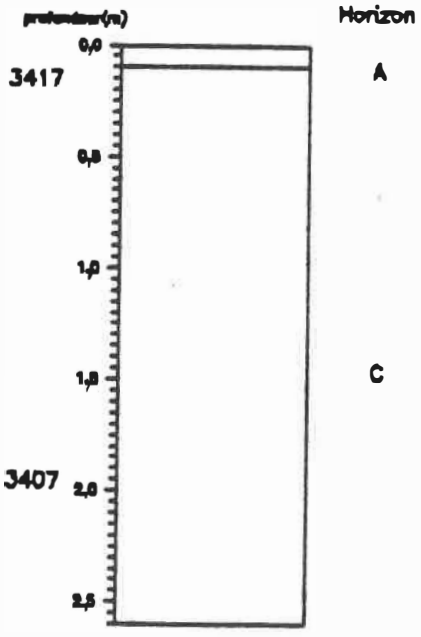


Figure 37. Localisation des échantillons dans le profil 8

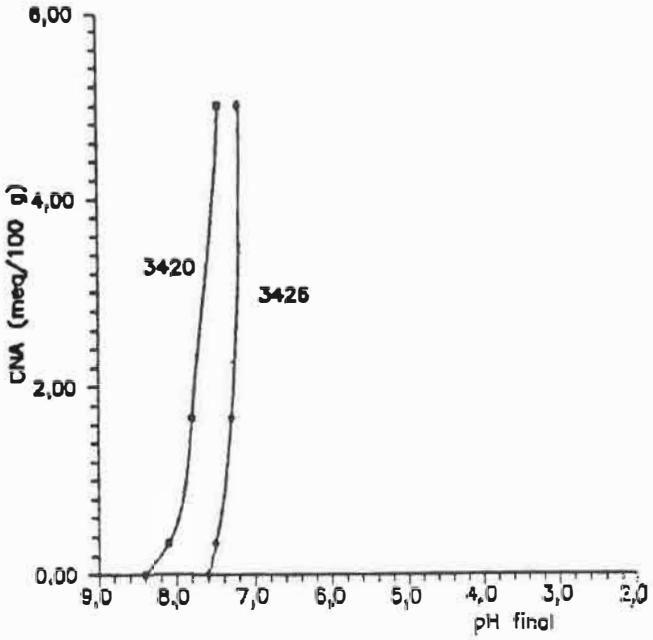


Figure 38. Courbes de CNA du profil 11

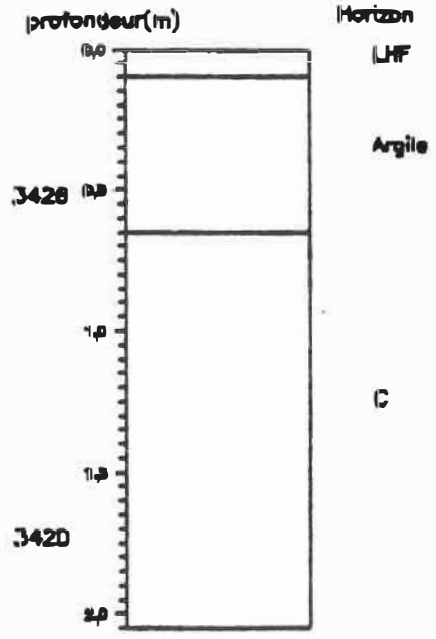


Figure 39. Localisation des échantillons dans le profil 11

4.3.2.5. Coupe 199 (no 9) (figure 40 et 41)

C'est à proximité du site no 10 (0192) entre Leaf Rapids et Thompson que provient cette coupe. Le substrat est composé de greywacke conférant à la géologie un faible pouvoir neutralisant. Ce profil est recouvert de 0,7 m d'argile calcareuse. Les échantillons 3431, 3432, 3433 sont silteux alors que l'échantillon 3430 est sableux. Près de la surface, le till est plus calcareux qu'en profondeur passant de 30% à 7,5%. Tous ont de très bonnes CNA et l'échantillon 3433 se distingue par sa pente très forte.

4.3.3 Profil non calcareux.

Les sédiments recouvrant le nord ouest de la province du Manitoba originent du lobe glaciaire de Keewatin. La source du till provient entièrement du Bouclier canadien. Ainsi, les diamictons (tills) de cette région sont non calcareux.

4.3.3.1. Coupe Cartwright (no4) (figure 42 et 43)

Le site est localisé à l'est de Lynn Lake dans un banc d'emprunt. Le substrat composé de basalte en coussinets confère à la région une très grande sensibilité aux précipitations acides. De plus, les sédiments recouvrant ce substrat sont peu neutralisants. La partie supérieure du profil étant manquante, aucun échantillon ne fut pris dans l'horizon B. Les quatre échantillons sont non calcareux et très sableux. Les courbes de CNA ont toutes un comportement

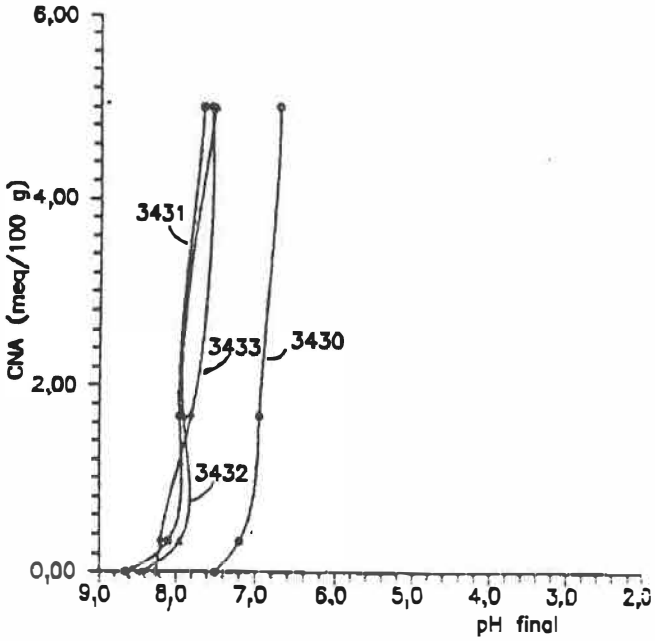


Figure 40. Courbes de CNA du profil 9

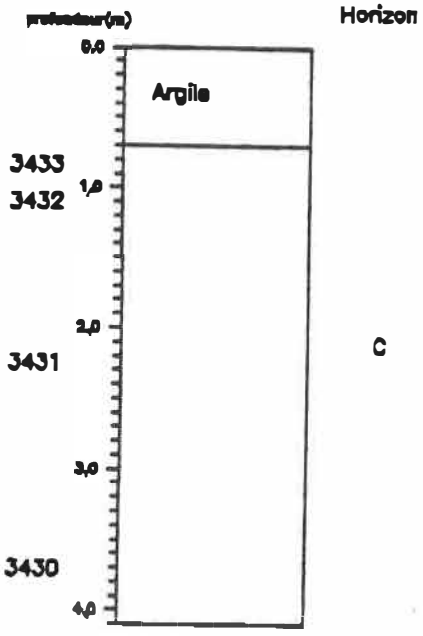


Figure 41. Localisation des échantillons dans le profil 9

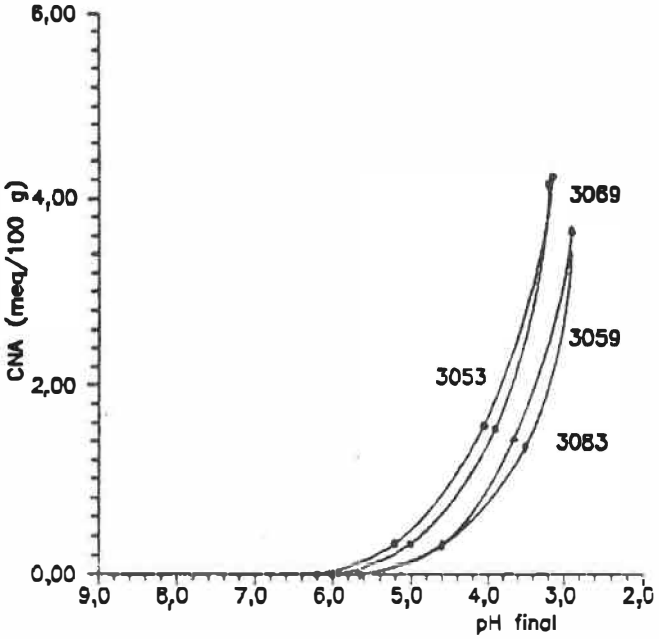


Figure 42. Courbes de CNA du profil 4

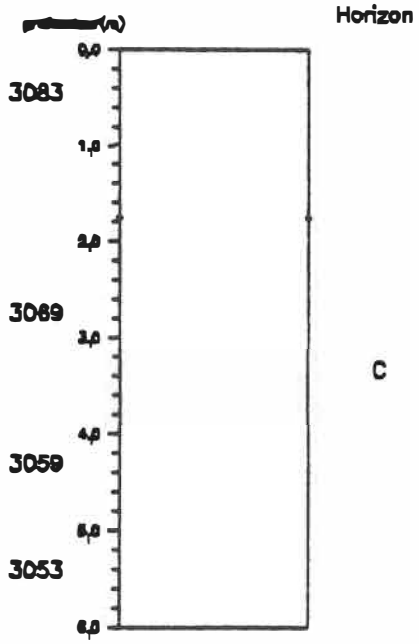


Figure 43. Localisation des échantillons dans le profil 4

similaire et neutralisent peu l'acide. Dans la prochaine section, nous verrons que cette neutralisation se fait au dépend d'une libération accélérée d'aluminium.

4.4 Ions relargués après l'acidification

Afin de mieux comprendre les processus contrôlant la capacité de neutralisation acide des sédiments, certains ions libérés furent analysés à partir du surnageant. Parmi ces ions, seuls le Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} et Al^{+++} furent libérés de façon remarquable après l'addition d'acide H_2SO_4 0,1 N. La concentration d'éléments libérés tel le Mn^{++}, Cu^{++}, Zn^{++}, Cd^{++} était souvent sous la limite de détection de l'appareil.

4.4.1 Calcium et magnésium

Le Ca^{++} et Mg^{++} ont des comportements similaires mais dans un ordre de grandeur moindre pour le Mg^{++}. Plus l'échantillon est acidifié, plus le Ca^{++} et Mg^{++} sont libérés pour neutraliser l'excès d'acide. Les échantillons contenant plus de 3% de $CaCO_3$ (jusqu'à 30%) libèrent en solution en moyenne de 120 à 160 mg/L d'ions Ca^{++} après l'acidification la plus importante (1,5 mL H_2SO_4) (figure 44). Ceci constitue presque deux fois plus d'ions libérés que chez les sédiments non calcareux. La neutralisation complète de 1,5 mL H_2SO_4 nécessite un minimum de 3% de carbonates de calcium dans un échantillon. Au delà de

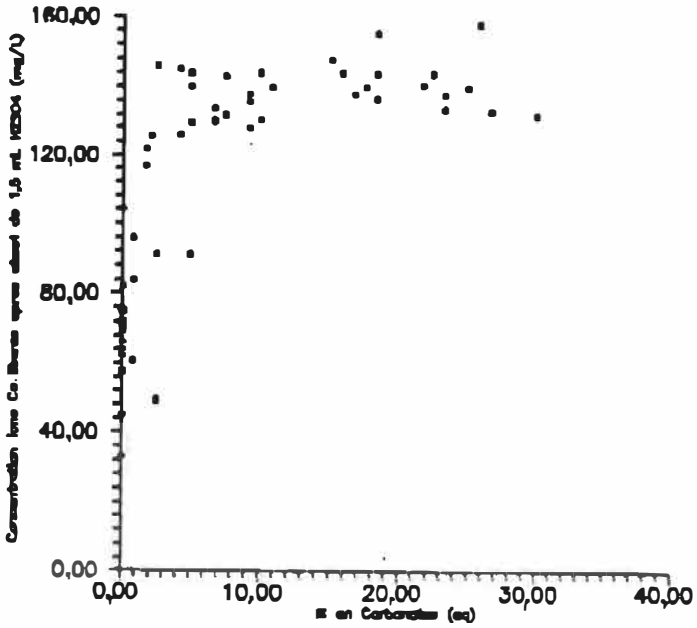


Figure 44. Concentration d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du contenu en $CaCO_3$

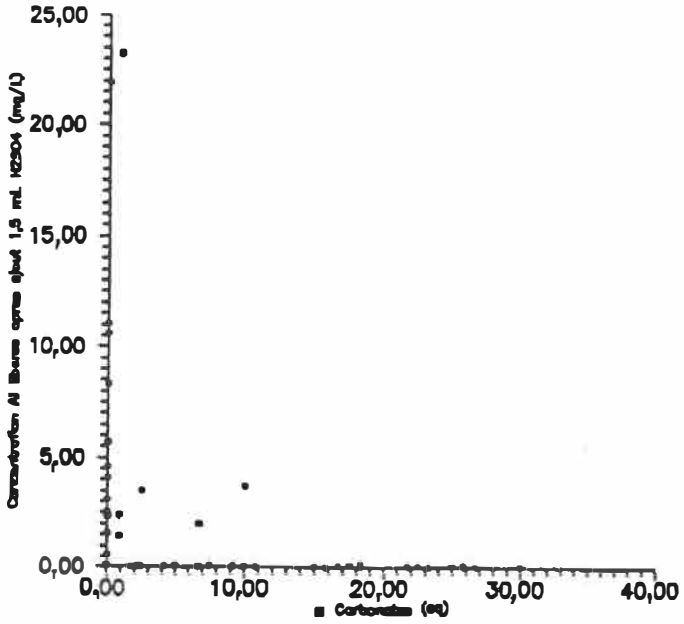


Figure 45. Concentration d'ions Al libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du contenu en $CaCO_3$

cette valeur, un effet plateau est obtenu.

4.4.2 Potassium

Le potassium ne semble suivre aucune règle quant à sa libération. Cette observation fut constatée également par Wilson (1985). Une augmentation de K^+ dans la solution n'est pas nécéssairement associée à une acidification d'un milieu. Enfin, Lee (1984) a démontré que le potassium avait une sensibilité moindre au lessivage à l'acide sulfurique que les cations Mg^{++}, Ca^{++} et H^+.

4.4.3 Aluminium

En général, l'aluminium est libéré en solution si le système est acide et non calcareux (figure 45). Exemption faite des échantillons 2238 et 2224 qui sont faiblement calcareux (0,8%) et qui libèrent de l'aluminium. Une distinction entre la terminologie relarguage et libération d'ions est introduite. Le terme relarguage réfère à la remise en solution d'ions préalablement piégés dans le sédiment. Tandis que la première mise en solution d'ions est surtout défini par la libération, le largage ou la mise en circulation de ceux-ci. Une libération élevée d'aluminium est associée habituellement à une libération faible de Ca^{++} et Mg^{++} (figure 46 et voir #2239 dans l'annexe E). La relation inverse est également vraie (2229 dans l'annexe E). Plus le milieu est acide, plus la mise en

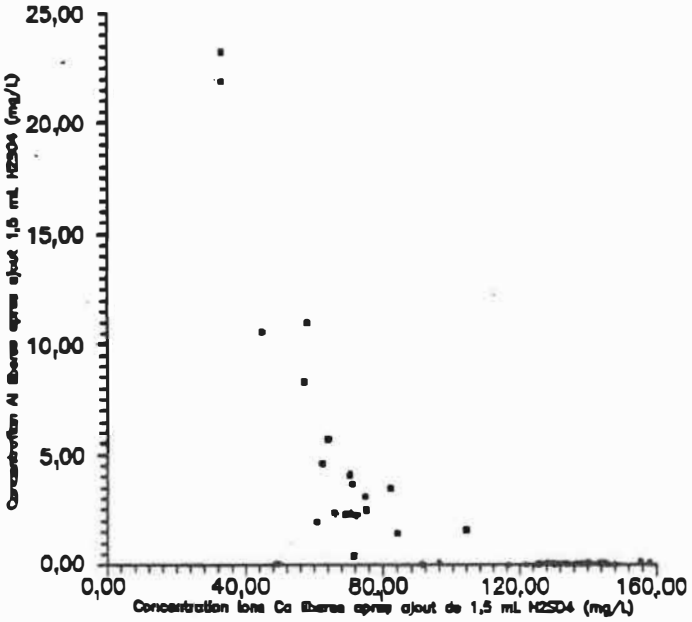


Figure 46. Concentration d'ions Al libérés en fonction d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4

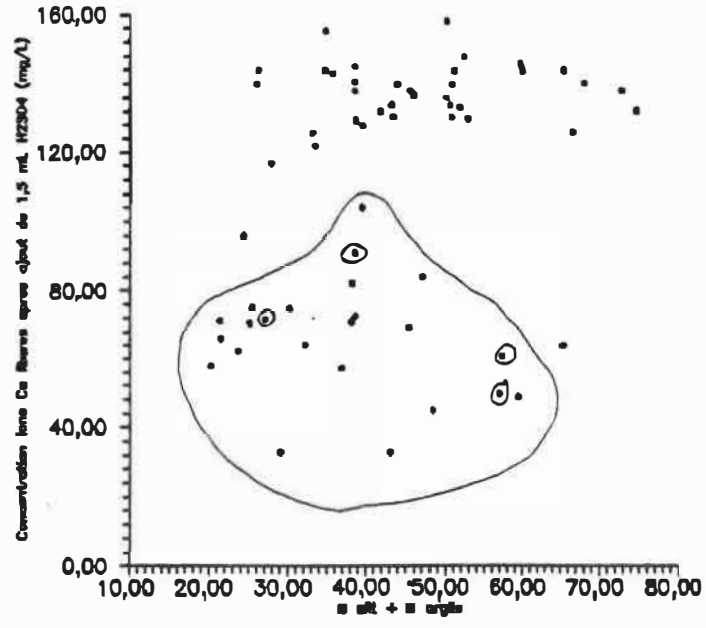


Figure 47. Concentration d'ions Ca libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % de silt et d'argile

circulation d'ions Ca^{++}, Mg^{++}, Al^{+++} est grand. Un till calcareux libère peu d'aluminium même après la plus forte acidification. A l'annexe E, dans certains échantillons, la quantité d'aluminium libérée est élevée lorsque le pH est supérieur à 8 ou inférieur à 4,5. Ce phénomène est relié à la grande solubilité de l'aluminium dans ces intervalles des pH (voir 2205 dans l'annexe D) (Mason, 1966).

4.4.4 Influence de la texture

Les deux graphiques montrant la concentration d'aluminium et de calcium libérés en fonction du pourcentage de silt et d'argile nous renseignent peu sur l'influence de la texture dans leur relarguage. La figure 47 montre deux nuages de points. Celui encerclé correspond aux faibles concentrations de Ca^{++} relargués par les échantillons non calcareux. De même sur la figure 48, les points encerclés ne représentent que l'aluminium libérés par les sédiments non calcareux. Presque tous les sédiments calcareux libèrent peu d'aluminium et sont localisés sur l'axe des abscisses. Aucune tendance ne se dégage de la relation entre les ions libérés et la texture des sédiments. Ces diagrammes ne font que renforcer l'importance de la composition du till dans la libération d'ions après l'acidification.

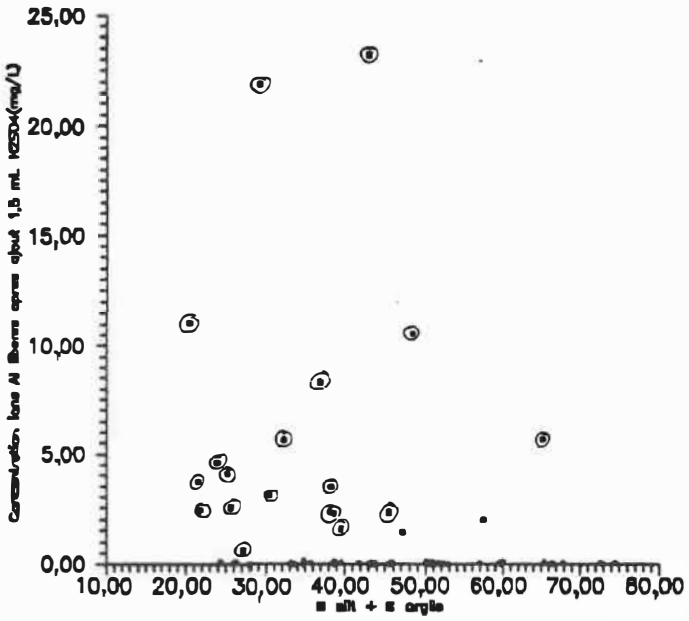


Figure 48. Concentration d'ions Al libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4 en fonction du % de silt et d'argile

4.4.5. Influence des horizons

Les ions libérés selon les différents horizons seront traités en trois catégories comme dans la section précédente. Les diagrammes montrant la libération d'ions en fonction des horizons des profils sont à l'annexe F. Dans les coupes sans lessivage, le sédiment est calcareux et peu d'aluminium est libéré. Le zinc, le cuivre et le cadmium sont en concentration sous la limite de détection. Dans ces profils, les horizons en profondeur libèrent autant d'ions que ceux en surface. Les ions Ca^{++} et Mg^{++} sont relargués de façon constante (après ajout de 1,5 mL H_2SO_4) indépendamment des horizons B et C. Seul le profil no 2 libère davantage de calcium en profondeur.

Le profil non calcareux (no4) après acidification (1,5 mL H_2SO_4) libère plus d'aluminium, surtout en surface. La libération de Cu^{++}, Cd^{++}, Mn^{++}, Zn^{++} est similaire pour tous les horizons. Il est à noter que plus le milieu est acide, plus il favorisera une grande solubilité de tous ces ions.

Les profils ayant subi un lessivage se distinguent par leur libération d'ions selon les horizons. Ils sont calcareux seulement en profondeur. La coupe no 10 libère davantage d'Al^{+++}, Cu^{++}, Zn^{++} en surface pour atteindre de faible concentration en profondeur. De plus, le calcium mis en solution augmente avec la profondeur (où le contenu en $CaCO_3$ est le plus grand). Le site no 6 est similaire mais

le Mg^{++} est davantage libéré en profondeur. Les profils 1 et 5 ont des comportements comparables. Ainsi à la limite des horizons B et C, de plus grandes quantités de Al^{+++}, Zn^{++} et Cu^{++} sont relargués. Ces observations ne sont pas vérifiées dans les autres coupes car les échantillons à ce niveau n'ont pas été analysés.

CHAPITRE 5 - DISCUSSION

5.1 Les relations entre les processus de neutralisation et la granulométrie des sédiments

Dans le chapitre précédent, les diagrammes exprimant les CNA selon la granulométrie ont permis de dégager certaines tendances. Les sédiments argileux et l'argile neutralisent bien l'acide ajouté, indépendamment de leur contenu en carbonates et leur pH initial (exemple 3436 de la figure 28). Leurs courbes de CNA sont caractérisées par de faible variation entre le pH initial et final et ceci se réflète par des courbes presque verticales. Un till argileux non calcareux neutralise mieux l'acide qu'un till sableux non calcareux probablement grâce à sa grande capacité d'échange cationique. En effet, la CEC et la saturation en bases sont élevées chez des sédiments argileux et silteux. Ces sédiments, grâce à leur texture, possèdent de nombreux sites pour l'échange ionique et sont moins susceptibles à l'acidification. Ainsi, la CEC serait un processus de neutralisation en fonction à tout pH.

Les courbes des tills silteux ressemblent à celles des tills argileux mais le till silteux permet une variation de pH légèrement supérieure. Les tills sableux, de par leur faible CEC, neutralisent beaucoup moins bien l'acide. Les CNA des tills sableux parcourent un intervalle de pH plus grand que les tills silteux. La texture est donc une bonne indication de la sensibilité du sol à l'acidification (Lau

et Mainwaring, 1985; Wilson et al., 1986). Ainsi, la granulométrie affecte beaucoup l'allure des courbes, plus particulièrement la base qui sera plus ou moins évasée selon la texture.

Pour mettre en évidence ce phénomène, une moyenne des variations de pH entre 0 et 0,1 mL H_2SO_4 fut compilée. Cette variation reflète en quelque sorte, la capacité neutralisante du sol. L'utilisation de la pente de la CNA serait plus appropriée. Généralement, la CNA (en ordonnée dans le graphique) d'un échantillon à l'autre varie peu comparativement au pH. Pour cette raison, cette approximation semble valable pour caractériser le pouvoir neutralisant du sédiment.

Tableau 6. Variation de pH après l'ajout de 0,1 mL H_2SO_4

TEXTURE	pH (0 et0,1mL)	MIN.	MAX.
Sableux	0,59	-0,1	1,4
Silteux	0,28	0	0,55
Argileux	0,16	0	0,55

Le sédiment sableux a généralement un écart de pH plus grand que le silteux et l'argileux et il possède un pouvoir neutralisant plus faible. Les mêmes observations sont valables pour le silteux comparativement à l'argileux. Cependant certains échantillons ne suivent pas cette règle. Par exemple, les échantillons 3434 de texture argileuse-

silteuse et 3407 et 3417 de texture sableuse-silteuse ont des courbes typiques de sédiments silteux. L'explication de ces anomalies est peut-être reliée à leur composition texturale bi-modale. Leur contenu en carbone organique n'est pas relié à ce phénomène. Les échantillons silteux 2177 et 2205 ont aussi des courbes similaires à des tills argileux.

5.2 Relation entre les processus de neutralisation et les ions libérés

Trois mécanismes de neutralisation des sédiments furent identifiés à partir des ions libérés après l'acidification. Ces mécanismes sont efficaces à divers pH et sont dominants sur d'autres mécanismes en fonction du pH. Ce sont:

1) Le système tampon crée par la dissolution congruente des carbonates.
2) Le système neutralisant des échanges cationiques.
3) Le système tampon de la dissolution incongruente des espèces minérales alumino-silicates.

Les trois mécanismes sont mis en évidence à l'aide d'un graphique exprimant la variation de pH (initial et final) en fonction du pH initial. Tel que discuté précédemment, la variation de pH représente la capacité de neutralisation du sol. Le pH initial (avant acidification) est mis en abscisse car les processus de neutralisation lui sont étroitement reliés.

Il semble nécéssaire de distinguer les comportements des sédiments sableux des tills silteux et argileux car leur mécanismes de neutralisation agissent différemment. Les figures 49 pour les échantillons sableux (plus de 56% de sable) et 50 pour les sédiments silteux et argileux ont permis de distinguer leurs mécanismes de neutralisation. Dans les figures, deux droites verticales (à un pH de 7,5 et 5,5) séparent les zones d'action de ces processus. Les limites ne sont pas des divisions absolues car deux systèmes de neutralisation peuvent opérer simultanément.

La dissolution de minéraux carbonatés est une réaction rapide et efficace. Le calcium est libéré et l'échange ionique permet d'enrayer la chute du pH. Par contre, un milieu riche en dolomites ($Ca\text{-}Mg(CO_3)_2$) libèrera davantage de Mg en solution. La neutralisation se produit par une réduction du contenu en $CaCO_3$ (Bache, 1980b). Alors, peu de changements majeurs dus à l'acidification se produiront dans un tel sol (Vanloon et al., 1987). Il y a tamponnement de l'acidification par le système carbonaté qui opère approximativement à un pH se situant entre 9 à 7,5. Bache (1980a) affirme que le pH ne sera pas inférieur à 6,5-7,0 tant que tout le carbonate ne sera pas dissous. Le système carbonaté pour le till sableux tamponne efficacement l'acidité tout en limitant les variations de pH à 1,9 unité (figure 49). La présence de carbonate de calcium est rare à des pH inférieurs à cet intervalle. Dans cette figure, tous

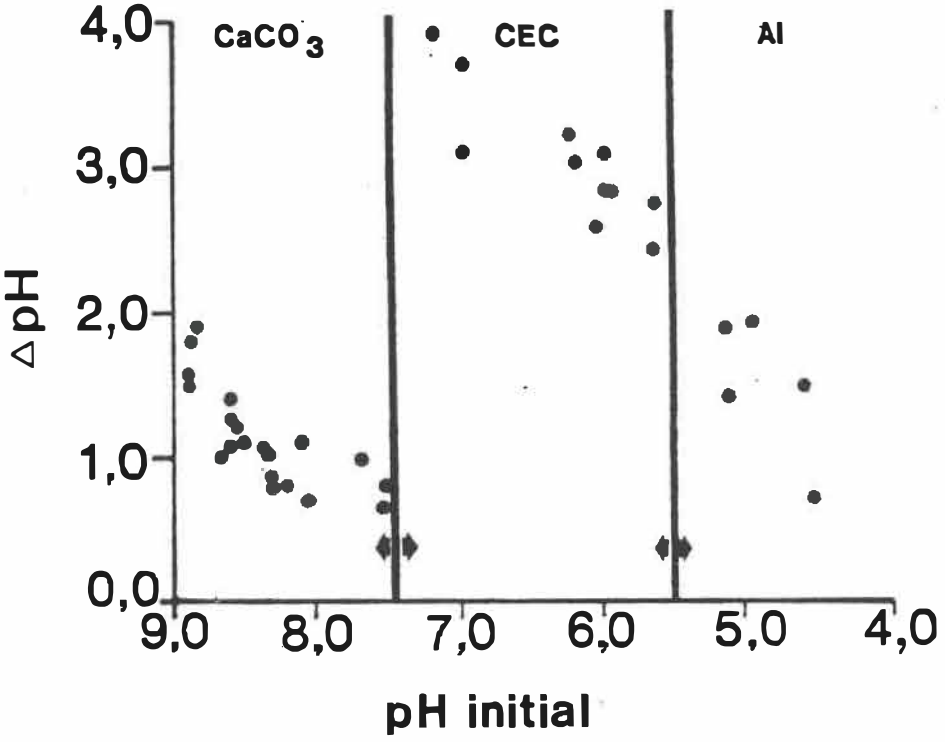


Figure 49. Variation du pH (0 et 1,5 mL H_2SO_4) en fonction du pH initial pour les tills sableux

les sédiments ayant un pH supérieur à 7,5 sont non calcareux. Le même diagramme (figure 50) pour les échantillons silteux et argileux (56% sable) montre des résultats plus ou moins similaires. Presque que tous les échantillons sont calcareux à l'exception de ceux ayant un pH initial inférieur à 5,5. Le système carbonaté pour ces sédiments est très efficace. Il est probablement combiné à l'action de la CEC qui favorise une plus grande neutralisation. En effet, la variation de pH se limite à 1,3 unité comparativement à 1,9 pour les sédiments sableux.

Certains sols sont démunis de minéraux carbonatés et leurs processus de neutralisation se limitent à la CEC et la mobilisation de l'aluminium (Bache, 1986). La CEC est un processus dépendant du pH et les bases adsorbées varient selon le milieu (alcalin ou acide). Les bases adsorbées comme le Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} et Na^{+} sont en grande quantité dans les sols à pH élevé alors que l'hydrogène et l'aluminium sont dominants dans des sols acides (Petersen, 1986). Les protons H^{+} sont échangés avec les cations adsorbés lors de la neutralisation. Ainsi la CEC opère à tous les pH mais est plus efficace entre 5,5 et 7,5. Selon Bloom et Grigal (1985) à un pH supérieur à 5, la neutralisation par la CEC est plus grande que par l'altération des minéraux. Le till sableux possédant une faible saturation en bases comparativement aux silteux et argileux neutralise faiblement entre 5,5 et 7,5. Des variations maximales de pH jusqu'à

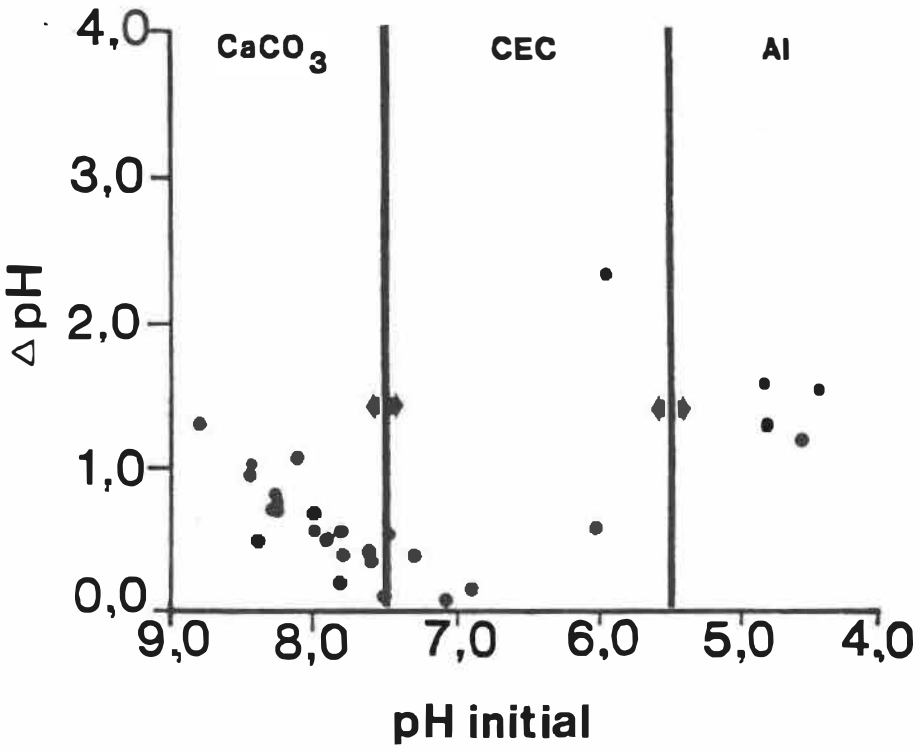


Figure 50. Variation du pH (0 et 1,5 ml H_2SO_4) en fonction du pH initial pour les tills siteux et argileux

3,9 unités sont observées pour les sédiments sableux (figure 49). Le champ d'action efficace pour la CEC montre des résultats pour les sédiments siteux et argileux (figure 50) qui contrastent avec ceux sableux. Ce processus de neutralisation (combiné à la dissolution du $CaCO_3$) empêche des variations de pH supérieures à 0,5 unité. Toutefois, le pH d'un échantillon (2224) a varié de 2,2 unités. Ce sédiment possède une granulométrie bi-modale entre silteux et sableux. Si on le représente dans la figure 49, il montre une neutralisation plus grande que les autres sédiments sableux dans cet intervalle de pH. Son type de granulométrie est donc la raison de sa non conformité.

La mobilisation de l'aluminium résulte du fait que les ions aluminium adsorbés (sol acide) sont mis en solution par l'acidification (relarguage) et provient aussi des ions issus de la dissolution des minéraux alumino-silicatés. La mobilisation de l'aluminium est très efficace à de pH faibles (inférieur à 5,5) et relâche beaucoup d'aluminium en solution. Selon Bache (1980a), la mobilisation de l'aluminium se produit dans l'intervalle de pH de 3,5 à 5,5 et neutralise l'acidité. A un pH inférieur à 5,5, où la mobilisation de l'aluminium est efficace, les variations de pH sont moins importantes. La neutralisation entraîne de fortes libérations d'aluminium (jusqu'à 23,35 mg/L). A un pH inférieur à 4, les substances composées d'aluminium

abondent dans le sol et empêchent le pH de diminuer davantage, tamponnant à son tour l'acidité (Petersen, 1986). Ce processus pour les sédiments sableux, limite les écarts de pH à plus de deux unités mais peut par contre contaminer le milieu par la mise en circulation d'aluminium. Dans la figure 50, la mobilisation de l'aluminium pour les sédiments silteux et argileux s'accompagne d'une libération d'aluminium deux fois plus faible que pour les sédiments sableux.

Les différents processus de neutralisation sont plus efficaces chez les sédiments argileux et silteux .

5.3 Les processus de neutralisation selon les profils

La capacité tampon est fortement influencée par la composition des sédiments et de leur pH. Les profils neutralisent par des processus différents dépendamment s'ils sont podzolisés ou non.

Les profils non lessivés, couverts ou non d'argile, sont calcareux. Protégés du lessivage et de l'acidification, les sédiments sous-jacents ont une capacité tampon excellente. Le till neutralise surtout par la dissolution des carbonates tandis que l'argile utilise une combinaison de la CEC et de la dissolution des carbonates.

Le profil non calcareux est acidifié naturellement. A un pH supérieur à 4,5, le sédiment a une faible capacité de neutralisation. Dès qu'il atteint ce pH, la mobilisation de

l'aluminium contrôle l'acidification en libérant beaucoup d'aluminium. Aubertin (1988) a observé que les échantillons provenant de l'horizon B_1 neutralisait les acides plus efficacement que ceux prélevés dans l'horizon C. Cette observation n'a pu être vérifiée dans notre étude car l'horizon B était manquant à ce site.

Finalement, l'acidification des horizons dans un profil lessivé est contrée par une combinaison des trois processus de neutralisation. Les échantillons pris sous la zone de lessivage des carbonates neutralisent l'acidité grâce à la dissolution des carbonates. Une grande libération de calcium y est associée. En surface, ces profils sont composés de sols acidifiés qui neutralisent l'apport d'acide par l'attaque des minéraux alumino-silicates avec la mobilisation conséquente de l'aluminium. Un phénomène intéressant se produit à la limite de l'horizon B et C; il est réflété dans le profil no 1. À ce niveau, le sédiment est non calcareux et sableux (3010). La CNA de cet échantillon est situé dans un grand intervalle de pH de 3,9 unités (7 à 3,1) suggérant que la CEC est peu efficace. Des ions tels le calcium, le zinc et le cuivre sont libérés à une faible acidification. Encore une fois, dès que le pH atteint les environs de 4,5 une libération importante d'aluminium se produit dû à la mobilisation de l'aluminium.

5.4 Comparaison des CNA des coupes de la région

Afin de comparer les profils entre eux, une courbe moyenne arithmétique de CNA de chaque site fut calculée. Cette approximation représente la sensibilité globale des tills présents dans cette coupe.

Dans la figure 51 a et b , trois comportements sont observés. La coupe no 4, étant seule dans sa catégorie, est considérée comme très sensible. Rappelons que les échantillons prélevés à ce site contiennent un till sableux et non calcareux. Presque tout le nord-ouest de la province du Manitoba est couvert de ce sédiment. La neutralisation s'y effectue presqu'exclusivement par la mobilisation de l'aluminium.

Les sites 1, 5 et 6 ont une sensibilité intermédiaire. Ce sont les profils ayant subi un lessivage. La CNA moyenne de chacune de ces coupes est une combinaison de la CNA du till calcareux en profondeur et du till non calcareux en surface. Le nombre d'échantillons en profondeur et en surface est équivalent ce qui rend la moyenne représentative du site.

Les coupes 7 et 10 ont un pouvoir neutralisant intermédiaire à élevé. Le site 10 (lessivé) pourrait appartenir à la catégorie précédente car il est composé de deux échantillons neutralisant en profondeur et d'un peu neutralisant en surface. La moyenne de CNA est ainsi biaisée.

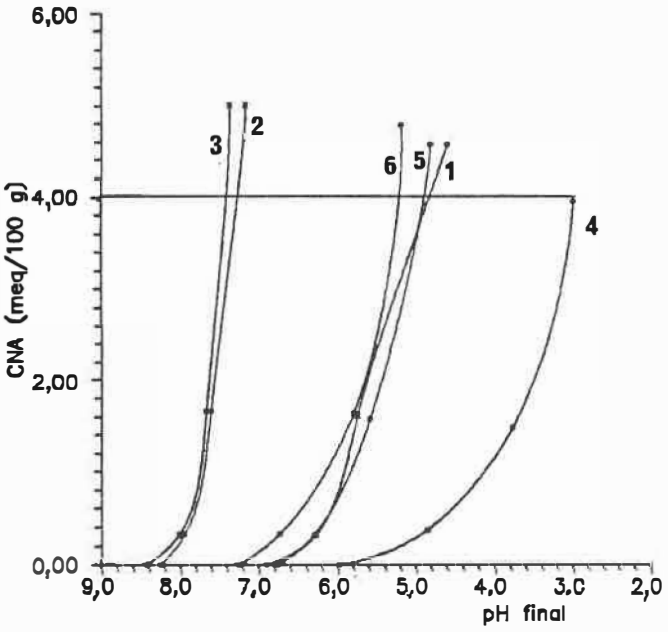


Figure 51a. Courbes moyennes des CNA des profils 1 à 6

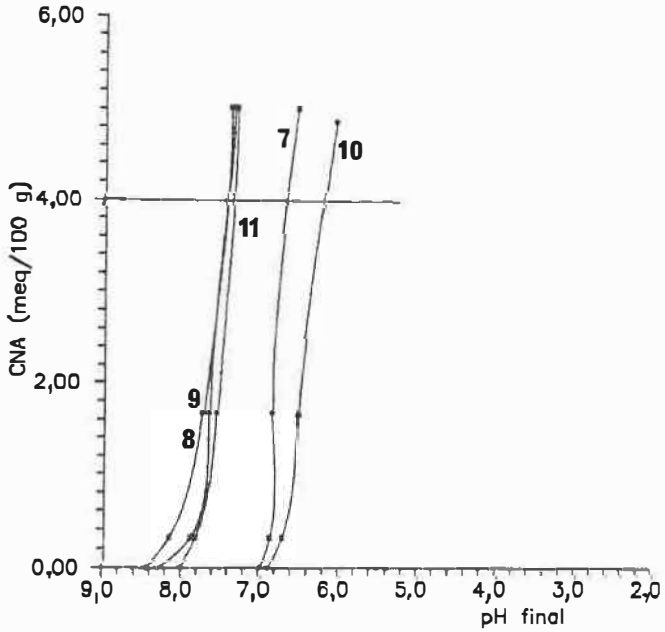


Figure 51b. Courbes moyennes des CNA des profils 7 à 11

Les sites 2, 3, 8, 9 et 11 sont peu sensibles aux précipitations acides. Ces profils non lessivés sont recouverts en majorité d'argile. Ces coupes sont protégées des processus de podzolisation. Le seul désavantage de cette protection est l'imperméabilité qui empêche la pénétration de l'eau dans le sol favorisant l'échange ionique. Malheureusement aucune mesure d'infiltration ne fut prise pour ces sites mais il est à prévoir, pour de tels sites, une infiltration quasi nulle.

5.5 CORRELATIONS MULTIPLES

Afin de faire ressortir les relations entre les variables et montrer leur importance dans la capacité tampon de sédiments, une matrice de corrélation fut effectuée (tableau 7). Les variables à l'étude sont: le % en sable, le % en silt, le % en argile, le % $CaCO_3$, la variation de pH (après l'ajout de 0 à 1,5 ml d'acide sulfurique), le pH initial et la concentration d'ions Ca^{++} et Al^{+++} libérés après l'ajout de 1,5 mL H_2SO_4.

Une forte corrélation entre la variation de pH et le % de sable montre que le sable offre au sédiment un faible pouvoir tampon. Une corrélation négative entre le contenu en argile et en silt avec la variation de pH montre l'importance des fines particules dans la neutralisation. Une corrélation négative du même ordre s'établit entre le % $CaCO_3$ et les ions Ca^{++} libérés confirme la neutralisation

TABLEAU 7. Matrice de corrélations multiples

	% sable	% silt	% argile	% $CaCO_3$	▲pH	pH initial	Al+++	Ca++
% sable	1	-0,843518	-0,782406	-0,522641	0,624332	-0,16764	0,216807	-0,301113
% silt	-0,843518	1	0,351431	0,511008	-0,586836	0,308099	-0,250487	0,459112
% argile	-0,782406	0,351431	1	0,290533	-0,413143	-0,051322	-0,0947409	6.63353E-3
% $CaCO_3$	-0,522641	0,511008	0,290533	1	-0,532234	0,557301	-0,367983	0,695021
▲pH	0,624332	-0,586836	-0,413143	-0,532234	1	-0,408935	0,239961	-0,513901
pH initial	-0,16764	0,308099	-0,051322	0,557301	-0,408935	1	-0,646435	0,828152
Al+++	0,216807	-0,250487	-0,0947409	-0,367983	0,239961	-0,646435	1	-0,651538
Ca++	-0,301113	0,459112	6,63353E-3	0,695021	-0,513901	0,828152	-0,651538	1

obtenue par la dissolution de carbonates. Ces relations démontrent que la fraction granulométrique inférieure à 63 um et le contenu en carbonates agissent de façon également efficace dans la neutralisation.

De plus, une autre corrélation (0,83) positive existe entre les ions Ca libérés et le pH initial. La relation est toutefois moins grande avec le % en $CaCO_3$. Nous pouvons conclure que le pH du sédiment est intimement relié à la présence de carbonates dans celui-ci. Tel que prévu, les ions Al^{+++} libérés sont négativement corrélés avec le pH initial.

Enfin, une corrélation négative entre les ions Ca^{++} et Al^{+++} libérés prouvent que deux processus différents contrôlent la neutralisation mais à des niveaux différents (la même relation est observée entre le % $CaCO_3$ et Al^{+++}). Ainsi, un sédiment riche en carbonates neutralisera à un pH plus élevé que l'aluminium et libérera beaucoup de calcium. Inversement un sédiment peu carbonaté libérera de l'aluminium pour contrôler le pH. Les corrélations démontrées confirment les résultats obtenus dans cette étude.

5.6 Comparaison des CNA moyennes avec d'autres régions

Une échelle de sensibilité fut développée par Wilson et al. (1986) pour quantifier la sensibilité de diverses régions aux précipitations acides. Une CNA de 4,0 meq/100g associée à un pH final (estimé sur la courbe de CNA moyenne

d'un site) fut choisie comme valeur standard. Cette dernière correspond à deux critères établis par Wilson et al. (1986): premièrement, elle est la valeur la plus proche de la CNA correspondant au pH final le plus faible de chaque échantillon; et deuxièmement, elle appartient à la portion de la courbe la plus droite minimisant ainsi les erreurs d'extrapolation.

Tableau 8. Echelle de sensibilité des sites en fonction de leur CNA exprimée selon le pH final à une CNA standard de 4,0 meq/100g de sédiments.

Site		pH
#	Nom	
3	Notigi	7,5
8	South Seal I	7,45
9	0199	7,45
11	South Seal II	7,4
2	Hughes River	7,3
7	Wheatcroft	6,7
10	0192	6,2
6	One Island	5,2
5	Eden Lake	4,95
1	Hall Lake	4,85
4	Cartwright	3,0

Nous comparerons notre région à des sédiments glaciaires du lac Kempt, Québec (Aubertin, 1988), de l'ouest de l'Ungava, Québec (Wilson ,1985), de la région du lac Mégantic, Québec, de la région de Chibougamau-lac Mistassini, Québec (Wilson et al., 1986), de la région de Thetford Mines, Québec et du sud de l'Ontario (Wyatt, 1984). Nous reprendrons les grandes lignes de la com-

paraison des sites effectuée par Aubertin (1988) en y incluant nos résultats (Wilson et al., 1986) (figure 52). Les trois classes de sensibilité sont les suivantes:

La première, de faible sensibilité (pH supérieur à 7), comprend un diamicton fossilifère de l'Ungava et un till calcareux et silteux du nord du Manitoba provenant des coupes non lessivées.

La deuxième classe (4,5 à 7,0) contient un till calcareux à grain fin de Thetford Mines, un till dolomitique (jusqu'à 20% en carbonates) de la région du lac de Mistassini, des sédiments fossilifères de l'Ungava et les tills des coupes lessivées en carbonates calcareux seulement en profondeur.

Troisièmement, la classe de sensibilité élevée englobe 1) tous les sites du lac Kempt démunis de carbonates et majoritairement sableux; 2) un till sableux et quartzitique de la région du lac Mistassini; 3) un till sablonneux de l'Ontario; 4) les sédiments sableux de la région de l'Ungava; 5) un till sableux à faible contenu en carbonates et 6) un till non calcareux et sableux du Manitoba.

5.7 Evaluation de la méthode

Cette méthode s'avère efficace pour déterminer la capacité de neutralisation acide des sédiments. Elle possède deux grandes qualités: elle est rapide et ses

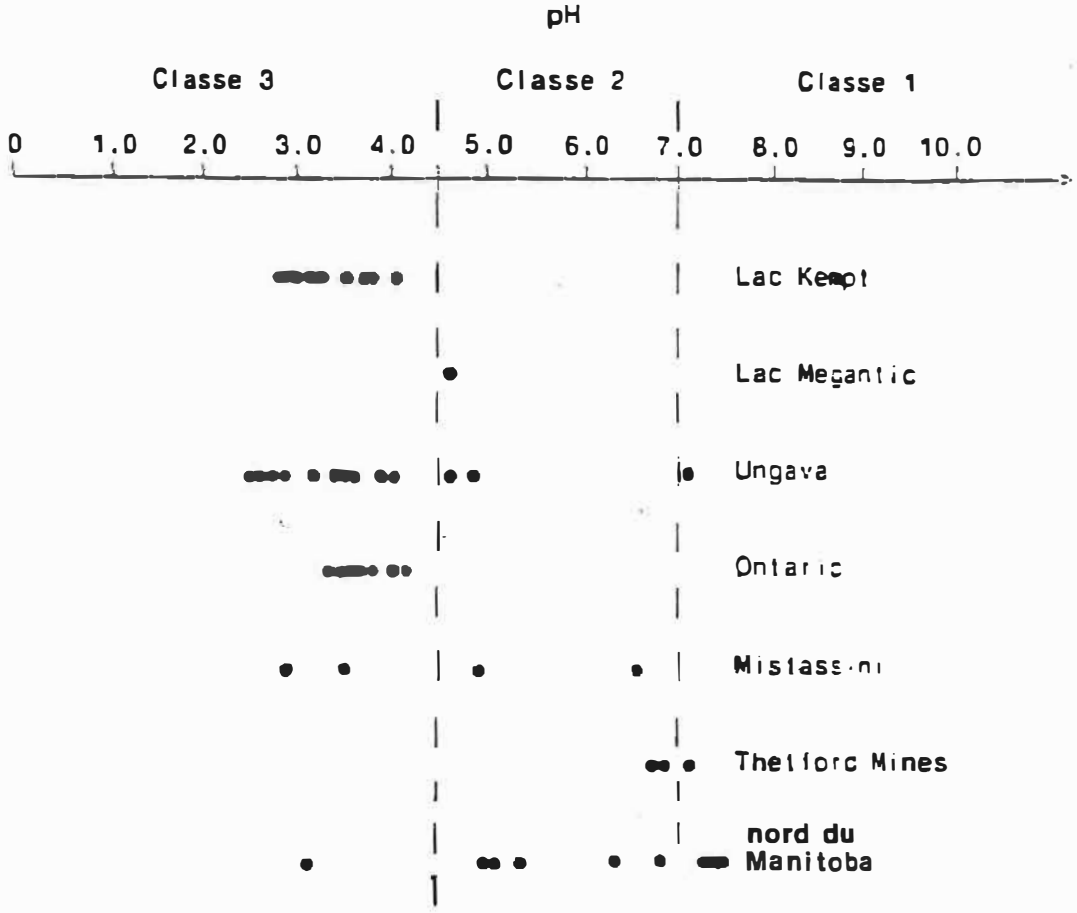


Figure 52. Echelle comparative de la sensibilité des sites des régions du nord du Manitoba, du lac Kempt, du lac Mégantic, d'Ungava, Ontario, Mistassini et Thetford Mines exprimée selon le pH final en fonction d'une CNA standard de 4,0 meq/ 100g de sédiments.

résultats mis sur graphique sont facilement interprétables. Cependant, de petites améliorations pourraient être apportées et permettraient d'imiter davantage la nature. Certains auteurs croient qu'une simulation à court terme n'est pas valable pour comprendre l'ampleur du problème (Bache, 1980a). Nous croyons au contraire qu'il n'est pas réaliste de détailler la capacité de neutralisation des sols de toutes les régions du Canada par des études d'une durée de cinq à dix ans et qu'une méthode comme celle utilisée ici doit être utile. Au terme d'une discussion avec Kaszycki, nous suggérons quatre améliorations dont trois sont des modifications mineures du protocole expérimentale.

1) L'acidification cumulative consiste à récupérer le sédiment ayant subi une première acidification (0,1 mL d'acide), le laver et le réacidifier avec 0,5 mL et ainsi de suite. Bien que cela prolongerait les analyses (trois jours au lieu de un) la méthode permettrait d'observer un lessivage des cations du sol plus conforme aux phénomènes natururels.

2) L'acidification réaliste serait préférable. Une simulation de précipitations acides devrait s'effectuer en considérant le pH et la composition des précipitations naturelles de la région à l'étude (Abrahansen, 1980). Dans notre cas avec 0,1 mL H_2SO_4 0,1 N, nous fournissions une concentration de SO_4 seize fois plus

grande que les pluies naturelles. Pour bien assimiler les réactions lors de l'acidification du sol, une concentration de 0,01 N aurait été suffisante. Un élément d'importance à évaluer est la superposition de l'acidification naturelle (non négligeable dans les forêts de conifères) à celle anthropogénique pour déterminer cette concentration. Il serait aussi intéressant de comparer les résultats obtenus d'une telle simulation avec ceux provenant d'une simulation de précipitations acides dans les régions les plus touchées. Ainsi l'acidification du sol avec 0,1 N et 0,01 N nous permettrait d'extrapoler les conditions actuelles aux situations futures et d'évaluer les dangers encourus par le milieu si l'acidité des précipitations devait augmenter.

3) Il serait intéressant de détailler les parties critiques de la courbe, en utilisant des volumes d'acide intermédiaires (entre 0 et 0,1 mL), puisqu'il semble que la texture influence l'allure de la courbe spécialement à sa base. Une relation entre la granulométrie et les processus de neutralisation serait peut évidente.

4) Finalement lors de l'échantillonnage, la mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol (telle qu'effectuée par Wilson et Aubertin) est critique pour interpréter les résultats de la CNA (Wilson et al., 1986, Booty et Kramer, 1984)

CONCLUSION

Le pouvoir tampon du sol est intimement relié à sa composition et à son pH. Le contenu en carbonates et la capacité d'échange cationique (CEC) des sédiments sont les processus de neutralisation les plus efficaces. Le contenu en matière organique, la perméabilité des sols, ses structures ainsi que le couvert végétal sont des caractéristiques non négligeables dans la capacité de neutralisation acide (CNA) mais ils ne furent pas considérés dans notre étude.

Grâce à la grande variété d'échantillons, nous avons examiné l'importance de divers mécanismes de neutralisation. La dissolution des carbonates est un des plus importants et il est efficace ,en général, à un pH supérieur à 7,5. Un sédiment calcareux aura un pouvoir tampon élevé indépendamment de sa texture. Même une quantité infime de carbonates (moins de 1%) neutralisera l'acidité d'un sol.

La CEC très efficace dans un intervalle de pH de 5,5 à 7,5 dépend de la texture du sédiment. Ainsi, un till sableux non calcareux neutralise les acides moins efficacement qu'un sédiment argileux non calcareux.

La mobilisation de l'aluminium est efficace à un pH inférieur à 5,5 . Elle freine la chute du pH en libérant les ions aluminium. Cette neutralisation n'est pas désirable car elle engendre le problème de la contamination de l'eau et du milieu par l'aluminium.

Au Manitoba, les glaciers ont laissé des dépôts qui jouent un grand rôle dans la neutralisation des précipitations acides malgré qu'ils reposent sur une roche sensible (Bouclier). Ces dépôts proviennent de deux sources: le lobe du Keewatin (NO) et le lobe de l'Hudson (NE). Le till de l'Hudson est riche en carbonates comparativement à celui du Keewatin. Ainsi, le nord ouest du Manitoba composé d' un till sableux pauvre en carbonates est très sensible aux précipitations acides (Wotton et Haluschak, 1986). Tandis que l'est de la province, constitué de sédiments silteux calcareux, possède une bonne protection contre ces dernières.

Une étude comparative avec d'autres régions démontre que le Manitoba possède, en général, un sensibilité faible à intermédiaire aux précipitations acides. Cependant, le lac post-glaciaire Agassiz par ses dépôts de couches d'argile et de silt sur les tills, a affecté négativement les propriétés hydrologiques du sol. L'argile favorisant l'eau de ruissellement peut empêcher le till de neutraliser l'acidité. Une étude subséquente pourrait démontrer l'influence de cette argile sur la capacité tampon de ce sol et vérifier les conclusions de notre étude.

BIBLIOGRAPHIE

ABRAHANSEN, G., HOLVAND, J., HAGVA, S., (1980), Effects of Artificial Rain and Liming on Soil Organisms and the Decomposition of Organic Matter. Dans: Effects of Acid Precipitations on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 341-362.

AGRICULTURE CANADA, (1987), Le système canadien de classification des sols. (2ème Edition). Agric. Canada publ. 1646. 170 pages.

ANDERSSON, F., (1986), Acidic Deposition and its Effects on the Forests of Nordic Europe. Water, Air and Soil Pollution. 30:17-29.

APRIL, R., NEWTON, R., (1985), Influence of Geology on Lake Acidification in the Ilwas Watersheds. Water, Air and Soil Pollution. 26:373-386.

AUBERTIN, A., (1988), Sensibilité aux Précipitations Acides des Sédiments d'Origine Glaciaire de la Région du Lac Kempt. mémoire de M.Sc.A.. Ecole Polytechnique de Montréal. 148 pages.

BAATH, E., BERG, B., LOHM, U., et al., (1980), Soil Organisms and Litter Decomposition in a Scots Pine Forest. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 375-380.

BACHE, B.W., (1986), Aluminium Mobilization in Soils and Waters. Journal of the Geological Society. 143: 699-706.

BACHE, B.W., (1980a), The Acidification of Soils, Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M. (eds). 183-202.

BACHE, B.W., (1980b), The Sensitivity of Soils to Acidification, Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M. (eds). 569-572.

BERNIER, B., BRAZEAU, M., (1986), Un patrimoine en détresse. Ministère de l'Energie et des Ressources du Québec.

BEZAK, D., RAE, T.M., (1987), Manitoba Network for Precipitation Collection (MNPC) Data Summary-1984. Manitoba Department of Environment and Workplace Safety and Health, Air Standards and Studies Section. Rapport no 87-2. 44 pages.

BISSON, M., (1986), Introduction à la Pollution Atmosphérique. Les Publications du Québec. 135 pages.

BLOOM, P.R., GRIGAL, D.F., (1985), Modeling Soil Response to Acidic Deposition in Nonsulfate Adsorbing Soils. Journal of Environmental Quality. 14: 489-495.

BOOTY, W.D., KRAMER, J.R., (1984), Sensitivity Analysis of a Watershed Acidification Model. Philosophical Transactions of the Royal Society London. Partie B, vol. 305, 441-449.

BRADY, N.C., (1974), The Nature and Property of Soils. Macmillan Publications, New-York.

DELISLE, C.E., BOUCHARD, M.A., ANDRE, P., (1986), Les Précipitations Acides et leurs Effects au Nord du 55e Parallèle au Québec. Rapport final présenté à la Fondation Canadienne Donner, Montréal, 280 pages.

DREDGE, L.A., NIXON, F.M., RICHARDSON, R.O., (1986), Quaternary Geology and Geomorphology of Northwestern Manitoba. Geological Survey Memoir 418. 38 pages.

EDMUNDS, W.M., KINNIBURGH, D.G., (1986), The Susceptibility of UK Groundwaters to Acidic Deposition. Journal of the Geological Society, London. 143: 707-720.

ENVIRONNEMENT CANADA, (1986), Emissions des principaux polluants atmosphériques au Canada et tendances (1970 à 1980). Rapport SPE 7/AP/17. 154 pages.

ENVIRONNEMENT MANITOBA, (1985), Acid Rain, Manitoba's Commitment to Action. 16 pages.

FENCO ENGINEERRS LTD, (1985), Investigation of Environmental Effects of Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Smelters. Rapport produit pour Environnement Canada.

GROUPE DE RECHERCHE EN GEOLOGIE DE L'INGENIEUR (GRGI), (1986), Hydrogéologie des contaminants. Notes de cours (GGL-A000098) de l'Université Laval. 163 pages.

HORNBROOK, E.H.W., KETTLES, I.M., SHILTS, W.W., (1986), Geochemistry of Aquatic and Terrestrial Sediments, Precambrian Shield of Southern Ontario. Water, Air and Soil Pollution. 31: 969-979.

JACQUES, G., BOULET, G., (1986), Réseau d'Echantillonnage

des Précipitations Acides du Québec, Sommaire des Données de la Qualité des Eaux de Précipitations. Gouv. du Québec. Précipitations Acides QEN/PA-31/1. 77 pages.

KASZYCKI, C.A., (1989), Surficial Geology and Drift Composition in North West Manitoba. (en préparation).

KASZYCKI, C.A., DILABIO, R.N.W., (1986), Surficial Geology and Till Geochemistry, Lynn Lake-Leaf Rapids Region, Manitoba. Dans: Currrent Research, Part B, Commission Géologique du Canada, Paper 86-1B, 245-256.

KASZYCKI, C.A., SUTTNER, W., DILABIO, R.N.W., (1988), Gold and Arsenic in Till, Wheatcroft Lake Dispersal Train, Manitoba. Dans: Current Research, Part C, Commission Géologique du Canada, Paper 88-1C, p 341-351.

KLASSEN, R.W., (1986), Surficial Geology of North-Central Manitoba, Commission Géologique du Canada, mémoire 419. 33 pages.

KLASSEN, R.W., (1976), Landforms and Surface Materials at Selected sites in a Part of the Shield-North-Central Manitoba. Commission Géologique du Canada, Paper 75-19, 41 pages.

KRAMER, J.R., BOOTY, W.G., STROES, S., (1979), Acid Neutralizing Capacity of Fine Soil Fractions. Dans: Atmospheric Pollutants in Natural Waters. S.J. Eisenrich (ed), Ann Arbour Science, Ann Arbour, Michigan. 327-337.

KRUG, E.C., FRINK, C.R., (1983), Acid Rain on Acid Soil: A New Perspective. Sciences. 21: 520-525.

LAU, W.M., MAINWARING, S.J., (1985), The Determination of Soil Sensitivity to Acid Deposition. Water, Air and Soil Pollution. 25: 451-464.

LEE, J.L., (1984), Effect of Simulated Sulphuric Acid Rain on the Chemistry of Sulphate-Adsorbing Forest Soil. Water, Air and Soil Pollution. 25:185-193.

MASON, B., (1966), Principles of Geochemistry, (3th Edition). John Wiley and Son Inc., 329 pages.

McEACHERN, D.B., PHILLIPS, S.F., (1987), Heavy Metal and Sulphate Deposition in Snow, Thompson, Manitoba 1982-1985. Rapport #88-1, Terrestrial Standards and Studies, Department of Environment and Workplace Safety and Health, Manitoba. 38 pages.

PETERSEN, L., (1986), Effects of Acid Deposition and Sensitivity of the Soil to Acidification. Experientia. 42: 340-344.

PETERSEN, L., (1980), Podzolization: Mechanism and Possible Effects of Acid Precipitation. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M. (eds). 223-237.

RAE, T.M., (1985), Manitoba Network for Precipitation Collection (MNCP) -an Overview-. Manitoba Department of Environment and Workplace Safety and Health, Air Standards and Studies Section. Rapport no 85-07. 17 pages.

REUSS, O., COSBY, B.J., WRIGHT, R.F., (1987), Chemical

Processes Governing Soil and Water Acidification. Nature. 29: 27-31.

ROBERTS, T.M., (1980), Effects of Soil Acidity on Nutrient Availability and Plant Response. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 597-579.

ROBERTS, T.M., CLARK, T.A., INESON, P., GRAY, T.R., (1980), Effects of Sulphur Deposition on Litter Decomposition and Nutrient Leaching in Coniferous Forest Soil. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 381-393.

RICHARDSON, D.J., OSTRY, G., (1987), Gold Deposits of Manitoba, Economic Geology. Manitoba Energy and Mines, Minerals Division. Report ER86-1.

SANDHU, H.S., BLOWER, L., (1986), Acid-Forming Emissions in Alberta, Canada. Environmental Management. 10: 689-695.

SEIP, H.M., FREEDMAN, B., (1980), Effects of Acid Precipitation on Soils. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 591-596.

SHEWCHUK, S.R., (1982), An Acid Deposition Perpective for Northeastern Alberta and Northern Saskatchewan. Water, Air and Soil Pollution. 18: 413-419.

SHILTS, W.W., CARD, K.D., POOLE, W.H., SANFORD, B.V., (1981), Sensibilité de la roche en place aux précipitations acides: modifications dues aux phénomènes

glaciaires. C.G.C. étude 81-14, 7 pages.

VANLOON, G.W., (1984), Acid Rain and Soil. Canadian Journal Physiol. Pharmacol. 62: 991-997.

VANLOON, G.W., HAY, G.W., GOH, R., (1987), Analysis of Sulphur-Containing Components of a Soil Treated with Simulated Acid Rain. Water, Air and Soil Pollution. 34: 233-240.

WIKLANDER, L., (1980), The Sensitivity of Soil to Acid Precipitation. Dans: Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosytems. Hutchinson, T.C., Havas, M., (eds). 553-567.

WILSON, H., (1985), Sensibilité aux Précipitations Acides des Sédiments d'Origine Glaciaire de la Partie Ouest de l'Ungava, Nouveau-Québec. mémoire de M.Sc.A.. Ecole Polytechnique de Montréal. 167 pages.

WILSON, H., BOUCHARD, M.A., DELISLE, C.E., (1986), Acid Neutralizing Capacity of Glacial Sediments in Western Ungava. Water Science and Technology. 18: 69-85.

WOTTON, D.L., HALUSCHAK, P.W., (1986), Mapping of Soils and Bedrock Sensitivity to Acidic Precipitation. Manitoba Department Environment and Workplace Safety and Health, Terrestrial Standards and Studies, Report 86-1.19 pages

WYATT,P.H., (1984), A Technique for Determining the Acid Neutralizing Capacity of Till and Other Surficial Sediments. Dans: Current Research, Part A, Commission Géologique du Canada, rapport 84-1, 587-600.

ANNEXE A

Les dépôts massiques annuels sont calculés à partir des concentrations moyennes pondérées. Le mode de calcul des concentrations moyennes pondérées mensuelles ou annuelles est le suivant (tiré de Jacques et Boulet, 1986):

$$CMP_x = \frac{[X]_i * P_i}{P_i}$$

CPM_x: concentration moyenne pondérée de SO_4 en microequivalent par litre.

$[X]_i$: concentration de l'ion SO_4 pour la ième semaine de la période considérée, exprimée en microéquivalent par litre.

P_i: hauteur de la précipitation pour la ième semaine de la période considérée, exprimée en millimètre d'équivalent d'eau.

n: nombre de semaines dans la période considérée pour lesquelles on a une mesure de la concentration de l'ion SO_4.

A partir du CPM_x, on trouve DM_x (dépôts massiques annuels):

$$DM_x = CMP_x * P_t * F_x$$

où:

DM_x: dépôt massique annuel de l'ion SO_4 exprimé en kg/ha/an.

P_t: hauteur totale connue des précipitations durant l'année exprimée en millimètre d'équivalent d'eau

F_x: Facteur de conversion pour exprimer les dépôts massique de SO_4 en kg/ha/an: $4,8031 * 10^{-4}$

ANNEXE B

Résultats détaillés du calcul de CNA

site	H2SO4 mL	pH in	pH fin	A	B	C	CNA	CNAC
2177	0.00	5.45	7.80	1.06E-07	0.00	4.75E-10	3.53E-03	0.00
	0.10	5.45	7.90	1.06E-07	1.00E-05	3.79E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.70	1.06E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.40	1.06E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
2187	0.00	5.40	5.10	1.19E-07	0.00	2.38E-07	-4.0E-03	0.00
	0.10	5.40	4.45	1.19E-07	1.00E-05	1.07E-06	3.02E-01	0.306
	0.50	5.40	4.00	1.19E-07	5.00E-05	3.05E-06	1.57E+00	1.573
	1.50	5.40	3.70	1.19E-07	1.50E-04	6.29E-06	4.79E+00	4.798
2189	0.00	5.40	8.25	1.19E-07	0.00	1.69E-10	3.98E-03	0.00
	0.10	5.40	7.80	1.19E-07	1.00E-05	4.77E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.40	7.80	1.19E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.40	7.50	1.19E-07	1.50E-04	9.96E-10	5.00E+00	5.000
2205	0.00	5.65	7.80	6.72E-08	0.00	4.75E-10	2.22E-03	0.00
	0.10	5.65	7.75	6.72E-08	1.00E-05	5.35E-10	3.36E-01	0.333
	0.50	5.65	7.70	6.72E-08	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.65	7.25	6.72E-08	1.50E-04	1.77E-09	5.00E+00	5.000
2208	0.00	5.45	7.90	1.06E-07	0.00	3.78E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	8.00	1.06E-07	1.00E-05	3.01E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.70	1.06E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.40	1.06E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
2209	0.00	5.45	4.55	1.06E-07	0.00	8.46E-07	-2.5E-02	0.00
	0.10	5.45	4.40	1.06E-07	1.00E-05	1.20E-06	2.97E-01	0.322
	0.50	5.45	3.95	1.06E-07	5.00E-05	3.42E-06	1.56E+00	1.581
	1.50	5.45	3.35	1.06E-07	1.50E-04	1.41E-05	4.53E+00	4.559
2223	0.00	6.70	7.80	5.99E-09	0.00	4.75E-10	1.84E-04	0.00
	0.10	6.70	7.60	5.99E-09	1.00E-05	7.56E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.70	7.55	5.99E-09	5.00E-05	8.60E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.70	7.25	5.99E-09	1.50E-04	1.77E-09	5.00E+00	5.000
2224	0.00	5.25	5.95	1.69E-07	0.00	3.37E-08	4.50E-03	0.00
	0.10	5.25	5.70	1.69E-07	1.00E-05	6.01E-08	3.37E-01	0.332
	0.50	5.25	4.70	1.69E-07	5.00E-05	6.09E-07	1.65E+00	1.648
	1.50	5.25	3.75	1.69E-07	1.50E-04	5.60E-06	4.82E+00	4.814
2225	0.00	6.70	7.00	5.99E-09	0.00	3.00E-09	9.95E-05	0.00
	0.10	6.70	6.30	5.99E-09	1.00E-05	1.51E-08	3.33E-01	0.333
	0.50	6.70	5.20	5.99E-09	5.00E-05	1.92E-07	1.66E+00	1.660
	1.50	6.70	3.90	5.99E-09	1.50E-04	3.97E-06	4.87E+00	4.868
2226	0.00	6.00	8.00	3.00E-08	0.00	3.00E-10	9.90E-04	0.00
	0.10	6.00	8.00	3.00E-08	1.00E-05	3.01E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.80	3.00E-08	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667

	1.50	6.00	7.40	3.00E-08	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
2227	0.00	5.35	5.65	1.34E-07	0.00	6.72E-08	2.23E-03	0.00
	0.10	5.35	5.10	1.34E-07	1.00E-05	2.39E-07	3.30E-01	0.328
	0.50	5.35	3.90	1.34E-07	5.00E-05	3.84E-06	1.54E+00	1.541
	1.50	5.35	3.20	1.34E-07	1.50E-04	1.99E-05	4.34E+00	4.340
2228	0.00	6.00	8.05	3.00E-08	0.00	2.67E-10	9.91E-04	0.00
	0.10	6.00	7.90	3.00E-08	1.00E-05	3.79E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.80	3.00E-08	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	7.35	3.00E-08	1.50E-04	1.41E-09	5.00E+00	5.000
2229	0.00	5.35	8.35	1.34E-07	0.00	1.34E-10	4.46E-03	0.00
	0.10	5.35	7.80	1.34E-07	1.00E-05	4.77E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.35	7.70	1.34E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.35	7.30	1.34E-07	1.50E-04	1.58E-09	5.00E+00	5.000
2230	0.00	6.00	7.55	3.00E-08	0.00	8.46E-10	9.72E-04	0.00
	0.10	6.00	7.35	3.00E-08	1.00E-05	1.34E-09	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.20	3.00E-08	5.00E-05	1.92E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	6.90	3.00E-08	1.50E-04	3.97E-09	5.00E+00	5.000
2231	0.00	6.00	8.00	3.00E-08	0.00	3.00E-10	9.90E-04	0.00
	0.10	6.00	7.70	3.00E-08	1.00E-05	6.01E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.50	3.00E-08	5.00E-05	9.64E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	7.30	3.00E-08	1.50E-04	1.58E-09	5.00E+00	5.000
2232	0.00	5.25	8.30	1.69E-07	0.00	1.50E-10	5.62E-03	0.00
	0.10	5.25	8.10	1.69E-07	1.00E-05	2.39E-10	3.39E-01	0.333
	0.50	5.25	7.90	1.69E-07	5.00E-05	3.84E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.25	7.60	1.69E-07	1.50E-04	7.91E-10	5.01E+00	5.000
2233	0.00	5.35	8.90	1.34E-07	0.00	3.78E-11	4.47E-03	0.00
	0.10	5.35	8.30	1.34E-07	1.00E-05	1.51E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.35	7.90	1.34E-07	5.00E-05	3.84E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.35	7.40	1.34E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
2234	0.00	5.45	8.80	1.06E-07	0.00	4.75E-11	3.55E-03	0.00
	0.10	5.45	8.45	1.06E-07	1.00E-05	1.07E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.80	1.06E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.50	1.06E-07	1.50E-04	9.96E-10	5.00E+00	5.000
2235	0.00	5.45	8.30	1.06E-07	0.00	1.50E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	7.90	1.06E-07	1.00E-05	3.79E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.70	1.06E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.30	1.06E-07	1.50E-04	1.58E-09	5.00E+00	5.000
2236	0.00	5.45	7.95	1.06E-07	0.00	3.37E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	7.90	1.06E-07	1.00E-05	3.79E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.75	1.06E-07	5.00E-05	5.42E-10	1.67E+00	1.667

Sulte

	1.50	5.45	7.40	1.06E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
2237.	0.00	5.40	7.80	1.19E-07	0.00	4.75E-10	3.97E-03	0.00
	0.10	5.40	7.80	1.19E-07	1.00E-05	4.77E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.40	7.80	1.19E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.40	7.60	1.19E-07	1.50E-04	7.91E-10	5.00E+00	5.000
2238	0.00	5.25	4.80	1.69E-07	0.00	4.75E-07	-1.0E-02	0.00
	0.10	5.25	4.60	1.69E-07	1.00E-05	7.56E-07	3.14E-01	0.324
	0.50	5.25	4.30	1.69E-07	5.00E-05	1.53E-06	1.62E+00	1.632
	1.50	5.25	3.50	1.69E-07	1.50E-04	9.96E-06	4.67E+00	4.684
2239	0.00	5.40	4.50	1.19E-07	0.00	9.49E-07	-2.8E-02	0.00
	0.10	5.40	4.30	1.19E-07	1.00E-05	1.51E-06	2.87E-01	0.315
	0.50	5.40	4.05	1.19E-07	5.00E-05	2.72E-06	1.58E+00	1.608
	1.50	5.40	3.75	1.19E-07	1.50E-04	5.60E-06	4.82E+00	4.845
2240	0.00	5.35	4.55	1.34E-07	0.00	8.46E-07	-2.4E-02	0.00
	0.10	5.35	4.40	1.34E-07	1.00E-05	1.20E-06	2.98E-01	0.322
	0.50	5.35	3.80	1.34E-07	5.00E-05	4.83E-06	1.51E+00	1.534
	1.50	5.35	3.05	1.34E-07	1.50E-04	2.81E-05	4.07E+00	4.092
3003	0.00	5.30	8.30	1.50E-07	0.00	1.50E-10	5.01E-03	0.00
	0.10	5.30	7.95	1.50E-07	1.00E-05	3.38E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.30	7.75	1.50E-07	5.00E-05	5.42E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.30	7.50	1.50E-07	1.50E-04	9.96E-10	5.00E+00	5.000
3008	0.00	5.45	8.10	1.06E-07	0.00	2.38E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	7.55	1.06E-07	1.00E-05	8.48E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.45	1.06E-07	5.00E-05	1.08E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.00	1.06E-07	1.50E-04	3.15E-09	5.00E+00	5.000
3010	0.00	7.20	7.20	1.89E-09	0.00	1.89E-09	0.00E+00	0.00
	0.10	7.20	6.85	1.89E-09	1.00E-05	4.25E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	7.20	5.40	1.89E-09	5.00E-05	1.21E-07	1.66E+00	1.663
	1.50	7.20	3.30	1.89E-09	1.50E-04	1.58E-05	4.47E+00	4.474
3012.	0.00	5.25	5.15	1.69E-07	0.00	2.12E-07	-1.5E-03	0.00
	0.10	5.25	4.70	1.69E-07	1.00E-05	6.01E-07	3.19E-01	0.320
	0.50	5.25	3.80	1.69E-07	5.00E-05	4.83E-06	1.51E+00	1.513
	1.50	5.25	3.25	1.69E-07	1.50E-04	1.77E-05	4.42E+00	4.417
3016	0.00	5.30	4.95	1.50E-07	0.00	3.37E-07	-6.2E-03	0.00
	0.10	5.30	4.45	1.50E-07	1.00E-05	1.07E-06	3.03E-01	0.309
	0.50	5.30	3.55	1.50E-07	5.00E-05	8.60E-06	1.39E+00	1.391
	1.50	5.30	3.00	1.50E-07	1.50E-04	3.15E-05	3.96E+00	3.961
3022	0.00	5.45	8.10	1.06E-07	0.00	2.38E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	7.85	1.06E-07	1.00E-05	4.25E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.65	1.06E-07	5.00E-05	6.83E-10	1.67E+00	1.667

Suite

	1.50	5.45	7.05	1.06E-07	1.50E-04	2.81E-09	5.00E+00	5.000
3037	0.00	5.45	8.90	1.06E-07	0.00	3.78E-11	3.55E-03	0.00
	0.10	5.45	8.35	1.06E-07	1.00E-05	1.34E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.75	1.06E-07	5.00E-05	5.42E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.35	1.06E-07	1.50E-04	1.41E-09	5.00E+00	5.000
3040	0.00	5.30	8.60	1.50E-07	0.00	7.54E-11	5.01E-03	0.00
	0.10	5.30	7.85	1.50E-07	1.00E-05	4.25E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.30	7.75	1.50E-07	5.00E-05	5.42E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.30	7.35	1.50E-07	1.50E-04	1.41E-09	5.00E+00	5.000
3045	0.00	5.25	8.60	1.69E-07	0.00	7.54E-11	5.62E-03	0.00
	0.10	5.25	8.35	1.69E-07	1.00E-05	1.34E-10	3.39E-01	0.333
	0.50	5.25	7.85	1.69E-07	5.00E-05	4.31E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.25	7.50	1.69E-07	1.50E-04	9.96E-10	5.01E+00	5.000
3051	0.00	6.00	7.90	3.00E-08	0.00	3.78E-10	9.87E-04	0.00
	0.10	6.00	7.70	3.00E-08	1.00E-05	6.01E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.80	3.00E-08	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	7.40	3.00E-08	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
3053	0.00	5.45	6.20	1.06E-07	0.00	1.89E-08	2.92E-03	0.00
	0.10	5.45	5.20	1.06E-07	1.00E-05	1.90E-07	3.31E-01	0.328
	0.50	5.45	4.05	1.06E-07	5.00E-05	2.72E-06	1.58E+00	1.577
	1.50	5.45	3.15	1.06E-07	1.50E-04	2.23E-05	4.26E+00	4.257
3059	0.00	5.45	5.95	1.06E-07	0.00	3.37E-08	2.43E-03	0.00
	0.10	5.45	5.00	1.06E-07	1.00E-05	3.01E-07	3.27E-01	0.324
	0.50	5.45	3.90	1.06E-07	5.00E-05	3.84E-06	1.54E+00	1.540
	1.50	5.45	3.10	1.06E-07	1.50E-04	2.50E-05	4.17E+00	4.167
3069	0.00	5.30	6.00	1.50E-07	0.00	3.00E-08	4.01E-03	0.00
	0.10	5.30	4.60	1.50E-07	1.00E-05	7.56E-07	3.13E-01	0.309
	0.50	5.30	3.65	1.50E-07	5.00E-05	6.83E-06	1.44E+00	1.440
	1.50	5.30	2.90	1.50E-07	1.50E-04	3.97E-05	3.68E+00	3.679
3083	0.00	5.45	5.65	1.06E-07	0.00	6.72E-08	1.31E-03	0.00
	0.10	5.45	4.60	1.06E-07	1.00E-05	7.56E-07	3.12E-01	0.310
	0.50	5.45	3.50	1.06E-07	5.00E-05	9.64E-06	1.35E+00	1.347
	1.50	5.45	2.90	1.06E-07	1.50E-04	3.97E-05	3.68E+00	3.680
3091	0.00	5.30	8.50	1.50E-07	0.00	9.49E-11	5.01E-03	0.00
	0.10	5.30	8.05	1.50E-07	1.00E-05	2.68E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.30	7.70	1.50E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.30	7.40	1.50E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
3096	0.00	5.30	8.20	1.50E-07	0.00	1.89E-10	5.01E-03	0.00
	0.10	5.30	7.90	1.50E-07	1.00E-05	3.79E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.30	7.80	1.50E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667

Suite

	1.50	5.30	7.40	1.50E-07	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
3133	0.00	6.70	7.70	5.99E-09	0.00	5.99E-10	1.80E-04	0.00
	0.10	6.70	7.30	5.99E-09	1.00E-05	1.51E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	6.70	7.10	5.99E-09	5.00E-05	2.42E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	6.70	1.06E-07	1.50E-04	6.29E-09	5.00E+00	5.003
3135	0.00	5.45	6.00	1.06E-07	0.00	3.00E-08	2.55E-03	0.00
	0.10	5.45	4.70	1.06E-07	1.00E-05	6.01E-07	3.17E-01	0.314
	0.50	5.45	4.10	1.06E-07	5.00E-05	2.42E-06	1.59E+00	1.587
	1.50	5.45	3.15	1.06E-07	1.50E-04	2.23E-05	4.26E+00	4.258
3136	0.00	5.45	6.25	1.06E-07	0.00	1.69E-08	2.99E-03	0.00
	0.10	5.45	5.05	1.06E-07	1.00E-05	2.68E-07	3.28E-01	0.325
	0.50	5.45	4.00	1.06E-07	5.00E-05	3.05E-06	1.57E+00	1.566
	1.50	5.45	3.00	1.06E-07	1.50E-04	3.15E-05	3.95E+00	3.951
3140	0.00	5.30	4.60	1.50E-07	0.00	7.54E-07	#########	0.00
	0.10	5.30	4.70	1.50E-07	1.00E-05	6.01E-07	3.18E-01	0.338
	0.50	5.30	3.80	1.50E-07	5.00E-05	4.83E-06	1.51E+00	1.531
	1.50	5.30	3.10	1.50E-07	1.50E-04	2.50E-05	4.17E+00	4.191
3407	0.00	5.65	8.57	6.72E-08	0.00	8.07E-11	2.24E-03	0.00
	0.10	5.65	8.25	6.72E-08	1.00E-05	1.69E-10	3.36E-01	0.333
	0.50	5.65	7.85	6.72E-08	5.00E-05	4.31E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.65	7.35	6.72E-08	1.50E-04	1.41E-09	5.00E+00	5.000
3417	0.00	6.00	8.30	3.00E-08	0.00	1.50E-10	9.95E-04	0.00
	0.10	6.00	8.00	3.00E-08	1.00E-05	3.01E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.60	3.00E-08	5.00E-05	7.66E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	7.45	3.00E-08	1.50E-04	1.12E-09	5.00E+00	5.000
3420	0.00	5.45	8.40	1.06E-07	0.00	1.19E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	8.10	1.06E-07	1.00E-05	2.39E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.80	1.06E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.45	1.06E-07	1.50E-04	1.12E-09	5.00E+00	5.000
3430	0.00	6.70	7.50	5.99E-09	0.00	9.49E-10	1.68E-04	0.00
	0.10	6.70	7.20	5.99E-09	1.00E-05	1.90E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	6.70	6.95	5.99E-09	5.00E-05	3.42E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	6.70	1.06E-07	1.50E-04	6.29E-09	5.00E+00	5.003
3431	0.00	5.65	8.65	6.72E-08	0.00	6.72E-11	2.24E-03	0.00
	0.10	5.65	8.10	6.72E-08	1.00E-05	2.39E-10	3.36E-01	0.333
	0.50	5.65	7.95	6.72E-08	5.00E-05	3.42E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.65	7.65	6.72E-08	1.50E-04	7.05E-10	5.00E+00	5.000
3432	0.00	5.65	8.45	6.72E-08	0.00	1.06E-10	2.24E-03	0.00
	0.10	5.65	7.95	6.72E-08	1.00E-05	3.38E-10	3.36E-01	0.333
	0.50	5.65	7.90	6.72E-08	5.00E-05	3.84E-10	1.67E+00	1.667

	1.50	5.65	7.50	6.72E-08	1.50E-04	9.96E-10	5.00E+00	5.000
3433	0.00	5.45	8.25	1.06E-07	0.00	1.69E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	8.20	1.06E-07	1.00E-05	1.90E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.80	1.06E-07	5.00E-05	4.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.55	1.06E-07	1.50E-04	8.88E-10	5.00E+00	5.000
3434	0.00	5.45	8.25	1.06E-07	0.00	1.69E-10	3.54E-03	0.00
	0.10	5.45	8.00	1.06E-07	1.00E-05	3.01E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.85	1.06E-07	5.00E-05	4.31E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.45	1.06E-07	1.50E-04	1.12E-09	5.00E+00	5.000
3435	0.00	6.00	7.50	3.00E-08	0.00	9.49E-10	9.68E-04	0.00
	0.10	6.00	7.50	3.00E-08	1.00E-05	9.52E-10	3.34E-01	0.333
	0.50	6.00	7.65	3.00E-08	5.00E-05	6.83E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	6.00	7.40	3.00E-08	1.50E-04	1.25E-09	5.00E+00	5.000
3436	0.00	5.45	4.90	1.06E-07	0.00	3.78E-07	-9.0E-03	0.00
	0.10	5.45	4.65	1.06E-07	1.00E-05	6.74E-07	3.14E-01	0.323
	0.50	5.45	4.10	1.06E-07	5.00E-05	2.42E-06	1.59E+00	1.598
	1.50	5.45	3.35	1.06E-07	1.50E-04	1.41E-05	4.53E+00	4.544
3437	0.00	5.45	8.60	1.06E-07	0.00	7.54E-11	3.5E-03	0.00
	0.10	5.45	8.30	1.06E-07	1.00E-05	1.51E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	7.70	1.06E-07	5.00E-05	6.09E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.20	1.06E-07	1.50E-04	1.99E-09	5.00E+00	5.000
3441	0.00	7.20	7.30	1.89E-09	0.00	1.50E-09	1.3E-05	0.00
	0.10	7.20	7.00	1.89E-09	1.00E-05	3.01E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	7.20	6.90	1.89E-09	5.00E-05	3.84E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	7.20	6.80	1.89E-09	1.50E-04	4.99E-09	5.00E+00	5.000
3456	0.00	5.65	6.05	6.72E-08	0.00	2.67E-08	1.3E-03	0.00
	0.10	5.65	5.00	6.72E-08	1.00E-05	3.01E-07	3.26E-01	0.324
	0.50	5.65	4.40	6.72E-08	5.00E-05	1.21E-06	1.63E+00	1.627
	1.50	5.65	3.45	6.72E-08	1.50E-04	1.12E-05	4.63E+00	4.628
3466	0.00	6.70	7.00	5.99E-09	0.00	3.00E-09	1.0E-04	0.00
	0.10	6.70	6.65	5.99E-09	1.00E-05	6.74E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	6.70	4.20	5.99E-09	5.00E-05	1.92E-06	1.60E+00	1.603
	1.50	6.70	3.30	5.99E-09	1.50E-04	1.58E-05	4.47E+00	4.474
3471	0.00	5.35	8.85	1.34E-07	0.00	4.24E-11	4.5E-03	0.00
	0.10	5.35	8.15	1.34E-07	1.00E-05	2.13E-10	3.38E-01	0.333
	0.50	5.35	7.85	1.34E-07	5.00E-05	4.31E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.35	6.95	1.34E-07	1.50E-04	3.53E-09	5.00E+00	5.000
3477	0.00	5.65	8.85	6.72E-08	0.00	4.24E-11	2.2E-03	0.00
	0.10	5.65	8.40	6.72E-08	1.00E-05	1.20E-10	3.36E-01	0.333
	0.50	5.65	7.60	6.72E-08	5.00E-05	7.66E-10	1.67E+00	1.667

Suite

	1.50	5.65	7.05	6.72E-08	1.50E-04	2.81E-09	5.00E+00	5.000
3484	0.00	5.45	8.40	1.06E-07	0.00	1.19E-10	3.5E-03	0.00
	0.10	5.45	8.30	1.06E-07	1.00E-05	1.51E-10	3.37E-01	0.333
	0.50	5.45	8.15	1.06E-07	5.00E-05	2.16E-10	1.67E+00	1.667
	1.50	5.45	7.90	1.06E-07	1.50E-04	3.97E-10	5.00E+00	5.000
3488	0.00	6.70	6.90	5.99E-09	0.00	3.78E-09	7.4E-05	0.00
	0.10	6.70	6.90	5.99E-09	1.00E-05	3.79E-09	3.33E-01	0.333
	0.50	6.70	6.80	5.99E-09	5.00E-05	4.83E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	6.70	6.75	5.99E-09	1.50E-04	5.60E-09	5.00E+00	5.000
3426	0.00	5.70	7.60	5.99E-08	0.00	7.54E-10	2.0E-03	0.00
	0.10	5.70	7.50	5.99E-08	1.00E-05	9.52E-10	3.35E-01	0.333
	0.50	5.70	7.30	5.99E-08	5.00E-05	1.53E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	7.20	5.99E-08	1.50E-04	1.99E-09	5.00E+00	5.000
3046	0.00	5.70	7.60	5.99E-08	0.00	7.54E-10	2.0E-03	0.00
	0.10	5.70	7.50	5.99E-08	1.00E-05	9.52E-10	3.35E-01	0.333
	0.50	5.70	7.30	5.99E-08	5.00E-05	1.53E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	7.25	5.99E-08	1.50E-04	1.77E-09	5.00E+00	5.000
136	0.00	5.70	7.30	5.99E-08	0.00	1.50E-09	1.9E-03	0.00
	0.10	5.70	7.10	5.99E-08	1.00E-05	2.39E-09	3.35E-01	0.333
	0.50	5.70	7.10	5.99E-08	5.00E-05	2.42E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	6.80	5.99E-08	1.50E-04	4.99E-09	5.00E+00	5.000
139	0.00	5.70	7.50	5.99E-08	0.00	9.49E-10	2.0E-03	0.00
	0.10	5.70	7.45	5.99E-08	1.00E-05	1.07E-09	3.35E-01	0.333
	0.50	5.70	7.30	5.99E-08	5.00E-05	1.53E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	6.90	5.99E-08	1.50E-04	3.97E-09	5.00E+00	5.000
140	0.00	5.70	7.10	5.99E-08	0.00	2.38E-09	1.9E-03	0.00
	0.10	5.70	7.00	5.99E-08	1.00E-05	3.01E-09	3.35E-01	0.333
	0.50	5.70	7.00	5.99E-08	5.00E-05	3.05E-09	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	7.00	5.99E-08	1.50E-04	3.15E-09	5.00E+00	5.000
142	0.00	5.70	6.00	5.99E-08	0.00	3.00E-08	1.0E-03	0.00
	0.10	5.70	5.90	5.99E-08	1.00E-05	3.79E-08	3.34E-01	0.333
	0.50	5.70	6.00	5.99E-08	5.00E-05	3.05E-08	1.67E+00	1.667
	1.50	5.70	5.40	5.99E-08	1.50E-04	1.25E-07	5.00E+00	4.997

ANNEXE C

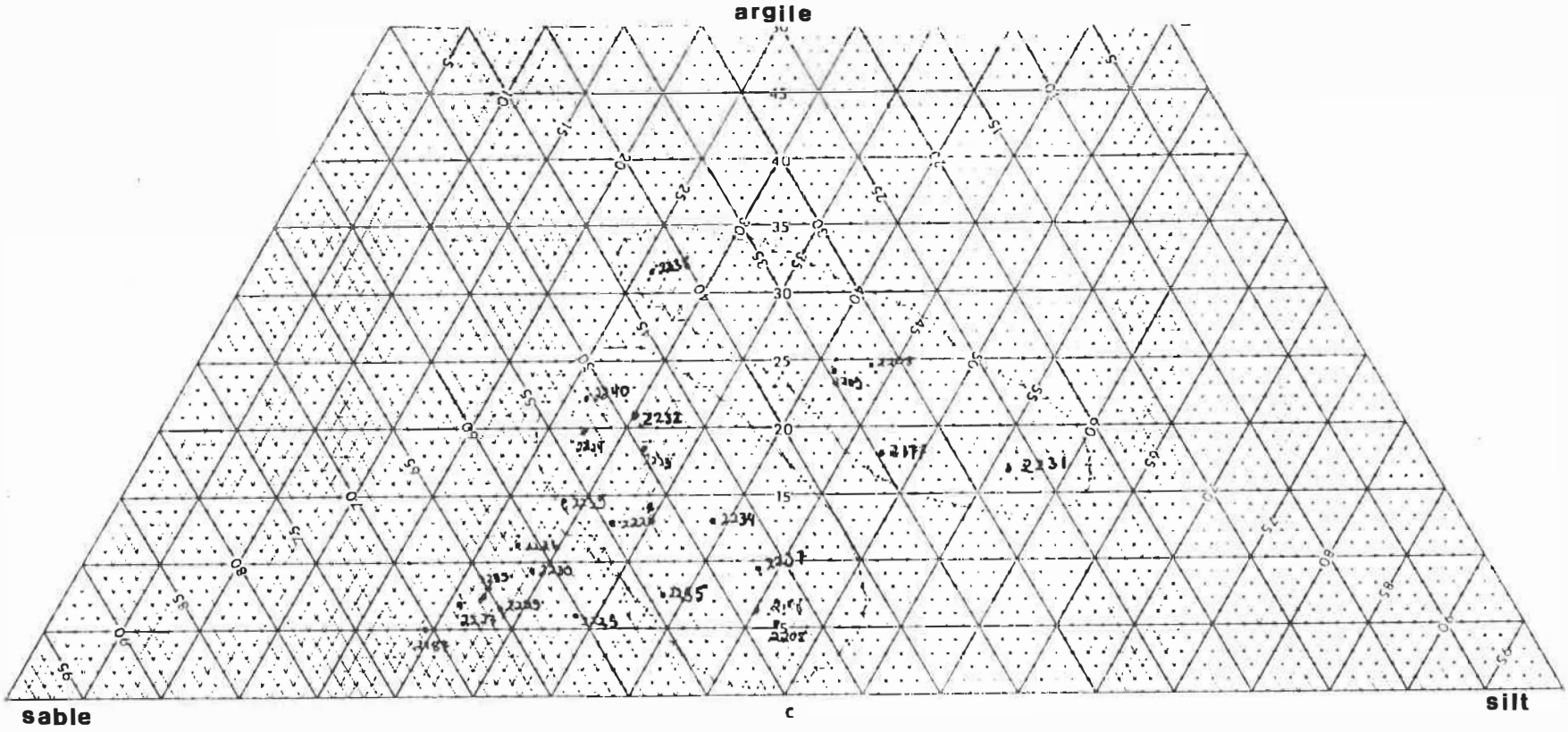


Diagramme ternaire des échantillons du transect

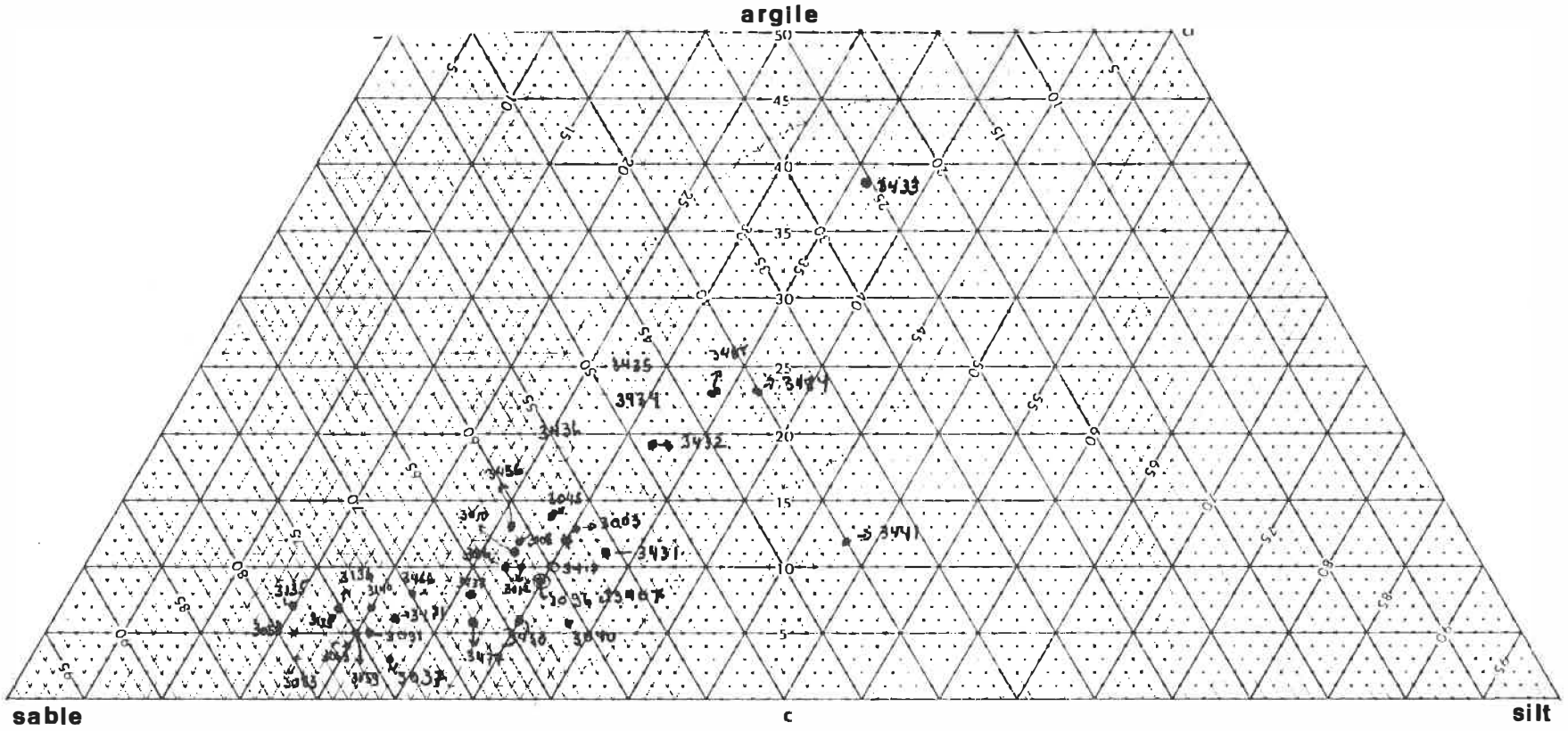


Diagramme ternaire des échantillons des profils

ANNEXE D

Résultats détaillés de la granulométrie et contenu en carbonates des échantillons

echantillon	sable	silt	argile	2-4 mm %CaCo3	<1mm %CaCO3 I
2177	34.60	47.24	18.16	6.7	22.50
2187	70.89	24.08	5.03	0.0	0.00
2188	48.83	44.94	6.23	11.7	18.30
2205	47.63	47.13	5.24	7.5	15.00
2208	32.10	43.47	24.43	49.1	25.00
2209	34.70	41.37	23.93	0.0	0.00
2223	49.84	31.87	18.29	35.0	25.80
2224	52.86	27.41	19.73	0.0	0.80
2225	60.53	33.31	6.16	0.0	0.00
2226	61.37	27.34	11.29	27.5	21.70
2227	67.73	25.35	6.92	0.0	0.00
2228	54.45	32.73	12.82	25.8	23.50
2229	65.17	28.30	6.53	24.2	18.30
2230	61.39	29.30	9.31	11.7	5.00
2231	27.31	56.36	16.33	15.0	16.70
2232	49.16	29.85	20.99	8.3	17.50
2233	65.23	26.91	7.86	15.0	15.60
2234	48.19	38.52	13.29	10.8	26.70
2235	54.05	38.34	7.61	14.2	16.30
2236				0.0	6.70
2237	47.11	43.37	9.52	0.8	6.70
2238	42.61	25.70	31.69	0.0	0.80
2239	56.93	28.21	14.86	0.0	0.00
2240	51.56	26.23	22.21	0.0	0.00
moyenne	51.49	34.67	13.84	10.97	11.87
3003	56.80	30.38	12.82	1.7	6.70
3008	61.43	27.29	11.28	0.8	2.50
3010	61.79	27.57	10.64	0.0	0.00
3012	61.92	27.18	10.90	0.0	0.00
3016	63.12	27.48	9.40	0.0	0.00
3022	44.47	33.50	33.03	0.8	4.20
3037	73.89	22.66	3.45	9.2	5.00
3040	61.39	33.23	5.38	3.3	4.20
3045	58.19	28.30	13.51	11.7	7.50
3051	40.06	37.41	22.53	2.5	10.00
3053	78.64	16.22	5.14	0.0	0.00
3059	74.99	19.57	5.44	0.0	0.00
3069	76.30	19.93	3.77	0.0	0.00
3083	79.69	17.01	3.30	0.0	0.00
3091	73.79	20.86	5.44	2.5	5.00

Suite

3096	61.27	29.49	9.24	2.5	5.00
3133	75.60	17.81	6.59	1.7	0.80
3135	78.39	15.12	6.49	0.0	0.00
3136	74.54	18.20	7.26	0.0	0.00
3140	73.00	20.16	6.84	0.0	0.00
3407	61.44	28.81	9.75	16.7	9.20
3417	60.45	29.56	9.99	20.0	9.20
3420	56.55	31.62	11.83	10.8	6.70
3430	64.30	29.86	5.84	8.3	7.50
3431	56.08	33.34	10.58	9.2	10.80
3432	49.39	32.03	18.58	18.3	23.30
3433	25.48	36.97	37.55	50.0	30.00
3434	49.85	26.59	23.56	0.8	9.20
3435	49.21	26.24	24.55	2.5	10.00
3436	54.57	25.66	19.77	0.0	0.00
3437	66.45	26.33	7.22	1.7	1.70
3441	40.24	48.23	11.53	0.8	2.50
3456	61.44	26.22	12.34	0.0	0.00
3466	69.76	21.75	8.49	0.0	0.00
3471	72.09	22.37	5.54	0.8	1.70
3477	66.81	26.93	6.26	0.0	2.10
3484	40.46	36.45	23.09	0.0	2.50
3488	42.99	33.67	23.34	0.0	2.50
moyenne	59.35	26.55	11.88	4.53	4.73
moyenne tot	57.39	29.99	12.80		

ANNEXE E

Résultats détaillés de la libération de substances après l'acidification (mg/L)

site	H_2SO_4 mL	Ca	Mg	K	Mn	Cu	Zn	Cd	Al
2177	0.0	48.00	4.800	7.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.57
	0.1	48.00	5.200	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.16
	0.5	72.00	7.200	4.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	1.5	144.00	9.200	3.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
2187	0.0	30.00	1.800	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	0.1	30.00	1.800	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.52
	0.5	30.00	1.800	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	6.34
	1.5	32.80	2.000	2.1	<0.055	0.13	<0.018	<0.025	21.93
2188	0.0	40.00	3.520	3.8	<0.055	<0.09	0.115	<0.025	1.08
	0.1	48.00	4.200	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.34
	0.5	76.00	5.400	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
	1.5	144.00	7.680	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
2205	0.0	50.00	7.200	1.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	2.02
	0.1	52.00	7.400	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	2.12
	0.5	76.00	9.600	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.12
	1.5	148.00	13.800	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
2208	0.0	52.00	4.600	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.24
	0.1	56.00	5.120	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	0.5	80.00	7.200	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	140.00	10.200	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
2209	0.0	36.00	4.600	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.32
	0.1	38.00	5.200	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.39
	0.5	46.00	7.600	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.11
	1.5	64.00	10.000	2.8	0.26	0.13	0.025	<0.025	5.72
2223	0.0	48.00	4.000	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.38
	0.1	58.00	4.680	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.5	88.00	6.560	2.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	1.5	158.00	8.400	2.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
2224	0.0	44.00	4.800	3.0	0.35	<0.09	<0.018	<0.025	1.55
	0.1	45.20	5.000	2.6	0.52	<0.09	<0.018	<0.025	0.86
	0.5	54.00	6.480	2.9	0.88	<0.09	<0.018	<0.025	0.45
	1.5	84.00	10.000	3.4	2.10	<0.09	<0.018	<0.025	1.46
2225	0.0	42.00	4.520	1.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.83
	0.1	43.20	4.640	1.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.46
	0.5	52.00	5.920	1.6	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.80
	1.5	104.00	10.000	1.7	0.55	<0.09	<0.018	<0.025	1.59
2226	0.0	48.00	3.680	3.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.21
	0.1	52.00	4.080	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.34
	0.5	81.20	5.400	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.15

Suite

	1.5	140.80	6.800	2.4	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
2227	0.0	28.40	3.040	2.3	0.06	<0.09	0.055	<0.025	2.54
	0.1	29.60	3.040	2.0	0.07	<0.09	0.030	<0.025	0.46
	0.5	39.60	4.400	2.8	0.28	<0.09	0.030	<0.025	1.05
	1.5	64.00	5.440	2.4	0.68	<0.09	0.030	<0.025	5.70
2228	0.0	44.40	3.320	1.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.58
	0.1	52.00	3.680	1.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.31
	0.5	74.00	4.800	1.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	1.5	138.00	6.480	1.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
2229	0.0	38.80	3.000	1.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.69
	0.1	44.00	3.200	1.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.69
	0.5	68.00	4.200	1.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	1.5	155.20	7.000	1.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.14
2230	0.0	41.20	5.760	1.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.81
	0.1	44.80	68.800	1.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.78
	0.5	58.00	12.960	1.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.20
	1.5	91.20	25.600	1.8	0.09	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
2231	0.0	46.40	3.920	1.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.76
	0.1	52.00	4.280	1.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.16
	0.5	74.00	5.600	1.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	1.5	138.00	8.400	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
2232	0.0	44.00	3.760	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.27
	0.1	51.20	4.200	3.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.5	74.00	5.920	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.20
	1.5	140.00	8.880	4.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.11
2233	0.0	37.60	2.720	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.39
	0.1	44.00	3.320	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.21
	0.5	72.00	4.520	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	144.00	5.800	2.4	0.12	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
2234	0.0	36.00	4.400	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.33
	0.1	43.20	5.520	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.11
	0.5	67.20	7.720	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
	1.5	133.20	10.400	4.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
2235	0.0	38.00	2.920	1.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.63
	0.1	44.00	3.400	2.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.36
	0.5	70.80	4.440	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	1.5	136.80	5.880	2.3	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
2236	0.0	56.00	7.440	4.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	0.1	63.20	8.800	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	0.5	83.20	11.600	3.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01

	1.5	143.20	17.200	8.8	<0.055	<0.09	0.020	<0.025	0.03
2237	0.0	45.60	4.720	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.65
	0.1	51.20	5.280	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.22
	0.5	72.80	7.000	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	1.5	130.00	9.680	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.00
2238	0.0	36.00	6.600	2.4	<0.055	<0.09	0.018	<0.025	0.48
	0.1	36.00	7.360	2.4	<0.055	<0.09	0.020	<0.025	0.31
	0.5	42.00	10.240	3.1	<0.055	<0.09	0.058	<0.025	0.44
	1.5	60.80	17.280	3.5	0.11	<0.09	0.040	<0.025	1.98
2239	0.0	32.00	2.800	1.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.89
	0.1	32.00	2.800	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.92
	0.5	32.80	2.920	2.1	<0.055	<0.09	0.025	<0.025	6.46
	1.5	32.80	2.920	2.0	<0.055	<0.09	0.027	<0.025	23.25
2240	0.0	32.00	4.000	1.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.33
	0.1	33.60	4.880	1.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.41
	0.5	38.00	7.200	2.2	<0.055	<0.09	0.032	<0.025	1.93
	1.5	44.80	8.880	2.8	<0.055	<0.09	0.045	<0.025	10.60
3003	0.0	41.60	3.800	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.1	48.80	4.280	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	0.5	75.20	5.840	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	134.00	7.360	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
3008	0.0	41.60	4.400	2.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.55
	0.1	44.40	6.200	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	0.5	58.00	12.200	2.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	1.5	91.20	26.200	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
3010	0.0	36.00	4.080	3.6	<0.055	<0.09	0.052	<0.025	0.04
	0.1	37.60	4.480	3.4	<0.055	<0.09	0.028	<0.025	0.07
	0.5	51.20	6.520	4.2	0.21	0.10	0.074	<0.025	0.60
	1.5	82.00	9.800	5.1	0.95	0.24	0.163	<0.025	3.50
3012	0.0	36.00	3.920	3.0	<0.055	<0.09	0.024	<0.025	0.05
	0.1	37.60	4.720	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	0.5	50.00	6.800	3.0	0.13	0.09	0.040	<0.025	0.65
	1.5	70.80	9.080	3.9	0.34	0.15	0.075	<0.025	2.38
3016	0.0	32.00	2.480	4.8	<0.055	<0.09	0.025	<0.025	0.19
	0.1	33.20	3.000	2.1	<0.055	0.11	0.053	<0.025	0.35
	0.5	39.20	3.440	2.1	0.15	0.28	0.065	<0.025	2.87
	1.5	57.20	3.760	2.2	0.35	0.39	0.082	<0.025	8.33
3022	0.0	51.20	5.600	3.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.1	56.00	6.480	5.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.12
	0.5	74.80	11.000	4.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03

Suite

	1.5	126.00	23.200	10.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
3037	0.0	34.40	2.920	1.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.66
	0.1	42.80	3.400	1.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.68
	0.5	75.20	4.280	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
	1.5	140.00	7.200	2.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
3040	0.0	38.00	2.960	1.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.1	44.40	3.280	1.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.11
	0.5	75.20	4.160	1.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	1.5	145.20	5.960	2.1	0.11	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
3045	0.0	41.20	4.360	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.14
	0.1	45.60	5.000	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	0.5	70.40	6.600	2.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
	1.5	132.00	8.200	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
3051	0.0	50.80	5.600	6.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	1.22
	0.1	56.00	6.400	6.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.66
	0.5	81.20	8.720	7.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	1.5	144.00	11.680	8.3	0.15	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
3053	0.0	34.40	2.240	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	0.1	36.80	2.560	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	0.5	48.00	3.120	3.5	0.28	<0.09	0.020	<0.025	0.64
	1.5	71.20	4.200	5.3	1.18	0.17	0.070	<0.025	3.70
3059	0.0	32.80	2.000	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
	0.1	35.20	2.120	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
	0.5	48.00	2.680	3.0	0.02	<0.09	0.033	<0.025	0.75
	1.5	70.40	3.600	4.5	1.15	0.20	0.080	<0.025	4.10
3069	0.0	32.00	1.760	2.3	<0.055	<0.09	0.019	<0.025	0.04
	0.1	34.00	1.960	2.5	<0.055	<0.09	0.062	<0.025	0.12
	0.5	46.40	2.280	3.0	0.24	0.16	0.085	<0.025	1.20
	1.5	62.40	2.800	3.6	0.53	0.24	0.096	<0.025	4.62
3083	0.0	30.80	1.600	2.2	<0.055	<0.09	0.030	<0.025	0.07
	0.1	33.60	1.800	2.7	<0.055	<0.09	0.020	<0.025	0.17
	0.5	44.80	2.000	2.7	0.10	<0.09	0.060	<0.025	3.95
	1.5	58.00	2.040	2.8	0.15	0.13	0.084	<0.025	11.02
3091	0.0	40.00	3.040	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.41
	0.1	46.00	3.600	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.31
	0.5	78.00	5.040	4.7	<0.055	<0.09	0.055	<0.025	0.09
	1.5	144.00	7.320	5.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
3096	0.0	39.20	3.440	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.42
	0.1	46.40	3.920	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.5	69.20	5.120	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10

Suite

	1.5	129.60	6.800	3.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
3133	0.0	38.40	3.680	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.1	44.00	4.960	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.13
	0.5	61.60	9.840	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	96.00	19.400	3.1	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
3135	0.0	33.60	2.960	2.2	<0.055	<0.09	0.033	<0.025	0.09
	0.1	35.20	3.280	2.4	<0.055	<0.09	0.043	<0.025	0.25
	0.5	45.60	4.440	3.0	0.37	<0.09	0.048	<0.025	0.49
	1.5	66.00	6.280	3.7	1.62	0.22	0.104	<0.025	2.40
3136	0.0	37.20	3.080	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
	0.1	39.60	3.480	3.2	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	0.5	50.40	4.600	3.8	0.29	<0.09	0.028	<0.025	0.46
	1.5	75.20	6.880	4.7	1.37	0.13	0.090	<0.025	2.55
3140	0.0	36.00	3.040	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
	0.1	38.00	3.400	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	0.5	50.00	4.440	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	3.13
	1.5	71.60	6.120	3.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.57
3407	0.0	41.20	3.000	2.4	<0.055	<0.09	0.095	<0.025	0.32
	0.1	47.20	3.480	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
	0.5	73.60	4.640	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	1.5	138.00	6.280	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
3417	0.0	44.80	4.120	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.30
	0.1	50.80	4.760	2.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	0.5	76.00	6.400	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	128.00	7.840	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
3420	0.0	48.40	3.440	14.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.20
	0.1	49.60	3.560	5.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.17
	0.5	73.20	4.800	5.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
	1.5	130.40	6.480	5.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
3430	0.0	42.40	3.760	2.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.16
	0.1	51.60	4.560	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	0.5	82.40	6.080	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	143.20	7.760	3.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
3431	0.0	44.80	3.280	3.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.23
	0.1	49.60	3.680	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	0.5	73.60	4.880	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
	1.5	140.00	6.600	3.0	0.07	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
3432	0.0	46.40	5.240	2.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.31
	0.1	52.40	6.120	2.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.5	75.20	8.520	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02

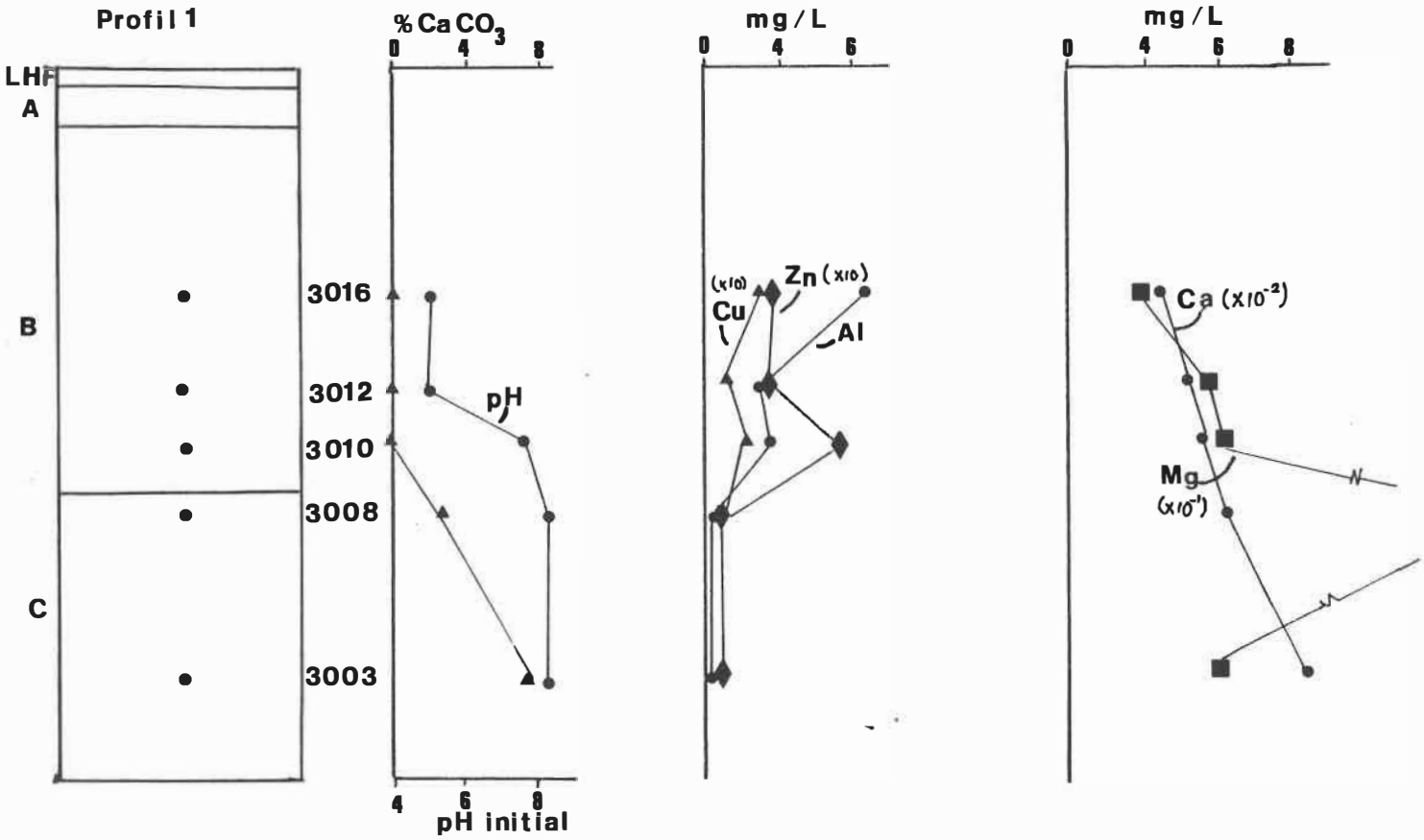
Suite

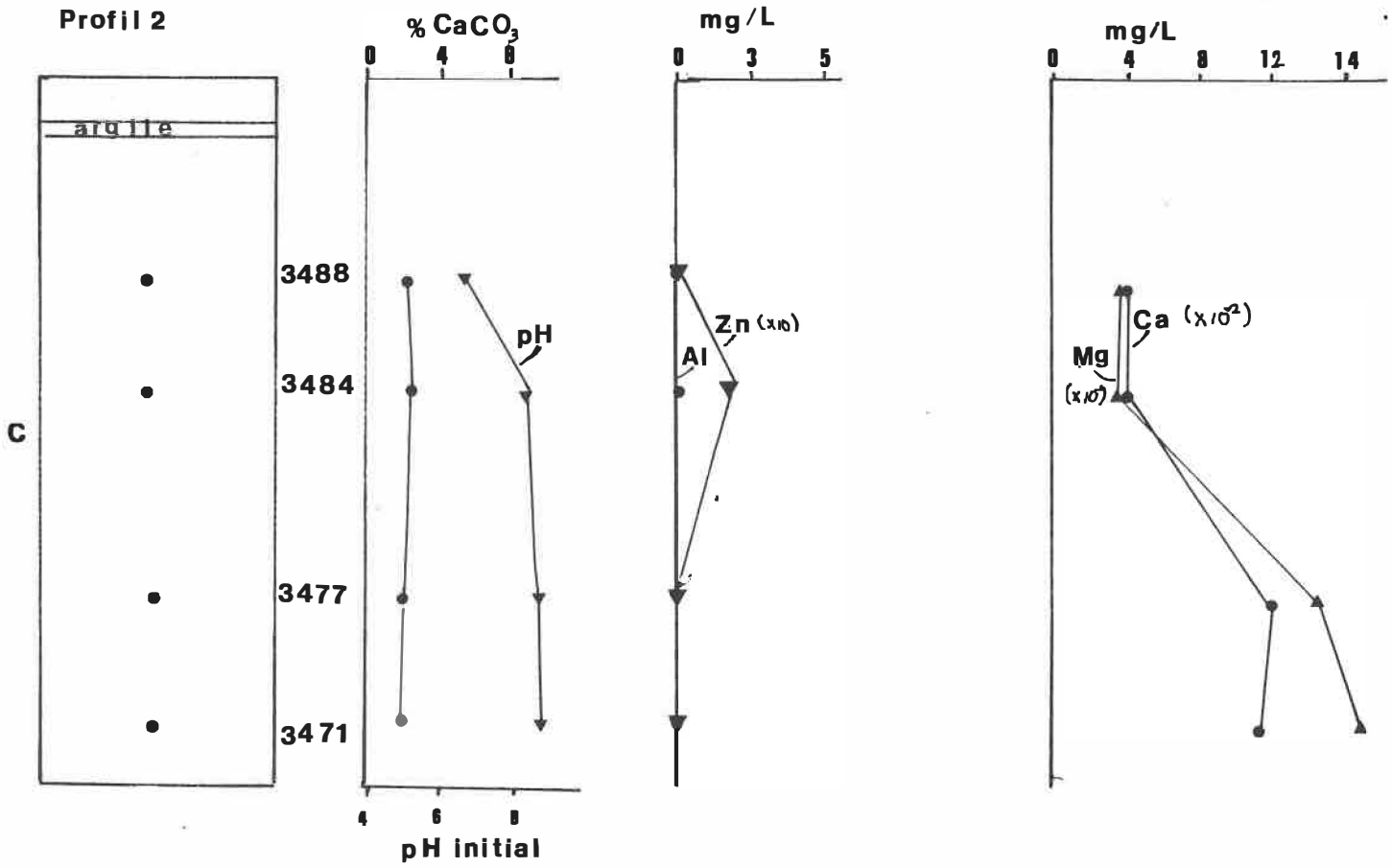
	1.5	134.00	12.000	2.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
3433	0.0	56.80	4.960	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.10
	0.1	59.20	5.560	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
	0.5	77.20	7.120	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	1.5	132.00	10.720	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
3434	0.0	51.20	4.320	2.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	0.1	52.00	4.720	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
	0.5	78.40	7.000	3.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
	1.5	136.00	9.200	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
3435	0.0	48.40	4.560	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	0.1	54.80	5.200	2.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.15
	0.5	76.80	6.840	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.56
	1.5	130.40	9.280	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
3436	0.0	41.60	4.320	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.1	41.60	4.680	2.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.25
	0.5	47.20	6.280	3.3	0.08	<0.09	0.020	<0.025	0.39
	1.5	69.20	9.520	5.1	0.25	0.15	0.040	<0.025	2.34
3437	0.0	40.00	3.440	3.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.50
	0.1	46.00	3.880	3.3	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.5	70.40	5.560	3.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	1.5	122.00	12.200	4.7	0.14	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
3441	0.0	46.00	4.280	5.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.23
	0.1	50.80	4.680	5.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	0.5	80.80	6.880	6.8	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
	1.5	146.00	11.760	5.8	0.11	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
3456	0.0	36.80	3.760	2.9	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.09
	0.1	38.80	4.120	3.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.03
	0.5	47.60	5.600	4.2	0.21	<0.09	<0.018	<0.025	0.29
	1.5	72.40	8.240	5.7	1.22	<0.09	0.040	<0.025	2.29
3466	0.0	36.00	4.320	3.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.05
	0.1	37.60	4.720	3.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
	0.5	48.80	6.920	3.6	0.09	<0.09	<0.018	<0.025	0.61
	1.5	74.80	10.080	5.1	0.28	0.26	0.075	<0.025	3.10
3471	0.0	40.40	2.920	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.18
	0.1	46.00	3.400	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	0.5	72.40	6.760	3.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.02
	1.5	116.40	18.000	4.3	0.12	<0.09	<0.018	<0.025	0.01
3477	0.0	43.60	3.400	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.27
	0.1	44.80	3.200	2.7	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.21
	0.5	74.00	5.600	4.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.04

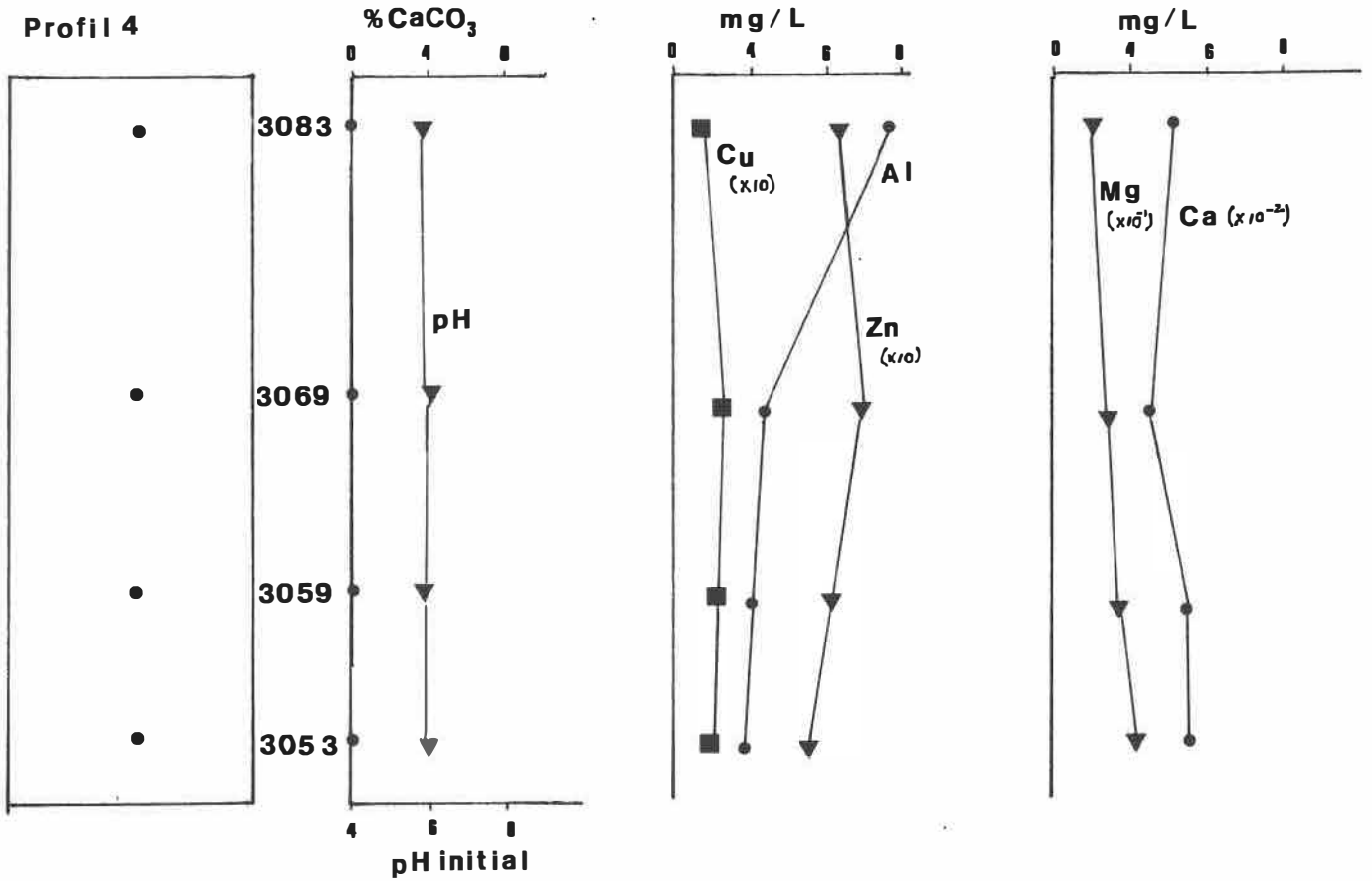
Suite

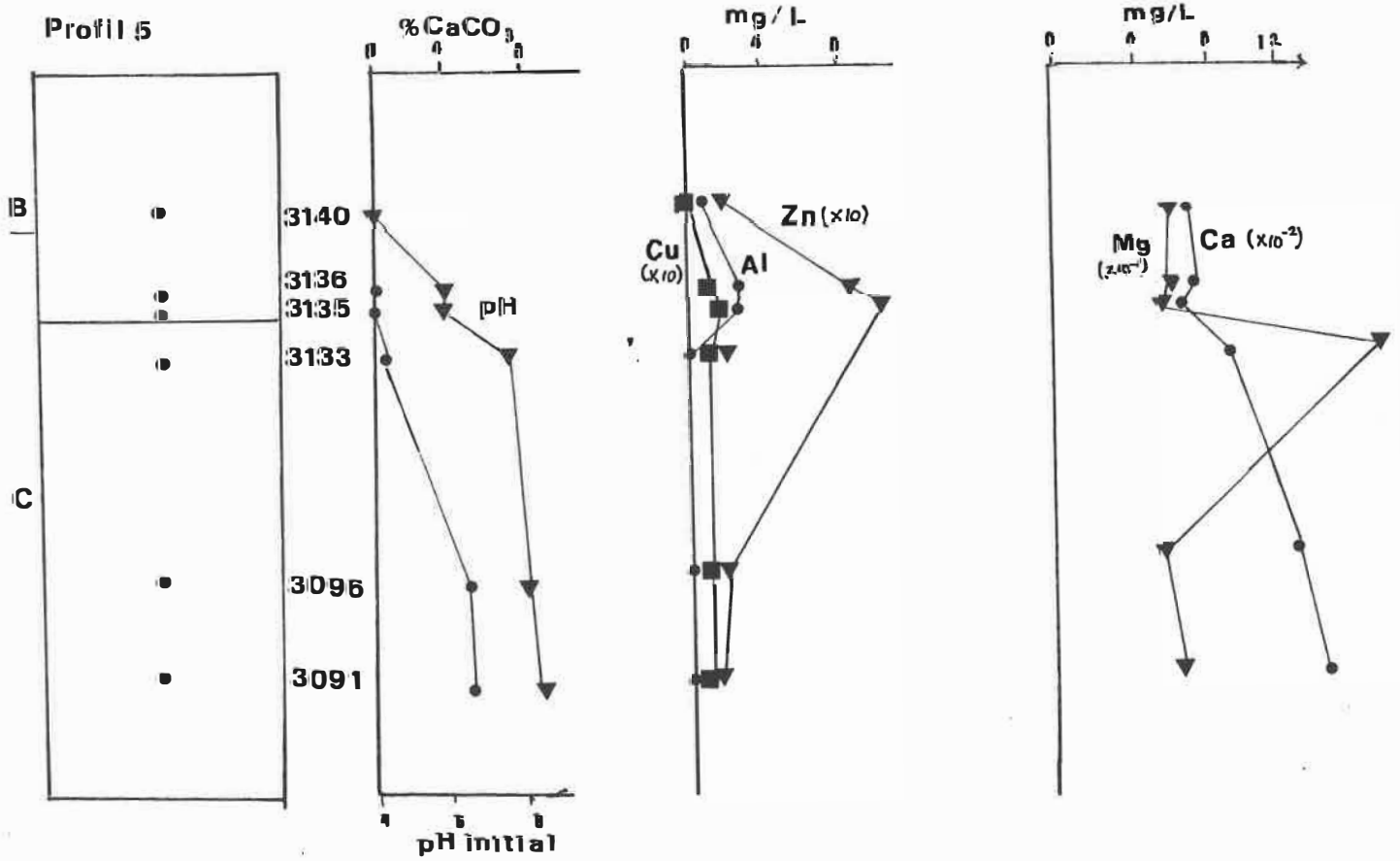
	1.5	125.60	15.400	7.4	0.15	<0.09	<0.018	<0.025	0.04
3484	0.0	48.80	4.280	5.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.16
	0.1	50.80	4.280	3.0	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.12
	0.5	48.00	4.280	3.1	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	48.80	4.280	3.3	<0.055	<0.09	0.024	<0.025	0.06
3488	0.0	49.60	4.400	4.2	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06
	0.1	49.60	4.400	4.4	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.08
	0.5	49.60	4.400	4.6	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.07
	1.5	49.60	4.400	3.5	<0.055	<0.09	<0.018	<0.025	0.06

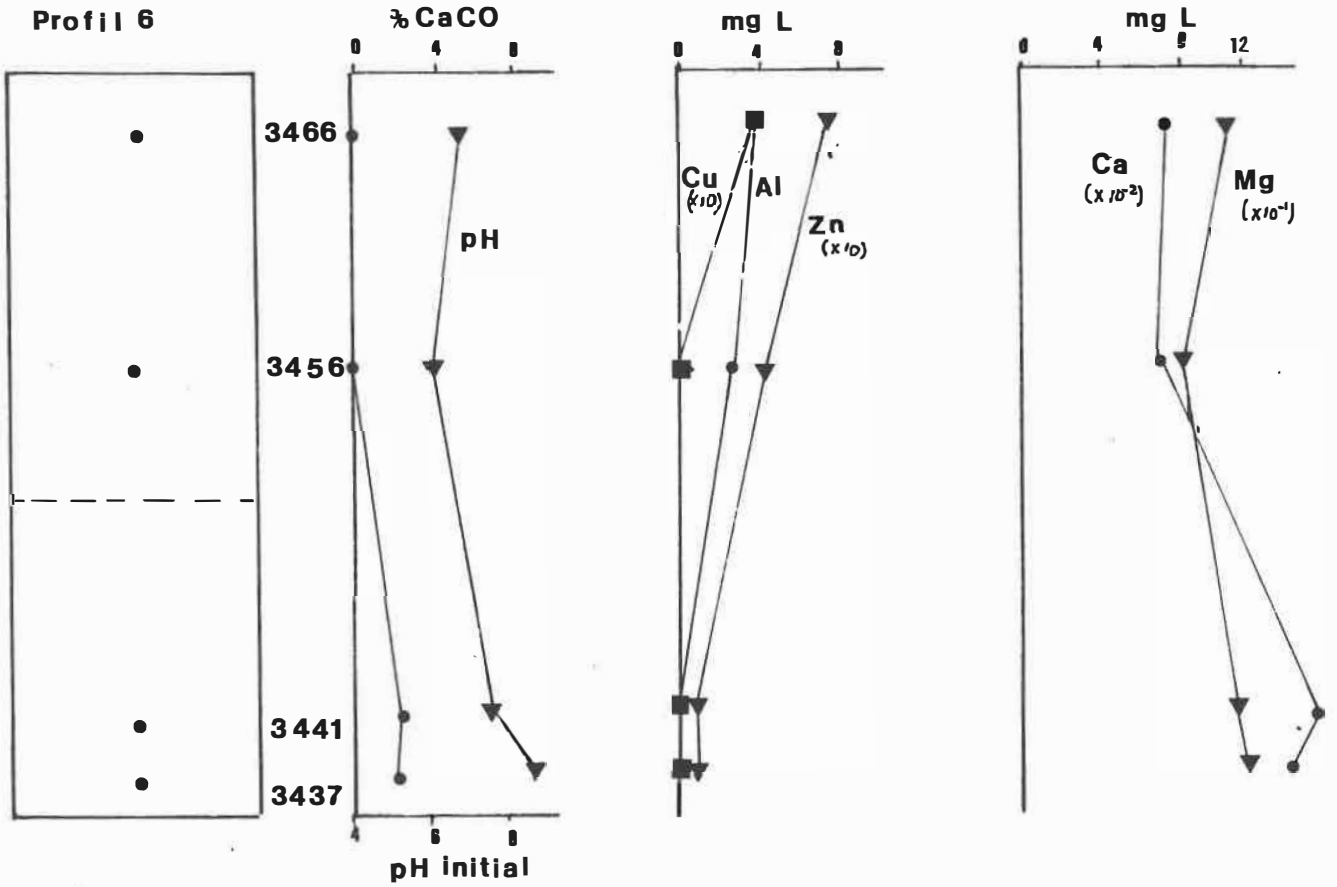
ANNEXE F

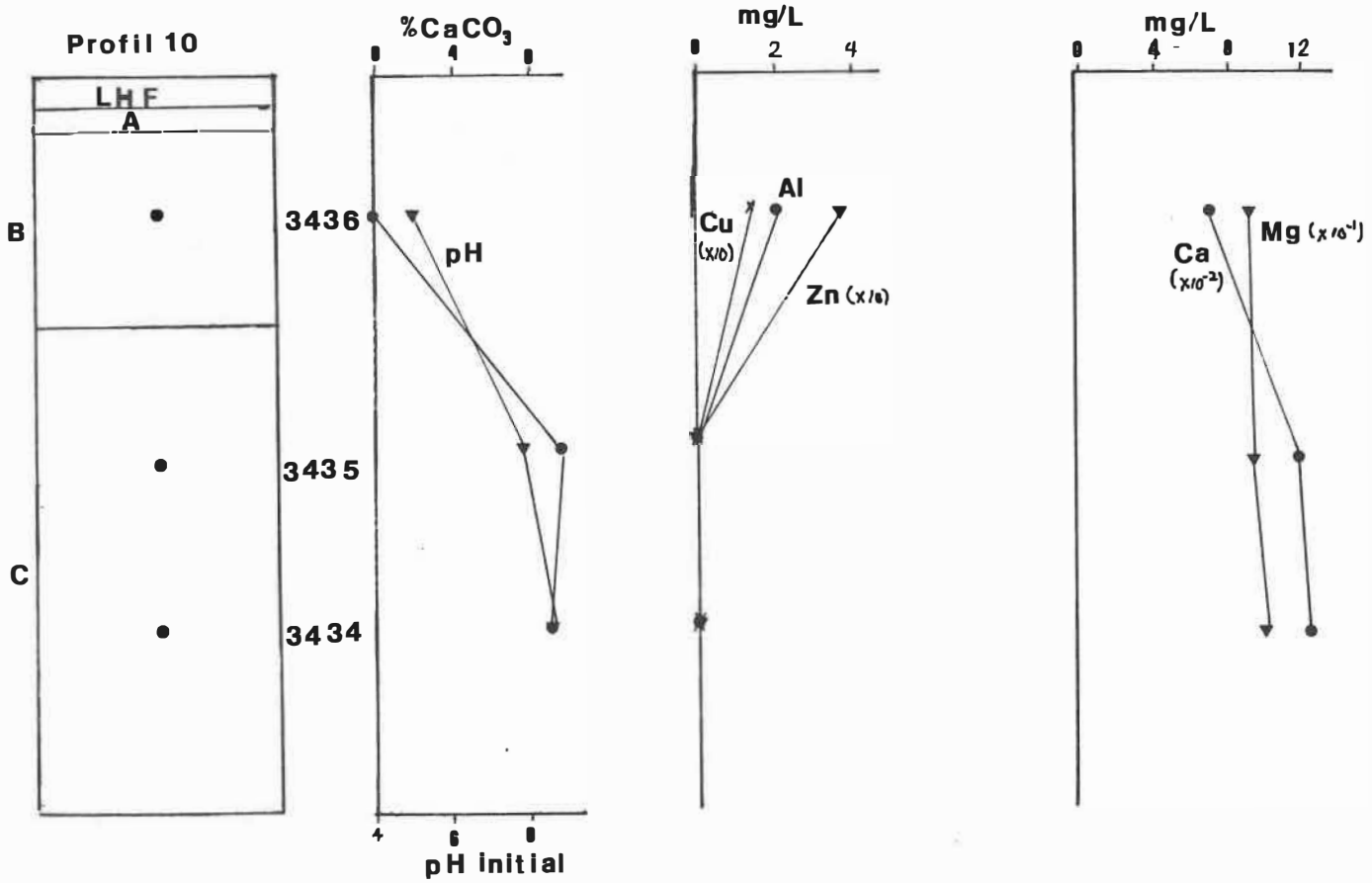

Profil 1
LHF
A
B
C
3016
3012
3010
3008
3003
% CaCO3
0
4
8
pH
4
6
8
pH initial
mg / L
0
4
6
(x10)
Cu
Zn (x10)
Al
mg / L
0
4
6
8
Ca (x10-2)
Mg
(x10-1)


Profil 2
% CaCO3
0 4 6
mg/L
0 3 5
mg/L
0 4 8 12 14
argile
3488
3484
3477
3471
C
pH
Zn (x10)
Al
Ca (x10-2)
Mg
(x10)
4 6 8
pH initial


Profil 4
%CaCO3
0
4
8
3083
3069
3059
3053
pH
4
6
8
pH initial
mg/L
0
4
6
8
Cu
(x10)
Al
Zn
(x10)
mg/L
0
4
6
8
Mg
(x10⁻¹)
Ca (x10⁻²)


Profil 5
%CaCO3
mg/L
mg/L
B
C
3140
3136
3135
3133
3096
3091
pH
Zn (x10)
Cu (x10)
Al
Mg
Ca (x10-2)
pH initial


Profil 6
% CaCO
0
4
8
3466
3456
3441
3437
pH
4
6
8
pH initial
mg L
0
4
8
Cu
(x10)
Al
Zn
(x10)
mg L
0
4
8
12
Ca
(x10⁻²)
Mg
(x10⁻¹)


Profil 10
LHF
A
B
C
3436
3435
3434
%CaCO3
0
4
8
pH
4
6
8
pH initial
mg/L
0
2
4
Cu
(x10)
Al
Zn (x10)
mg/L
0
4
8
12
Ca
(x10-2)
Mg (x10-1)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290868 7