

ANNE-MARIE GIRARD-CLOUTIER

**RECONSTITUTION PALÉOBOTANIQUE ET
PALÉOCLIMATIQUE EN UNGAVA : ANALYSE
POLLINIQUE DES SÉDIMENTS DU CRATÈRE DES
PINGUALUIT**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise avec mémoire en sciences géographiques
pour l'obtention du grade de Maître en sciences géographiques (M.Sc.Géogr.)

DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Ce mémoire de maîtrise en palynologie porte sur la reconstitution des conditions paléoenvironnementales au Québec septentrional à l'aide de l'étude des sédiments préservés au fond du Cratère des Pingualuit. L'objectif principal est de reconstituer l'histoire du couvert végétal régional à l'aide de l'analyse pollinique et d'effectuer une reconstitution des conditions paléoclimatiques à l'aide de la technique des meilleurs analogues modernes. L'analyse pollinique a permis de montrer, en plus de la composition de la flore arctique, qu'à la suite du dernier retrait glaciaire il y a eu formation d'une toundra arbustive dominée par l'aulne crispé. Le couvert végétal s'est ensuite graduellement ouvert, se transformant en une toundra herbacée dominée par les cypéracées et les graminées. Les reconstitutions paléoclimatiques quantitatives montrent que les températures de juillet ainsi que les précipitations annuelles les plus élevées (9-9,5°C; 450-500 mm/an) correspondent à la période durant laquelle la végétation de toundra arbustive était la plus dense.

Remerciements

J'aimerais offrir mes sincères remerciements à plusieurs personnes sans qui la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Tout d'abord, à Martin Lavoie, mon directeur, qui a été un guide édifiant tout au long de mon parcours universitaire, qui a su bien m'encadrer jusqu'à m'amener à faire des études graduées!

À Pierre J.H. Richard, mon co-directeur, pour sa rigueur et le partage de son savoir. Merci également à Reinhard Pienitz, directeur du *New Québec Crater Lake Project*, de m'avoir permis de participer à cette aventure.

À toute l'équipe du laboratoire de paléoécologie terrestre du CEN, aux coéquipiers/ères fidèles, Julien Colpron-Tremblay, Claire Lacroix et Chloé Laframboise et un merci particulier à Élisabeth Robert pour avoir toujours été là, dans les bons moments et les plus difficiles. Elle a su me transmettre son enthousiasme pour le très petit et son grand positivisme!

À Nicole Morasse du laboratoire Jacques-Rousseau de l'Université de Montréal pour son aide avec l'identification pollinique et pour m'avoir donné confiance en mes capacités de palynologue. Merci aussi à Bianca Fréchette du GEOTOP de l'Université du Québec à Montréal pour sa précieuse aide avec les chiffres.

À mes amis et à ma famille qui m'ont toujours encouragée et surtout un merci spécial à mon copain Rahim Chabot pour son support constant!

Ce projet a été rendu possible grâce à la participation financière du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que de la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère (FCSCA).

Table des matières

RÉSUMÉ	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	V
INTRODUCTION	1
Les enregistrements de l'interglaciaire Sangamonien	2
Études récentes au Cratère des Pingualuit	4
PROBLÉMATIQUE	7
OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	8
Objectifs	8
Hypothèse	9
CHAPITRE 1 – SITE D'ÉTUDE	10
CONTEXTE HISTORIQUE	11
CONTEXTE BIOPHYSIQUE	13
Climat.....	13
Géologie.....	13
Glaciation et histoire postglaciaire	14
Végétation.....	16
CHAPITRE 2 - MÉTHODES	17
TRAVAUX DE TERRAIN	17
TRAVAUX EN LABORATOIRE	17
Datations	19
REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS	19
Approche méthodologique.....	19
Analyse sporopollinique	20
<i>Lac du Sud-Ouest</i>	21
Technique des analogues polliniques modernes	21
<i>Reconstitution climatique</i>	22

<i>Données polliniques et climatiques</i>	23
<i>Représentation des résultats</i>	24
CHAPITRE 3 – RÉSULTATS	26
STRATIGRAPHIE DES SÉDIMENTS	26
CHRONOLOGIE	27
ANALYSE SPOROPOLLINIQUE	30
Unités M1, M2 et M3	30
Unité A.....	31
Unité B	35
<i>Zone B1</i>	35
<i>Zone B2</i>	35
<i>Zone B3</i>	36
<i>Zone B4</i>	37
<i>Interprétation de l'Unité B</i>	37
Unité C	38
LAC DU SUD-OUEST.....	38
ANALYSES NUMÉRIQUES.....	42
CHAPITRE 4 – DISCUSSION	47
STRATIGRAPHIE	47
DYNAMIQUE VÉGÉTALE	48
RECONSTITUTIONS CLIMATIQUES.....	52
Comparaison des températures moyennes de juillet.....	53
CONCLUSION	55
Perspectives de recherche	56
RÉFÉRENCES	58
ANNEXE A : DONNÉES CHRONOLOGIQUES DU CRATÈRE DES PINGUALUIT	67
ANNEXE B: TAXONS POLLINIQUES NON REPRÉSENTÉS DANS LES DIAGRAMMES SPOROPOLLINIQUES	69

Liste des figures

Figure 1: Localisation de quelques études paléoenvironnementales réalisées dans le nord du Québec et dans les îles de l'Arctique canadien.....	1
Figure 2: Cratère El'Gygytgyn, péninsule de Chukotka, Sibérie.....	4
Figure 3: Localisation du lac du Sud-Ouest.....	5
Figure 4 : Carte de localisation du site d'étude et des zones de végétation du Nord du Québec.....	11
Figure 5: Carte géologique du Québec et détail de la ceinture du Cape Smith.....	14
Figure 6: Les épisodes d'écoulement glaciaire lors de la glaciation wisconsinienne	15
Figure 7: Séquence sédimentaire composite extraite du Cratère des Pingualuit et niveaux analysés pour le contenu grains de pollen et spores.....	18
Figure 8: Méthodologie de l'analyse pollinique.....	20
Figure 9: Schématisation du postulat sur lequel repose la méthode des analogues modernes.....	22
Figure 10: Séquence sédimentaire composite du Cratère des Pingualuit, datations, niveaux analysés pour l'analyse pollinique et zones d'assemblage pollinique.....	29
Figure 11: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit.....	32
Figure 12: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit – Unité B.....	33
Figure 13: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit – Unité C.....	34
Figure 14: Diagramme pollinique simplifié du lac du Sud-Ouest.....	41
Figure 15: Reconstitution des températures moyennes de juillet.....	44
Figure 16 : Reconstitution des températures moyennes de janvier.....	45
Figure 17: Reconstitution des précipitations moyennes annuelles.....	46
Figure 18: Répartition actuelle de l'aulne crispé (<i>Alnus crispa</i>) et de l'aulne rugueux (<i>Alnus rugosa</i>).....	50

Introduction

À ce jour, quelques études paléoécologiques ont été effectuées dans le nord québécois afin de reconstituer l'histoire postglaciaire de la végétation à l'échelle régionale (e.g. Bartley et Matthews, 1968; Short et Nichols, 1977; Richard, 1981; Gajewski et Garralla, 1992; Gajewski et al., 1993; Ouzilleau-Samson et al., 2010) (Figure 1, sites 1 à 5). Bien que l'âge exact du retrait des glaces ne soit pas connu de façon précise partout, nous savons que vers 6800 ans étal. BP, le Nunavik était au moins partiellement libre de glace (Payette, 1993; Richard, 1995). Les côtes et les régions plus au sud (Richard, 1981) furent parmi les premières déglacées.

Bien que le retrait des glaces ne soit pas synchrone partout, le patron de la colonisation végétale postglaciaire est généralement similaire entre les différentes régions. Une toundra herbacée, dominée par les Cyperaceae, se serait d'abord rapidement constituée. Le couvert végétal se serait ensuite densifié et fut caractérisé par l'arrivée des premiers arbustes, dont l'aulne crispé (*Alnus crispa*) et le bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*), pour mener à la

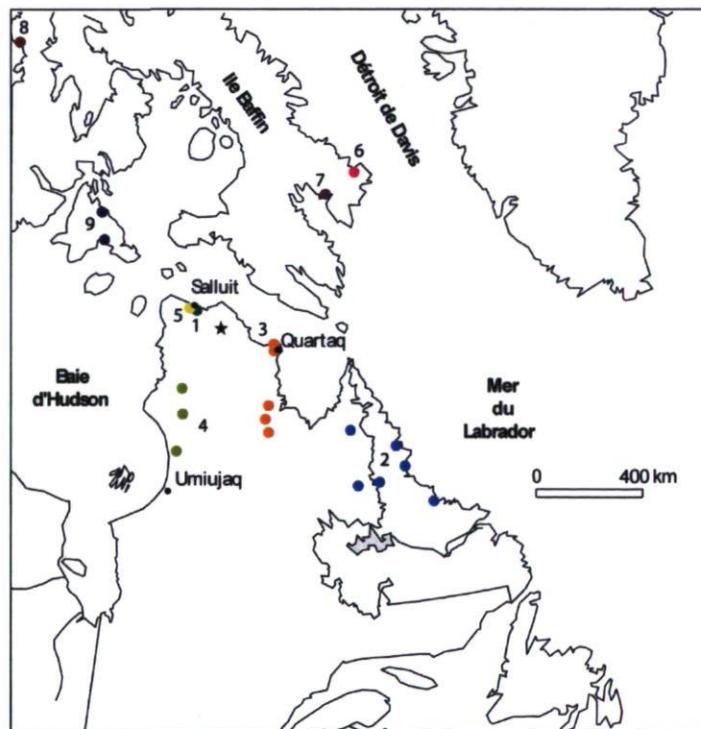


Figure 1: Localisation de quelques études paléoenvironnementales réalisées dans le nord du Québec et dans les îles de l'Arctique canadien. ★ Cratère des Pingualuit 1- Bartley et Matthews (1968) 2- Short et Nichols (1977) 3- Richard (1981) 4- Gajewski et Garralla (1992) 5- Ouzilleau-Samson et al. (2010) 6- Wolfe et al. (2000) 7- Fréchette et al. (2006) 8- Zabenskie et Gajewski (2007) 9- Rolland et al. (2008)

constitution d'une toundra arbustive (Gajewski et Garralla, 1992) pour les régions plus au nord et une toundra forestière ouverte à dense pour les régions plus au sud (Short et Nichols, 1977; Richard, 1981; Richard et al., 1982). Cette densification du couvert végétal serait associée à des conditions climatiques plutôt clémentes. Des conditions subséquentes plus fraîches (Néoglaciale) auraient eu pour conséquences une ouverture du paysage et la formation du couvert végétal du Québec septentrional tel que nous le connaissons aujourd'hui. Bien que les changements au sein de la composition végétale n'aient pas eu lieu de manière synchrone pour tous les sites étudiés, les principaux changements survenus vont néanmoins tous dans le même sens (Richard, 1981).

Des reconstitutions paléoclimatiques quantitatives ont aussi été effectuées à l'aide de diptères par Rolland et al. (2008) à l'île de Southampton (Figure 1, site 9). Les tendances générales dégagées de cette étude sont qu'entre 5570 et 4360 ans éal. BP, les conditions environnementales étaient très variables, cette période étant associée au retrait de la mer postglaciale de Tyrrell. La température moyenne annuelle était alors plus chaude de 2°C par rapport à l'actuel. Vers 3570 ans éal. BP, il y a eu une stabilisation des conditions accompagnée d'une légère diminution de la température. Des résultats similaires ont aussi été obtenus par Zabenskie et Gajewski (2007) dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire, basée surtout sur l'analyse pollinique, à la péninsule de Boothia au Nunavut (Figure 1, site 8). Dans cette étude, les reconstitutions climatiques ont été effectuées à l'aide d'une fonction de transfert pollen-climat basée sur la technique des meilleurs analogues modernes : avant 5700 ans éal. BP, la température moyenne de juillet aurait été plus basse qu'aujourd'hui (6,6°C), puis aurait augmenté jusque vers 3800 ans éal. BP (7,8°C) pour diminuer à nouveau jusqu'à nos jours.

Les enregistrements de l'interglaciaire Sangamonien

Dans les régions autrefois englacées, le passage des glaciers a eu pour conséquence de détruire en grande partie les archives sédimentaires des interglaciaires antérieurs à celui de l'Holocène, notamment celles de l'interglaciaire Sangamonien (stade isotopique 5e). Nos connaissances sur les conditions paléoenvironnementales du Sangamonien sont encore

fragmentaires dans les régions nordiques. Des travaux récents effectués à l'aide, entre autres, de l'analyse pollinique par Wolfe et al. (2000) et Fréchette et al. (2006) sur des sédiments lacustres récoltés à l'île de Baffin (Figure 1; sites 6 et 7) ont permis de fournir des informations paléoenvironnementales remontant à plus de 90 000 ans. Selon ces travaux, les températures moyennes de juillet pour l'est de l'île de Baffin auraient été plus chaudes au cours du dernier interglaciaire, de l'ordre de 4 à 5°C par rapport à nos jours. De telles conclusions, sans être aussi précises, ont également été obtenues dans d'autres études réalisées à de plus basses latitudes, entre autres, dans la vallée du Saint-Laurent (St-Onge, 1987; Anderson et al., 1990; Clet-Pellerin et Occhietti, 2000).

Les conditions environnementales du Sangamonien sont encore peu connues, car les sédiments datant de cette période sont rares en milieu continental ou les séquences sédimentaires sont incomplètes. Souvent les études paléoenvironnementales qui couvrent les plus longues séquences chronologiques reposent sur des carottes marines (e.g. Marret et al., 2001), le plus souvent au large des côtes de l'Atlantique Nord (Channell et al., 2006), de l'Arctique canadien (Hillaire-Marcel et de Vernal, 1989) et du Groenland (de Vernal et Hillaire-Marcel, 2008).

En dépit de leur extrême rareté, les études paléoécologiques effectuées sur des sédiments accumulés en milieu continental dans des cratères d'impact météoritique peuvent parfois remédier en partie à ce problème. En effet, une des caractéristiques particulières aux lacs de cratère d'impact météoritique est la continuité des séquences sédimentaires, car les sédiments ont pu être préservés de l'érosion glaciaire. La carotte sédimentaire recueillie au lac El'gygytgyn dans le nord de la Sibérie (Figure 2) en est un bon exemple. Cette carotte couvre sans doute la plus longue période temporelle continue en milieu continental pour les régions qui furent englacées. D'une longueur de 12,90 m, elle comporte l'enregistrement de trois cycles glaciaire-interglaciaire, soit 300 000 ans d'histoire (Lozhkin *et al.*, 2007; Melles *et al.*, 2007). Des analyses palynologiques ainsi que des reconstitutions climatiques (précipitations moyennes de janvier et de juillet, températures moyennes des mois de janvier et juillet) ont été effectuées à l'aide de la technique des analogues modernes pour l'ensemble de la carotte. L'histoire de la végétation de la péninsule de Chukotka a donc pu

être établie de façon continue. Ces analyses ont non seulement permis de mettre en lumière des patrons de succession végétale en lien avec les changements climatiques, mais aussi de constater des signaux associés à des espèces particulières. Par exemple, la transition d'une période glaciaire à une période interglaciaire fut généralement caractérisée par une augmentation de la représentation pollinique de *Betula* et parfois suivie d'une augmentation d'*Alnus* puis de *Pinus* (Lozhkin et al., 2007).

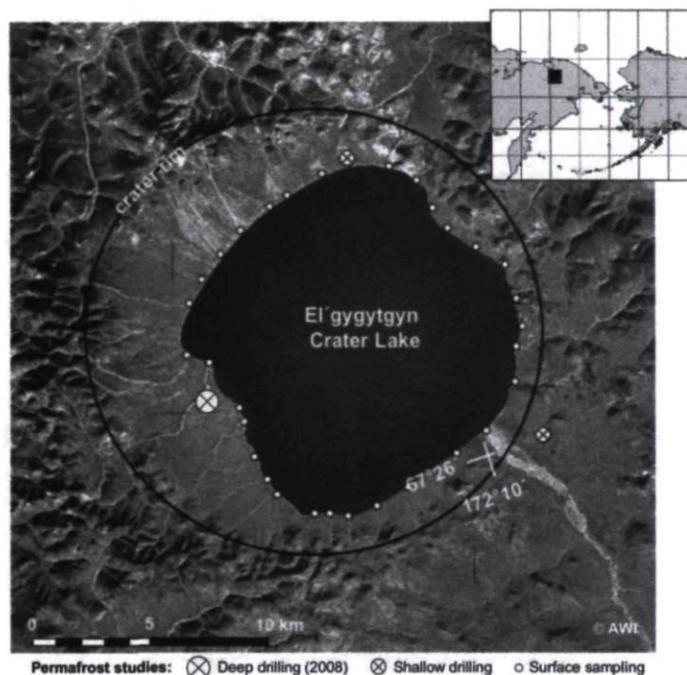


Figure 2: Cratère El'Gygytgyn, péninsule de Chukotka, Sibérie (www.avi.de)

La preuve de la pertinence d'effectuer des études paléoécologiques sur les sédiments se trouvant dans des cratères d'impact météoritique n'est donc plus à faire et donne à la présente étude un caractère exceptionnel.

Études récentes au Cratère des Pingualuit

Bien que les recherches concernant le Cratère des Pingualuit n'aient jamais vraiment cessé depuis sa découverte en 1943, l'expédition organisée en 1988 par Michel Bouchard, alors professeur au Département de géologie de l'Université de Montréal, a apporté un nouveau souffle. En effet, les thèmes de recherche abordés avant les années 1980 étaient plutôt axés sur l'origine et l'âge du cratère (Bouchard, 1989a) alors qu'au cours de l'expédition de

1988, les sujets étudiés se sont grandement diversifiés. L'âge et la formation du cratère demeurent, bien entendu, à l'ordre du jour, mais on s'aperçoit alors que les sédiments qui s'y trouvent auraient sans doute été préservés de l'érosion glaciaire malgré le passage répété des glaciers (Bouchard, 1989b). Débute alors une série d'investigations paléoclimatiques, stratigraphiques, biologiques, limnologiques, ichtyologiques, archéologiques et ethnologiques.

En ce qui concerne l'analyse pollinique des sédiments du cratère, les limites techniques pendant l'expédition de 1988 n'ont pas permis d'échantillonner de sédiments. Une visite exploratoire antérieure d'une équipe de Michel Bouchard durant l'été de 1986 a toutefois permis de récolter, à l'aide d'une benne Eckman, un prisme sédimentaire couvrant les 14 cm supérieurs du dépôt (Richard et al., 1989). L'analyse pollinique réalisée à tous les deux centimètres et deux datations au radiocarbone montrent néanmoins que cette séquence couvre une bonne partie de la période postglaciaire pour cette région, soit depuis approximativement 5780 ans *étal.* BP (Richard et al., 1989 ; 1991). La datation des sédiments recueillis en 1988 dans un autre lac situé à proximité du cratère (lac du Sud-Ouest; 61°15'45'' N, 73°42'40'' O; Figure 3) montre qu'ils couvrent probablement eux aussi toute la période postglaciaire (7760 ans *étal.* BP).

L'analyse sporopollinique des sédiments du Cratère des Pingualuit et du lac du Sud-Ouest a permis de réaliser une reconstitution de l'histoire postglaciaire de la végétation régionale.

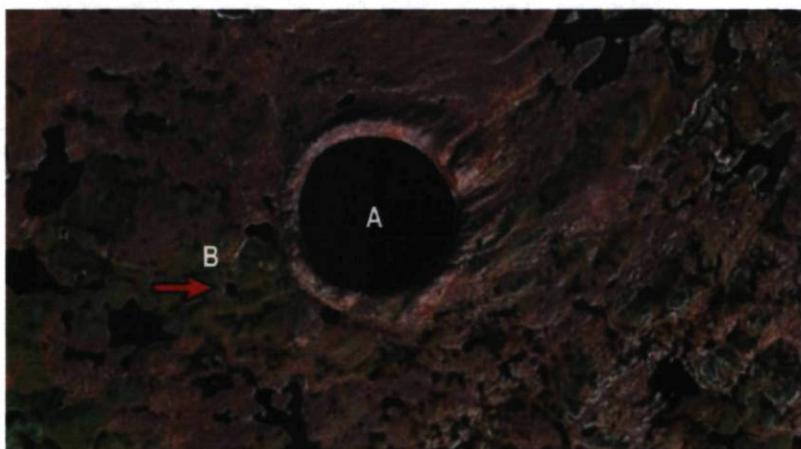


Figure 3: Cratère des Pingualuit (A) et localisation du lac du Sud-Ouest (B), pointé par la flèche (Google Earth)

Cette histoire comporte trois grandes phases. Dans un premier temps, à la suite de la déglaciation, une végétation de toundra s'est rapidement constituée. Certaines espèces étaient alors plus abondantes qu'aujourd'hui comme les éricacées, les saules (*Salix* sp.), les lycopodes (*Lycopodium* sp.) ainsi que le bouleau glanduleux, ce dernier étant aujourd'hui absent de la région. Ensuite, l'aulne crispé (aussi absent aujourd'hui) a pris progressivement la place du bouleau glanduleux. Toutefois, l'importance du couvert arbustif a subséquentement diminué considérablement au profit des cypéracées. C'est à cette époque que commencent à se développer, dans les zones basses, les premières prairies tourbeuses toujours présentes de nos jours (Richard et al., 1989). Finalement, la dernière phase de l'histoire de la végétation est caractérisée par la disparition définitive des arbustes et une ouverture du paysage.

Un fait surprenant a été révélé lors de l'analyse pollinique des deux lacs. En effet, les concentrations polliniques des sédiments à la base des carottes (argile silteuse basale) sont plus élevées que celles de la gyttja sommitale. Une hypothèse proposée par Richard et al. (1989) pour expliquer ces concentrations élevées est qu'à la suite de la déglaciation, les eaux de ruissellement auraient pris en charge des grains de pollen d'origine préglaciaire incorporés à la matrice fine des tills, qui se seraient par la suite déposés dans les lacs et incorporés aux sédiments postglaciaires. Ce processus est appelé resédimentation. Afin de vérifier cette hypothèse, une analyse du contenu sporopollinique de tills situés à proximité des lacs a été effectuée. Les résultats ont montré que la concentration pollinique des tills est exceptionnellement élevée (Richard et al., 1991). Pour la plupart des taxons polliniques, les pourcentages de représentation sont les mêmes que ceux trouvés dans les sédiments inorganiques du début du postglaciaire, appuyant ainsi l'hypothèse selon laquelle ils dériveraient des tills. Il est important de tenir compte de ce processus pour l'interprétation de la première phase de la colonisation végétale tirée du diagramme pollinique du lac du Sud-Ouest. Par contre, quelques taxons (e.g. *Lycopodium*, *Betula*) sont présents en plus faible proportion dans les tills qu'au sein des sédiments lacustres, ce qui permet de penser qu'une partie des grains de pollen soit d'origine primaire. Le problème consiste donc à quantifier les deux types d'apports.

Ces données ont été approfondies par Fréchette et al. en 1996. Ces auteurs ont tenté d'expliquer les fortes concentrations polliniques des tills de la péninsule du Nunavik. Ils ont proposé que les tills se trouvant à proximité de la ligne de partage glaciaire soient plus riches que ceux situés plus loin. Trois conclusions ont été tirées de leur étude : d'abord, les tills contenant de fortes quantités de pollen sont courants au Nunavik; ensuite, il existe bel et bien un lien entre les concentrations polliniques des tills et les caractéristiques morphologiques du dernier glacier, c'est-à-dire que lorsque le glacier était moins abrasif, les tills ont préservé l'accumulation pollinique préexistante; enfin, le lien entre les assemblages polliniques actuels et les assemblages polliniques fossiles trouvés dans les tills est faible (Fréchette et al., 1996). En somme, comme l'érosion glaciaire a peu affecté la région immédiate du cratère pendant la dernière glaciation, et probablement lors des glaciations antérieures, le pollen des derniers interstadias et interglaciaires a été conservé en partie dans le till régional.

Problématique

Dans le nord du Québec, le Cratère des Pingualuit (Figure 1) s'est formé lors d'un impact météoritique ayant eu lieu il y a environ 1,3 million d'années. Selon Bouchard (1989b), comme le lac Pingualuk au sein du cratère est un système fermé (aucun affluent ni effluent), les sédiments, tant organiques qu'inorganiques, s'accumuleraient constamment depuis ce temps et n'auraient pas été affectés outre mesure par l'érosion glaciaire. On présume également que, même si le niveau d'eau du lac venait à augmenter assez pour rejoindre le réseau hydrique extérieur au cratère (ce qui représenterait une élévation d'au moins 55 mètres), les sédiments préalablement accumulés au fond y resteraient intacts en raison de la profondeur de l'eau, soit 300 mètres au dessous du plus bas seuil de plein bord (Bouchard et Marsan, 1989). Aussi, le cratère est-il qualifié de « micro-bassin sédimentaire » et on suppose qu'il en a toujours été ainsi (Bouchard, 1989b).

La présente étude est effectuée dans le cadre d'un projet de recherche pluridisciplinaire intitulé « *Climate reconstruction of the terrestrial Arctic at different time scales: New Québec Crater Lake project* » dirigé par M. Reinhard Pienitz du Centre d'études nordiques

de l'Université Laval. Ce projet international regroupe des chercheurs du Canada, des États-Unis, de l'Allemagne, de la Suisse, de la Suède et de la Finlande. Démarré en janvier 2006, il a pour but d'examiner, sous différents angles, le Cratère des Pingualuit. Plusieurs analyses sont présentement en cours en ce qui concerne la reconstitution des conditions paléoenvironnementales de la région du cratère et de la population de poissons présente dans le lac du cratère.

Des indications sédimentologiques suggèrent que des sédiments datant de l'interglaciaire Sangamonien pourraient être présents. Ceci nous amène à nous poser la question suivante : quelle fut l'histoire de la végétation et du climat depuis le dernier retrait glaciaire dans la région du Cratère des Pingualuit et, le cas échéant, pendant l'interglaciaire Sangamonien?

Objectifs et hypothèses

Objectifs

L'objectif général de ce mémoire est de reconstituer l'histoire et la dynamique de la végétation d'un secteur de la péninsule de l'Ungava à l'aide de l'analyse pollinique des sédiments du Cratère des Pingualuit. Les objectifs spécifiques sont :

- i) de caractériser le contenu pollinique des différentes unités sédimentaires d'une carotte recueillie au cratère;
- ii) d'examiner la réponse de la végétation aux changements environnementaux : les spectres polliniques des unités sédimentaires organiques permettront de dresser des diagrammes sporopolliniques dont les courbes pourront être interprétées en terme de développement de la végétation environnante, à condition que le pollen composant ces spectres soit principalement d'origine primaire;
- iii) d'élaborer une reconstitution quantitative des climats successifs à l'aide de la méthode des meilleurs analogues modernes, toujours en supposant que l'origine du pollen soit surtout primaire.

Hypothèse

L'hypothèse qui sera testée est que, pour l'ensemble de la séquence temporelle couverte par les sédiments récoltés au Cratère des Pingualuit, la dynamique végétale s'est modifiée en fonction des changements du climat. Nous supposons que lorsque les conditions climatiques furent plus clémentes, le couvert végétal se serait diversifié et densifié contrairement aux périodes plus difficiles où il se serait clairsemé.

Chapitre 1

Site d'étude

La région d'étude se situe au nord de la péninsule d'Ungava sur le territoire du Nunavik, ce qui veut dire « endroit où l'on vit » en langue inuktitute (Qumaq, 1992). Elle est entourée de la baie d'Hudson à l'ouest, du détroit de l'Hudson au nord et de la baie d'Ungava à l'est. La communauté des Nunavimmiuts comprend 14 villages répartis principalement sur les côtes alors que le territoire à l'intérieur des terres est pratiquement inhabité.

Le site à l'étude est le Cratère des Pingualuit (autrefois nommé Cratère du Nouveau-Québec) et le lac présent au fond de celui-ci se nomme le lac Pingualuk. Le cratère se trouve dans le parc national des Pingualuit. Créé en 2003, il est le premier parc national du Nunavik (Figure 4) et son ouverture officielle a eu lieu en novembre 2007 (ARK, 2008). D'une superficie de 1134 km², il vise à protéger le Cratère des Pingualuit. Le cratère est en effet unique par sa forme, son jeune âge (1,3 million d'années) qui fait en sorte que sa structure est encore pratiquement intacte, ainsi que la clarté des eaux qui le combent. Situé au cœur du Plateau de l'Ungava, le cratère représente un site unique au Québec (MDDEP, 2005). L'accueil du parc se trouve au village de Kangiqsujuaq à environ 100 km au nord-est (Figure 4).

Le cratère se situe à la latitude de 61°17' N et à la longitude de 73°40' O. D'un diamètre de 3,4 km, il présente une profondeur (eau et sédiments) maximale de 430 m. La bordure du cratère atteint, à son point le plus haut, l'altitude de 657 m et constitue le sommet le plus élevé de l'Ungava (Richard et al., 1991). Le lac Pingualuk est, pour sa part, d'un diamètre de 2,8 km et d'une profondeur maximale de 267 m (Bouchard et Marsan, 1989). Il ne possède aucun affluent ni effluent; il s'agit donc d'un lac fermé.

terrain auront lieu peu de temps après sa découverte. En 1950, le prospecteur minier Frederick W. Chubb remarque la forme singulière de ce lac presque parfaitement circulaire et il propose l'hypothèse selon laquelle il constituerait un cratère volcanique inactif. Ainsi, selon lui, le sous-sol environnant serait susceptible de contenir des gisements diamantifères comparables à ceux de l'Afrique du Sud (Bouchard, 1989a). F. W. Chubb contacte alors Victor Ben Meen, directeur du *Royal Ontario Museum of Geology and Mineralogy* pour lui faire part de sa découverte. L'opinion de ce dernier penchera plutôt vers l'hypothèse de l'impact météoritique. C'est l'avion prêté par le *Toronto Globe and Mail* qui permet à Meen et Chubb d'effectuer une expédition de reconnaissance au cratère, qui sera alors baptisé *Chubb Crater* en l'honneur du prospecteur. Malgré cette appellation, c'est sous le nom de Cratère du Nouveau-Québec que le site sera enregistré à la Commission canadienne de toponymie en 1954 (Bouchard, 1989a).

À cette époque, le débat sur l'origine du cratère s'étend au sein de la communauté scientifique. Selon certains chercheurs, les parois du cratère seraient différentes de celles des autres cratères d'origine météoritique ce qui leur fait dire que le cratère serait plutôt d'origine volcanique (Hoffleit, 1953). Selon d'autres, malgré l'absence de fragments météoritiques, la forme du cratère concorde avec les études de l'époque selon lesquelles une forme circulaire ou légèrement elliptique est typique de l'impact d'un projectile frappant le sol à un angle de 45° (Meen, 1957). D'autres expéditions (1962, 1986, 1988) permettront de prouver hors de tout doute l'origine météoritique du cratère. En effet, les travaux menés par Grieve et al. (1989) ont démontré cette origine grâce à la découverte d'impactites dans le secteur immédiat du cratère lors de l'expédition de 1988 dirigée par Michel Bouchard. Ils ont aussi déterminé que l'âge de la structure d'impact est d'au maximum 1,3 Ma.

Contexte biophysique

Climat

Les conditions climatiques de la région sont rigoureuses. Il s'agit d'un climat de toundra arctique (Société de la faune et des parcs du Québec, 2000; Walker et al. 2005). La température moyenne mensuelle varie de -28°C (janvier et février; mois les plus froids) à $5,6^{\circ}\text{C}$ (juillet; mois le plus chaud). La période sans gel est variable d'une année à l'autre, mais elle s'étend généralement de la fin du mois de juin à la mi-août (Dignard, 2003). C'est d'ailleurs pendant cette période que les jours sont les plus longs, soit environ 20 heures au solstice d'été, comparativement à un peu plus de 5 heures en hiver (Société de la faune et des parcs du Québec, 2000). Les précipitations annuelles varient entre 300 et 400 mm, dont la moitié tombe sous forme de neige. L'accumulation de neige au sol est généralement inférieure à un mètre (MDDEP, 2005). Le couvert de glace sur le lac Pingualuk atteint entre un et deux mètres d'épaisseur, et ce, sur une période de 10 à 11 mois par année (Société de la faune et des parcs du Québec, 2000).

Géologie

La région se situe dans la province géologique du Supérieur (Figure 5) du Bouclier canadien qui est principalement composé de roches plutoniques et gneissiques. On y trouve aussi des inclusions de roches volcano-sédimentaires datant de l'Archéen (Bouchard et Marsan, 1989). Le secteur immédiat du cratère est composé plus particulièrement de granodiorites, de granites, de tonalites et de gneiss entrecoupés de quelques dykes basiques (Bouchard et Marsan, 1989 ; Madore et al. 2001). Dans cette zone de pergélisol continu, les dépôts de surface consistent essentiellement en des tills et, plus rarement, en des dépôts glacio-lacustres (MDDEP, 2005). Les sédiments meubles sont peu épais et ont été remaniés sur des distances variables. Cette distance est faible près de la limite de partage des glaces, mais croissante vers la périphérie de la péninsule d'Ungava (Fréchette et al., 1996). De nombreux blocs erratiques et perchés caractérisent le paysage. Ils sont parfois d'origine locale, fruits de la météorisation, ou ont été transportés lors d'épisodes glaciaires (Bouchard et al., 1989).

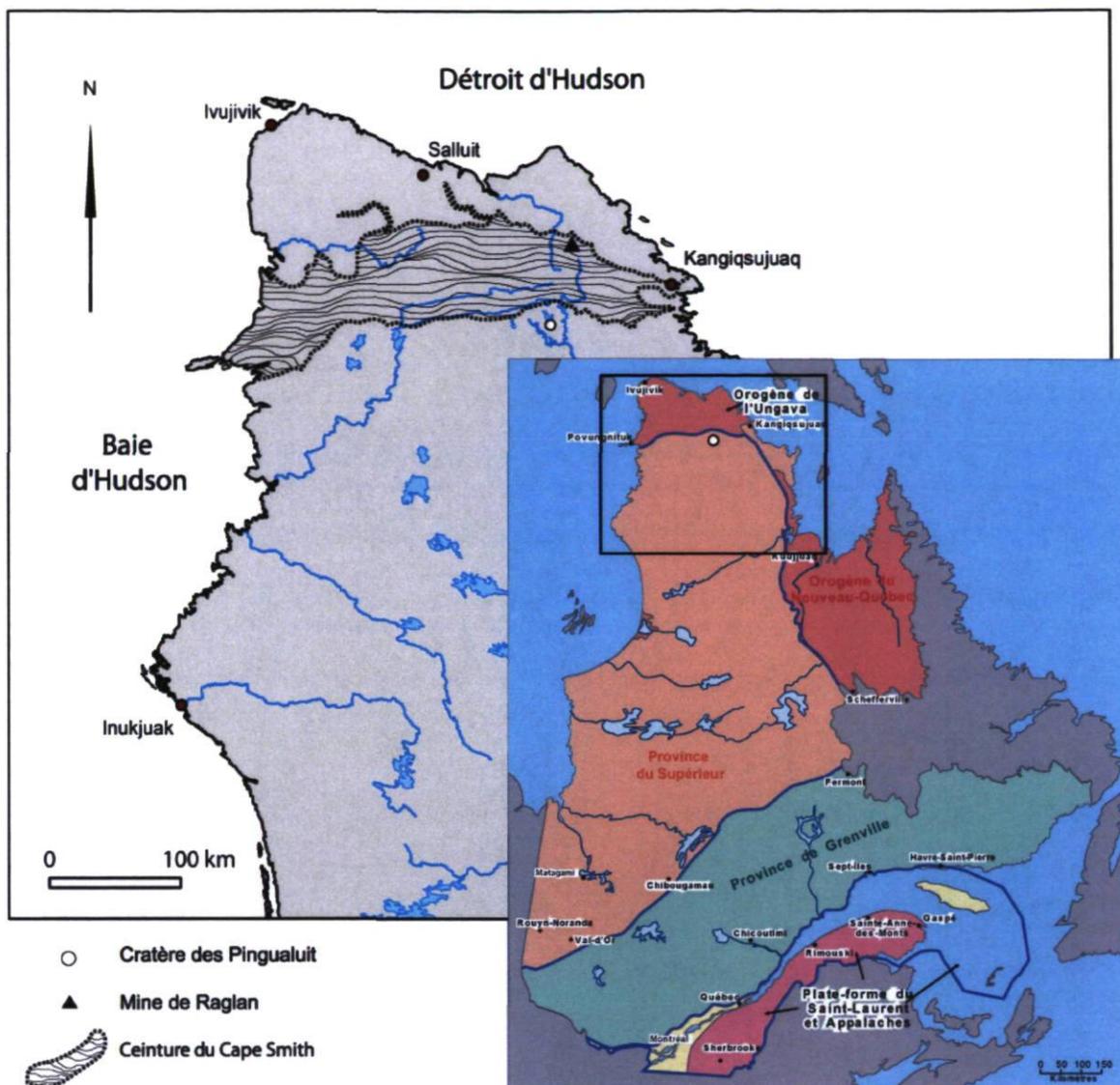


Figure 5: Carte géologique du Québec et détail de la ceinture du Cape Smith (Bourque, 1997; MRN, 2002; Daigneault et Bouchard, 2004)

Glaciation et histoire postglaciaire

Les glaces qui ont recouvert la région ont pris deux directions principales au cours du dernier épisode glaciaire, soit les flots de Payne et de l'Ungava (Bouchard et Marcotte, 1986). L'écoulement du flot de Payne, issu de la masse glaciaire principale, se faisait de façon centrifuge, en direction nord au site d'étude, et recouvrait la majeure partie de la péninsule d'Ungava. Le courant glaciaire principal de Payne aurait été précédé du flot de l'Ungava dont l'écoulement se serait dirigé vers le sud (Figure 6). Selon Daigneault et

Bouchard (2004), le courant glaciaire de l'Ungava représenterait la première phase d'englacement de la péninsule lors du Wisconsinien inférieur. Le passage de cette masse de glace se remarque dans la région du cratère par la présence de blocs erratiques datant du Protérozoïque provenant de la ceinture du Cape Smith (Figure 5) située plus au nord (Bouchard et Marcotte, 1986; Daigneault et Bouchard, 2004). La comparaison des stries laissées par le passage des deux courants permet de les distinguer assez clairement selon leur orientation : le flot de l'Ungava est orienté à l'azimut 110° , alors que celui du flot de Payne est à 45° (Bouchard et al., 1989). À la suite de ces événements, les deux masses de glace se seraient amalgamées pour former la Ligne de partage glaciaire du Nouveau-Québec–Labrador (Daigneault et Bouchard, 2004).

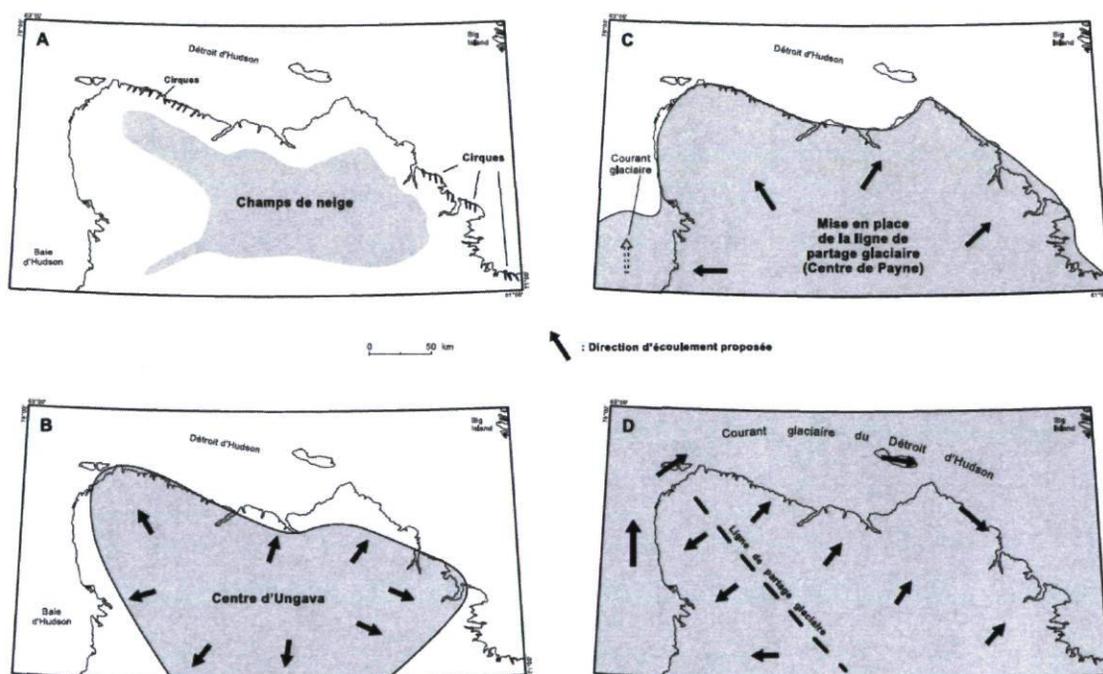


Figure 6: Les épisodes d'écoulement glaciaire lors de la glaciation wisconsinienne (Daigneault et Bouchard, 2004)

Selon Bouchard (1989b), les glaciers qui ont recouvert le cratère auraient été à base froide ou chaude, mais l'érosion causée par ceux-ci n'aurait été, d'une façon ou d'une autre, que faible. En effet, si la température basale du glacier fut basse, c'est-à-dire en dessous du point de fusion, l'érosion des sédiments situés au fond du cratère aurait été pratiquement inexistante. Au contraire, si la température fut au-dessus du point de fusion, un lac sous-

glaciaire se serait alors formé protégeant ainsi le fond du cratère de l'érosion. De plus, le cratère se serait trouvé sous la glace dès le début de la glaciation, et ce, jusqu'à la fin de celle-ci. Ceci expliquerait que le site ait été préservé d'un fort travail érosif des glaces (Bouchard, 1989b).

La dernière déglaciation dans la région du cratère s'est faite progressivement (Bouchard et Saarnisto, 1989). Cette interprétation repose sur la présence de lignes de rivage situées à l'intérieur même du cratère et sur l'étude de chenaux qui traversent son rebord. Des datations au radiocarbone ont permis d'établir que la phase finale de la déglaciation s'est amorcée vers 5000 ans BP en années conventionnelles (Bouchard et Saarnisto, 1989), ce qui équivaut à approximativement 5760 ans BP en années étalonnées.

Végétation

Le Cratère des Pingualuit se trouve au sein du domaine bioclimatique de la toundra arctique arbustive (Figure 4), au nord de la limite des arbres (Payette, 1996). Différentes expéditions ayant eu lieu au cratère depuis plus de 50 ans ont permis de dresser un inventaire floristique comprenant 129 espèces de plantes vasculaires (Rousseau et Raymond, 1955; Richard *et al.* 1989; Dignard, 2003). Les substrats rocheux bien drainés (affleurements, accumulations de gélifractes, champs de blocs) sont colonisés par des lichénaies à lichens crustacés qui constituent le type physiologique dominant. Les genres les plus courants sont *Rhizocarpon*, *Lecanora* et *Lecidia*. Les sites mal drainés, les champs d'ostioles et les bordures de ruisseaux sont colonisés par des herbaçaiies (Dignard, 2003) au sein desquelles les espèces dominantes sont *Carex membranacea*, *Dupontia fisheri* et *Arctagrostis latifolia*. La strate muscinale comprend *Drepanocladus aduncus*, *Limprichtia revolvens*, *Calliergon stramineum* ainsi que *Sphagnum jensenii*, *S. orientale* et *S. capillifolium*. Les saules sont, pour leur part, les seules espèces ligneuses présentes (e.g. *Salix herbacea*, *S. reticulata*, *S. arctica*). Les champs d'ostioles sont caractérisés par *Carex bigelowii* et *C. membranacea* en compagnie de *Calamagrostis stricta* var. *borealis*, *Luzula confusa* et *Polygonum viviparum*. Les bordures des ruisseaux sont occupées par des poacées (*Dupontia fisheri*, *Arctagrostis latifolia*) et des cypéracées (*Eriophorum scheuchzeri*, *E. angustifolium*).

Chapitre 2

Méthodes

Travaux de terrain

Les travaux sur le terrain ont été effectués du 7 au 16 mai 2007 par une équipe internationale de chercheurs dirigée par M. Reinhard Pienitz de l'Université Laval. À ce moment de l'année, l'épaisseur de la glace au sein du lac Pingualuk est encore très épaisse (160 cm) et solide, ce qui offre une base stable pour permettre l'échantillonnage des sédiments. Le choix du point d'échantillonnage ($61^{\circ}16'46,9''N$; $73^{\circ}39'44,6''O$) a été déterminé dès le premier jour. Un trou dans la glace a d'abord été creusé pour mesurer la profondeur d'eau (263 m) et sonder les sédiments à l'aide d'une sonde acoustique. Les sondages ont montré l'apparente absence de blocs dans les sédiments, permettant ainsi l'échantillonnage. Le tripode qui soutient le carottier à percussion (UWITEC) a ensuite été installé au-dessus de l'ouverture (R. Pienitz, communication personnelle). Plusieurs carottes cumulant une longueur totale de 847 cm ont été récoltées dans des tubes d'une longueur de 150 cm et de 6,4 cm de diamètre interne. Une séquence de sédiments de surface (21 cm) a aussi été prélevée à l'aide d'un carottier à percussion.

Travaux en laboratoire

Les sédiments ont été transportés et entreposés au Laboratoire de paléomagnétisme sédimentaire à l'Université du Québec à Rimouski. Ils ont été nettoyés et sous-échantillonnés à différents intervalles pour les diverses analyses paléoécologiques et sédimentologiques. Des sous-échantillons d'un volume maximal de 1 cm (volume variant entre 0,1 et 1 cm selon les niveaux) ont été prélevés par Mme Sonja Hausmann pour l'analyse pollinique à des intervalles variant entre 0,4 et 10 cm selon les endroits. Les sous-échantillons ont été emballés individuellement, identifiés et entreposés dans les réfrigérateurs du Centre d'études nordiques à l'Université Laval. Ils ont ensuite été traités chimiquement (KOH 10 %, HCl, HF, acétolyse) pour l'extraction des grains de pollen, des spores et des autres palynomorphes (Faegri et Iversen, 1989). Au début du traitement

chimique, un volume connu d'une suspension de grains de pollen exotiques d'*Eucalyptus globulus* dont la concentration a été préalablement déterminée a été ajouté à chacun des sous-échantillons pour calculer la concentration pollinique (grains cm^{-3}) (Benninghoff, 1962). Le dénombrement et l'identification des grains de pollen et des spores ont été effectués à l'aide d'un microscope à un grossissement minimal de 400. À l'exception de quelques niveaux (253,5 cm = 218 grains; 270 cm = 105 grains; 272,5 cm = 73 grains; 275,5 cm = 223 grains; 765 cm = 268 grains), une somme pollinique d'au moins 300 grains de pollen de plantes vasculaires terricoles a été atteinte. Les identifications ont été réalisées à l'aide d'atlas polliniques (Richard, 1970; McAndrews *et al.*, 1973; Reille, 1992, 1995, 1998) et de la collection de référence du Laboratoire de paléoécologie terrestre du Centre d'études nordiques. Les analyses ont été effectuées à des intervalles stratigraphiques variables selon les portions de la carotte. Le pas analytique est plus fin pour les sections les plus organiques (0,5 à 1,2 cm) des sédiments (matériel silto-organique; Figure 7) censées correspondre à des périodes interglaciaires.

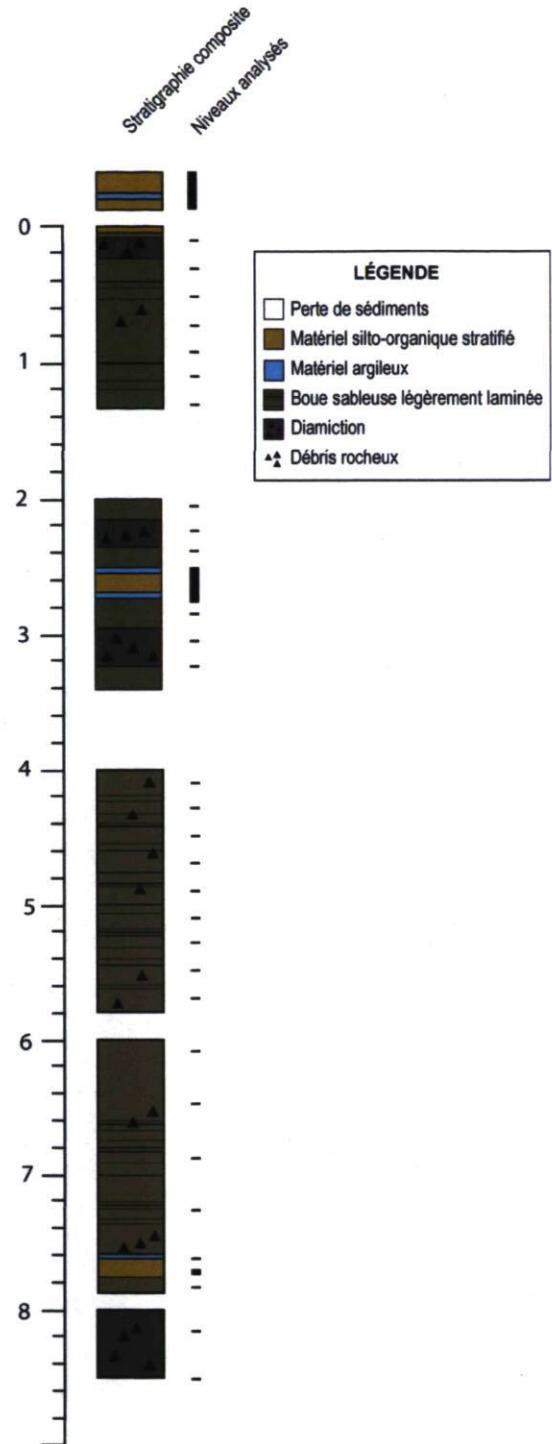


Figure 7: Séquence sédimentaire composite extraite du Cratère des Pingualuit (selon H. Guyard) et niveaux analysés pour le contenu grains de pollen et spores

Datations

Plusieurs échantillons ont été datés. Cette partie du projet a été gérée par M. Hervé Guyard de l'Université du Québec à Rimouski. Deux méthodes ont été employées. Premièrement, des sédiments organiques (35 échantillons) ont été datés par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) au laboratoire de radiochronologie de l'Université Laval ainsi qu'au laboratoire Beta Analytic Inc. en Floride. Les âges obtenus ont été étalonnés à l'aide du logiciel Calib 5.0 (Stuiver et al., 2005). Deuxièmement, des sédiments non-organiques (2 échantillons) ont été datés par luminescence stimulée par infrarouge (LSIR) au laboratoire Lux de l'Université du Québec à Montréal.

Représentation des résultats

Approche méthodologique

L'analyse sporopollinique a été utilisée pour reconstituer l'histoire de la végétation et pour tester notre hypothèse de travail. Toutefois, nous devons en parallèle garder en tête la possibilité de l'incorporation de pollen d'origine secondaire dans les sédiments interglaciaires et s'assurer qu'elle n'invalide pas les reconstitutions de la végétation et des conditions climatiques passées (Figure 8). Pour ce faire, nous analyserons aussi le contenu pollinique des sédiments présumés glaciaires et nous porterons une attention particulière aux mesures de la concentration pollinique dans les tout premiers échantillons correspondants à l'Holocène et, le cas échéant, au dernier interglaciaire.

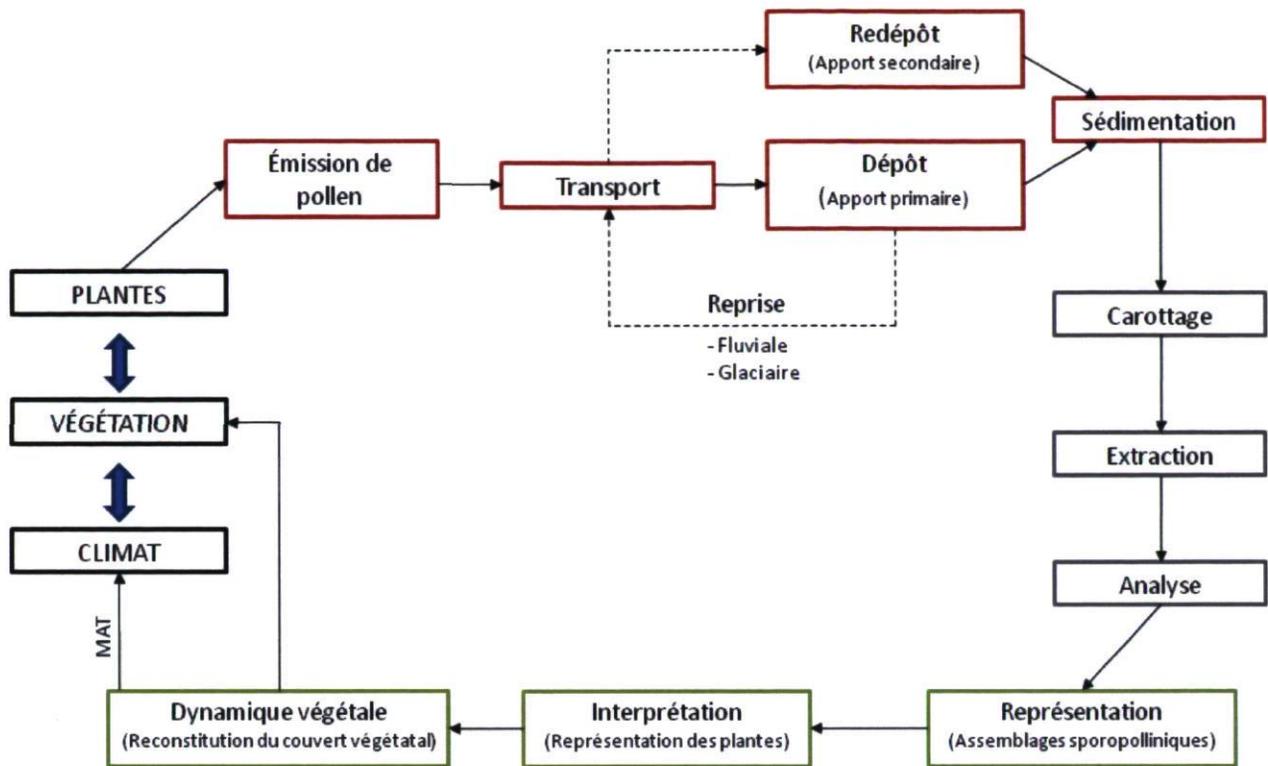


Figure 8: Méthodologie de l'analyse pollinique en termes de végétation et de climat : les boîtes en noir sont les données brutes, en rouge les processus taphonomiques, en gris les manipulations (terrain, laboratoire) et finalement en vert le traitement effectué pour analyser les données brutes, dont la méthode des meilleurs analogues modernes (MAT) pour reconstituer les conditions climatiques passées.

Analyse sporopollinique

Les résultats des analyses sont présentés sous la forme de diagrammes sporopolliniques. La représentation des taxons polliniques est exprimée en pourcentages. En raison des nombreuses inversions des datations radiochronologiques (voir la section des résultats), les influx polliniques n'ont pas été calculés. Les logiciels qui ont été utilisés afin de produire les diagrammes sont Microsoft Office Excel 2007, Palaeo Data Plotter (Juggins, 2002) ainsi que Psimpoll 4.25 (Bennett, 2005). C'est aussi à l'aide de ce dernier logiciel et de la méthode CONISS (Grimm, 1987) que des zones d'assemblage pollinique ont été déterminées numériquement, de manière à interpréter les diagrammes le plus objectivement possible. La nomenclature des noms latins suit celle de Marie-Victorin (2002). Les données

polliniques récoltées au cours de cette étude seront éventuellement ajoutées à la base de données polliniques nord-américaine (www.ncdc.noaa.gov/paleo/napd.html).

Lac du Sud-Ouest

À des fins de comparaisons, nous présentons aussi les résultats de l'analyse sporopollinique effectuée sur la carotte sédimentaire récoltée au lac du Sud-Ouest d'une épaisseur de 90 cm. Ce lac se trouve à proximité du Cratère des Pingualuit, au sud-ouest de ce dernier (Figure 3). Ce petit lac d'une superficie de 3,75 ha, dont la profondeur d'eau maximale est de trois mètres en son centre, est situé à 512 mètres d'altitude. L'échantillonnage a eu lieu lors de la campagne de terrain au Cratère des Pingualuit en 1988 par Pierre J.H. Richard et Alayn C. Larouche à l'aide d'un carottier à piston de type Livingstone (Richard et al., 1991). Une version préliminaire incomplète et sans datation fut publiée par Richard et al. (1981). Douze niveaux ont été analysés à un intervalle stratigraphique moyen de 8 cm qui fut par la suite raffiné à 4 cm. Une somme pollinique minimale de 300 grains de pollen des taxons vasculaires terricoles a été employée pour chacun des niveaux analysés. Les résultats sont présentés en pourcentages. Les datations ^{14}C effectuées plus tard sur ces sédiments sont maintenant disponibles (Richard et al., 1989; P.J.H. Richard et B. Fréchette, données non publiées).

Technique des analogues polliniques modernes

Afin d'effectuer une reconstitution quantitative du climat pour la période temporelle couverte par la séquence sédimentaire du lac Pingualuk, nous avons utilisé la méthode des meilleurs analogues polliniques modernes. Cette reconstitution a été effectuée par Mme Bianca Fréchette du GEOTOP à l'Université du Québec à Montréal.

La technique des analogues modernes repose sur le postulat selon lequel si un assemblage pollinique fossile peut être associé numériquement à un assemblage moderne, on considère alors que les conditions climatiques qui ont permis la production de l'assemblage moderne sont semblables à celles qui ont créé l'assemblage fossile (Figure 9) (Prentice, 1980; Overpeck, 1985; Kerwin et al., 2004; Fréchette et al., 2008). Cette méthode se base sur le fait que la végétation réagit rapidement aux variations du climat et ce de façon synchrone

(Viau et Gajewski, 2009). Il faut aussi supposer que les changements au sein des assemblages polliniques fossiles sont principalement attribuables aux variations climatiques (Kerwin et al., 2004). Ainsi, un assemblage pollinique fossile de composition semblable à une contrepartie moderne doit avoir été produit par une végétation comparable et reflète un climat similaire (Fréchette et al., 2008). L'assemblage pollinique fossile est comparé à une banque de spectres modernes dont les conditions climatiques associées sont connues. Une fonction de transfert est utilisée afin de déterminer mathématiquement quels sont les meilleurs analogues.

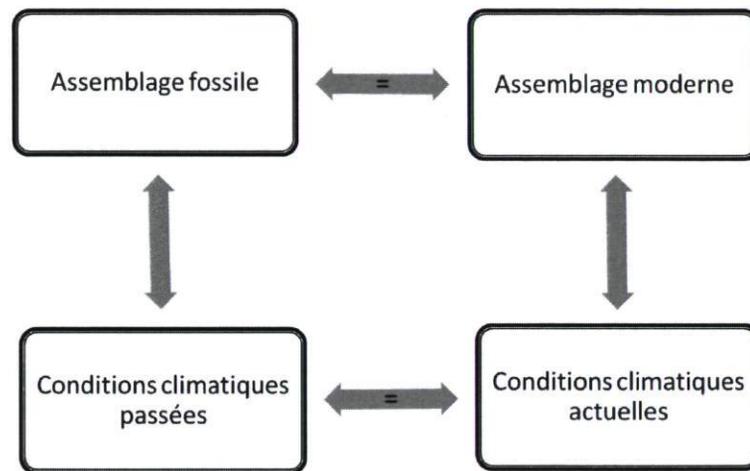


Figure 9: Schématisation du postulat sur lequel repose la méthode des meilleurs analogues modernes

Reconstitution climatique

Afin d'attribuer une valeur numérique à la ressemblance entre un assemblage pollinique moderne et un assemblage fossile, on utilise la distance de corde au carré (DCC) selon le calcul suivant :

$$d_{it}^2 = \sum_j ((p_{ij}) - (p_{tj}))^2$$

ou

$$d_{it}^2 = 2 \sum_j (p_{ij} p_{tj})^{1/2}$$

d_{it}^2 Distance entre l'assemblage fossile (t) et l'assemblage moderne (i)

p_{tj} Fréquence relative pour chacun des taxons ($j=1-m$) ($m=39$)

Cette équation permet de mesurer la distance entre l'assemblage fossile et moderne, c'est-à-dire la distance statistique entre les mêmes taxons des deux assemblages. La DCC varie entre 0 et 2. Plus la valeur est élevée, plus la dissimilitude est grande. Les cinq spectres modernes les plus proches d'un spectre ancien (ceux dont la DCC est la plus petite) sont décrétés « analogues » et le climat correspondant est utilisé pour effectuer la reconstitution climatique (Fréchette et al., 2008) :

$$r_t = (\sum_i C_i / d^2_{ti}) / \sum_i (1 / d^2_{ti})$$

r_t Paramètres climatiques de l'assemblage fossile
 C_i Climat des cinq meilleurs analogues modernes

Données polliniques et climatiques

La méthode développée par Joël Guiot fut adaptée par Fréchette et al. (2008) pour les reconstitutions climatiques dans l'Arctique canadien et au Groenland. Les données sur les spectres modernes sont celles de Whitmore et al. (2005) et s'étendent sur l'Amérique du Nord et le Groenland. Les données et métadonnées d'origine sont tirées des sites internet du *National Geophysical Data Center* (www.ngdc.noaa.gov/paleo), du Laboratoire de Paléoclimatologie et de Climatologie de l'Université d'Ottawa (www.lpc.uottawa.ca) et du Département de géographie de l'Université du Wisconsin (<http://www.geography.wisc.edu/williams/data/data.html>). Parmi les 4634 assemblages polliniques modernes contenus dans ces bases de données, une sélection a été effectuée afin de conserver seulement ceux *i*) localisés au nord du parallèle 50°N, *ii*) provenant de sédiments lacustres et *iii*) pour lesquels la somme pollinique atteignait au moins 100 grains. Selon ces trois critères, 831 spectres modernes ont été retenus (Fréchette et al., 2008). Chaque site échantillonné a par la suite été attribué à un biome végétal (Boréal, Subarctique ou Arctique) selon la classification établie par Whitmore et al. (2005) sur la base des températures moyennes des mois de janvier et de juillet ($T = ^\circ\text{C}$) et des précipitations moyennes annuelles ($P = \text{mm}$). Puisque le niveau d'identification des grains de pollen était

variable d'un site à l'autre en raison des nombreux analystes, il était essentiel de faire une normalisation des taxons polliniques utilisés. Cette étape a été effectuée selon des lignes directrices écologiques et statistiques, ce qui a permis de retenir 39 taxons polliniques significatifs (Fréchette et al., 2008). Des données climatiques (moyennes climatologiques 1961-1990) ont ensuite été attribuées à chacun des 831 assemblages polliniques modernes (Whitmore et al., 2005): températures, précipitations et ensoleillement mensuels moyens, températures annuelles moyennes et précipitations annuelles (Fréchette et al., 2008).

Il est important de souligner les erreurs possibles inhérentes à la méthode : 1) un même spectre pollinique peut représenter plus d'un type de climat, surtout dans les régions où les précipitations sont abondantes; 2) un même type de climat peut générer plus d'un spectre pollinique. C'est pourquoi il est important de choisir les variables à reconstituer (B. Fréchette 2010, communication personnelle). Dans les régions arctiques, il a été démontré que la température moyenne de juillet ainsi que l'ensoleillement sont les paramètres climatiques pour lesquels les reconstitutions sont les plus fiables (Fréchette et al., 2008). Enfin, la validité des transpositions climatiques ne peut être obtenue que si le pollen est principalement d'origine primaire ou encore si le pollen d'origine secondaire présente la même composition spectrale.

Représentation des résultats

Les reconstitutions climatiques ont été effectuées pour l'ensemble de la carotte. Cependant, seulement deux parties des analyses seront présentées, soit les sections organiques de la surface (0-21 cm) et du centre (255-273 cm). Les sections correspondant aux périodes où la glace était présente ne permettent pas une reconstitution fiable, en raison du couvert glaciaire les grains de pollen qui se trouvent dans les sédiments associés à ces périodes sont soit redéposés, soit d'apport extrarégional. En ce qui concerne l'horizon organique de la base de la carotte (736-791 cm), le nombre de niveaux analysés n'est pas assez élevé et ne permet pas de mettre en évidence les variations associées à cette période précisément.

Les températures moyennes de janvier et de juillet de même que les précipitations moyennes annuelles sont présentées sous la forme de graphiques en fonction de la profondeur. Sur les graphiques sont représentés : la moyenne moderne (1961-1996) du paramètre, les intervalles de confiance des cinq meilleurs analogues ainsi que la courbe moyenne des analogues superposée d'une courbe représentant la moyenne mobile (effectuée sur trois niveaux consécutifs). La moyenne mobile permet de mettre en valeur la tendance du paramètre et élimine les écarts exceptionnels qui pourraient être dus à des événements ponctuels.

Chapitre 3

Résultats

Stratigraphie des sédiments

Afin de recueillir la plus grande partie possible de la séquence sédimentaire, deux carottes (pc-1 et pc-2) ont été échantillonnées en sections de quelques centimètres à 1,5 m, ainsi qu'une carotte de surface (20 premiers centimètres). Certaines sections ne purent toutefois être récoltées et sont identifiées ici comme des lacunes sédimentaires (Figure 10). La carotte pc-1 couvre les profondeurs entre 0 et 847 cm. Elle comporte des lacunes sédimentaires entre 180 et 200 cm, 210 et 400 cm ainsi qu'entre 580 et 600 cm de profondeur. Pour ce qui est de la carotte pc-2, des lacunes se situent entre 135 et 200 cm ainsi qu'entre 340 et 400 cm de profondeur. Les deux carottes ont pu être combinées grâce à des concordances stratigraphiques, ce qui a permis d'obtenir une séquence sédimentaire pratiquement complète (Figure 10) : les lacunes se trouvent entre les profondeurs 135 et 200 cm, 340 et 400 cm, entre 580 et 600 cm ainsi que de 790 à 800 cm. Pour ce qui est des sédiments de surface (0-20 cm), il n'a pas été possible d'établir une corrélation stratigraphique entre ceux-ci et les sédiments sommitaux des carottes pc-1 et pc-2. Nous devons donc supposer qu'il y a une légère lacune sédimentaire entre les deux. Il a cependant été possible d'assembler les différentes sections de carotte et de former une séquence sédimentaire composite (Hervé Guyard, communication personnelle).

Les sédiments en surface (0-14 cm) consistent en de la matière organique silteuse stratifiée et comportent un horizon d'argile gris-bleu d'une épaisseur de 1 cm à 14 cm de profondeur. Sous cet horizon se trouve un diamicton d'une épaisseur de 20 cm. Puis, de 25 à 135 cm et de 200 à 220 cm de profondeur, les sédiments consistent en une boue sableuse légèrement laminée contenant par endroit des débris rocheux. Ce type de sédiment compose la majeure partie de la carotte. En effet, en plus des niveaux déjà

mentionnés, on retrouve cette boue sableuse de 240 à 255 cm, de 275 à 295 cm, de 325 à 340 cm, de 400 à 580 cm, de 600 à 760 cm et, finalement, de 780 à 800 cm de profondeur. Les autres horizons organiques situés plus bas (255-275 cm et 760-780 cm) sont également accompagnés d'une couche d'argile de quelques centimètres et de sections de diamicton (220-240 cm, 300-325 cm et 800-847 cm; Figure 10).

Chronologie

Afin de faire une interprétation des résultats qui soit éclairée, nous devons d'abord nous pencher sur les questions que soulève l'âge des sédiments de la carotte du Cratère des Pingualuit. Les travaux en cours de H. Guyard montrent, au sujet des datations, des écarts importants entre les âges obtenus selon les deux méthodes de datation employées : ^{14}C par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) et par luminescence stimulée par infrarouge (LSIR) (Figure 10). Pour des niveaux à peu près équivalents, la méthode par LSIR a livré des âges beaucoup plus vieux, de l'ordre de 135 à 165 ka (762-764 cm), que ceux obtenus par SMA qui eux sont d'environ 34 ka à 760 cm de profondeur. Le même phénomène s'observe plus haut dans la carotte, alors qu'une date LSIR de 71 à 103 ka a été obtenue à 268-272 cm de profondeur alors que la méthode par SMA a fourni un âge de 6,5 ka à 267 cm. Dans le cadre de cette étude, les dates SMA ont été retenues. En considérant les nombreuses dates SMA, il est peu probable que l'ensemble des datations, effectuées dans deux laboratoires différents, soit entièrement erroné. De plus, si des sédiments correspondaient à l'interglaciaire Sangamonien, dont les âges dépassent la période radioactive du ^{14}C , les résultats obtenus par datation SMA auraient été infinis. Enfin, selon Michel Bouchard (communication personnelle), il est possible d'expliquer les âges plus vieux des datations OSL par le fait que les mesures auraient été effectuées sur des grains minéraux pouvant avoir été recyclés au cours des différents processus de sédimentation.

Bien que plusieurs inversions chronologiques soient observées tout au long de la séquence sédimentaire, les dates SMA permettent néanmoins d'avoir une assez bonne représentation générale de l'âge du dépôt des sédiments. Les inversions pourraient être le résultat de mouvements sédimentaires à l'intérieur du cratère associés à des mouvements

de masse issus de tremblements de terre et/ou du relèvement isostatique. Ainsi, les sédiments organiques de surface (0-21 cm) ainsi que ceux se trouvant entre 252 et 276 cm seraient d'âge holocène. Les sédiments minéraux qui se situent entre 22 et 250 cm seraient, pour leur part, associés à un mouvement de masse plutôt qu'à une longue période d'accumulation sédimentaire. Les travaux d'H. Guyard, présentement en cours, permettront de déterminer la nature de ce mouvement. Le Cratère des Pingualuit se trouve dans une zone géologique caractérisée par un important réseau de failles qui fissure le lit rocheux. Il est donc hautement probable que les mouvements sédimentaires comme celui ayant séparé les deux horizons organiques holocènes soient le résultat d'une secousse sismique (P. Lajeunesse, communication personnelle), elle-même attribuable au rebond isostatique ayant suivi le retrait de l'inlandsis Laurentidien.

Ainsi, nous attribuerons un âge d'environ 34 000 ans étal. BP à l'Unité organique A (Figure 10). L'Unité organique B aurait été mise en place entre 6500 et 5500 ans étal. BP. Pour l'Unité organique C, plusieurs dates au radiocarbone ont été effectuées dans les 20 centimètres supérieurs de la carotte. Un âge de 1015 ans étal. BP a été obtenu à 0,4 cm alors que la base de l'Unité (18,8 cm) a été datée à 2820 ans étal. BP. Toutes les datations sont présentées à l'Annexe A.

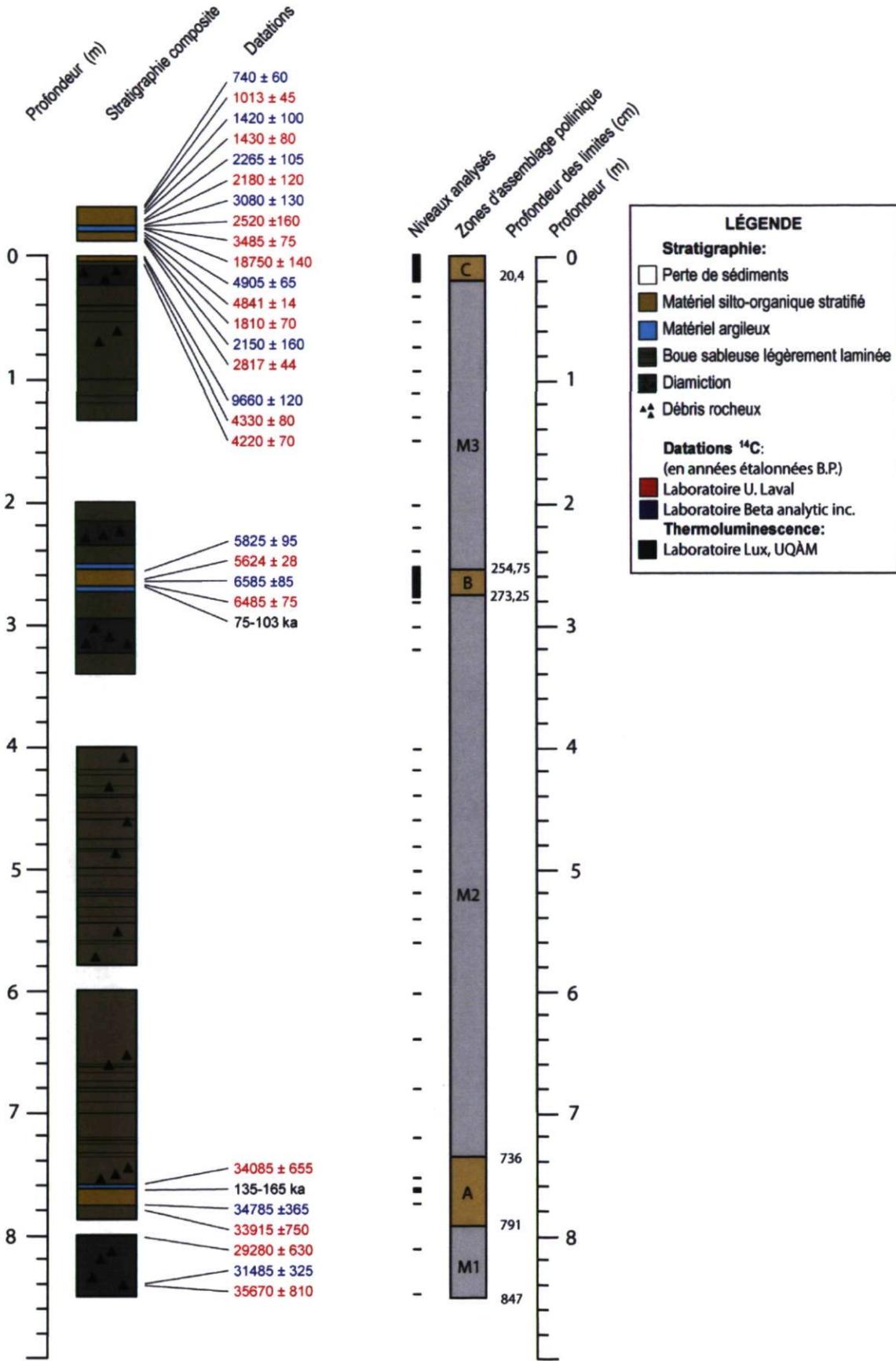


Figure 10: Séquence sédimentaire composite du Cratère des Pingualuit, datations (H. Guyard), niveaux analysés pour l'analyse pollinique et zones d'assemblage pollinique

Analyse sporopollinique

Des 37 taxons polliniques identifiés dans l'ensemble des spectres polliniques, seuls 13 sont présentés dans les diagrammes en raison de leur présence relative supérieure à 1 % dans au moins un niveau. De la même façon, des 12 sporomorphes inclus dans la catégorie « Hors-total », les courbes sporales de six d'entre eux sont présentées. Les autres taxons polliniques et les autres sporomorphes ont été rassemblés dans les diagrammes au sein de courbes nommées « Autres arbres », « Autres arbustes », « Herbes arctiques », « Autres herbes » et « Autres hors-total ». La liste de ces taxons est présentée à l'Annexe B.

Les diagrammes polliniques ont été divisés dans un premier temps en six grandes Unités d'assemblages polliniques en fonction de la composition sédimentaire de la carotte. Les Unités M1, M2 et M3 correspondent essentiellement aux sédiments inorganiques, soit des silts, des silts sableux ou des diamictons (Figure 10). Les Unités A, B et C sont celles qui sont associées aux horizons organiques. Les résultats des analyses sporopolliniques seront présentés depuis la base vers le sommet de la carotte. Les zones d'assemblages polliniques des horizons inorganiques seront d'abord décrites.

Unités M1, M2 et M3

Les assemblages polliniques associés aux trois portions plus minérales de la carotte sédimentaire (Unité M1, 847-791 cm; Unité M2, 736-273,25 cm; Unité M3; 254,75-20,4 cm) sont très similaires et ne présentent pas de variations majeures (Figure 11). Malgré la nature inorganique des sédiments, il a été possible d'atteindre une somme pollinique d'au moins 300 grains pour la plupart des niveaux analysés.

De façon générale, les assemblages des Unités M1, M2 et M3 sont caractérisés par des pourcentages très élevés de *Betula*, souvent supérieurs à 60 %. L'aulne (*Alnus* sp.) varie entre 20 et 25 %. Les éricacées sont présentes de façon constante dans les trois unités, dépassant 5 % dans l'Unité M2. Chez les herbacées, les Cyperaceae, les Poaceae et

Artemisia sp. sont les taxons polliniques dont les pourcentages sont les plus élevés (10 %). Leur représentation est aussi relativement constante. Les assemblages de l'Unité M1 se distinguent de ceux des deux autres par la représentation des algues *Pediastrum* (plus de 12 %), de *Sphagnum*, d'*Artemisia* sp. ainsi que des Poaceae (presque 10 % pour les trois dernières) qui atteignent des pourcentages presque similaires à ceux des horizons organiques. De forts pourcentages de *Lycopodium* sp. caractérisent aussi les Unités M2 et M3. Notons enfin que les Tubuliflorae sont faiblement représentées, mais elles le sont de façon plus soutenue que dans les horizons organiques, atteignant un maximum d'un peu plus de 2 % dans l'Unité M3.

Unité A

L'Unité A couvre les profondeurs 791 à 736 cm (Figures 10 et 11) et 5 niveaux y ont été analysés. Dans cette section de la carotte, on note une représentation d'environ 33 % de *Betula*. La représentation des Cyperaceae atteint un maximum de 27 %, celle des Poaceae 12 % et *Artemisia* sp. atteint 8 %. Chez les arbustes, les pourcentages d'*Alnus* sp. se situent à environ 12 %. Les Ericaceae atteignent un maximum de 3,6 % alors que la représentation moyenne de *Salix* sp. est de 2,6 %. On note la présence de grains de pollen de quelques arbres (*Pinus banksiana*, *Picea* sp.) qui sont d'origine lointaine. En ce qui concerne les taxons hors total, on note une représentation moyennement élevée des sphaignes (en moyenne 4,6 %) alors que les algues *Pediastrum* atteignent 12 %. Ces dernières montrent toutefois une baisse franche à l'interface entre les Unités A et M2 sus-jacente (de 9,3 % à 751 cm à 1,7 % à 721 cm).

La composition des spectres polliniques de l'Unité A suggère la présence, à l'échelle régionale, d'un couvert végétal correspondant à une toundra herbacée. En effet, les forts pourcentages atteints par les Cyperaceae, les Poaceae et *Artemisia* sp. sont caractéristiques de l'actuelle toundra herbacée (Richard, 1981; Lamb, 1984; Anderson et al., 1991).

Cratère des Pingualuit (0 - 847 cm)

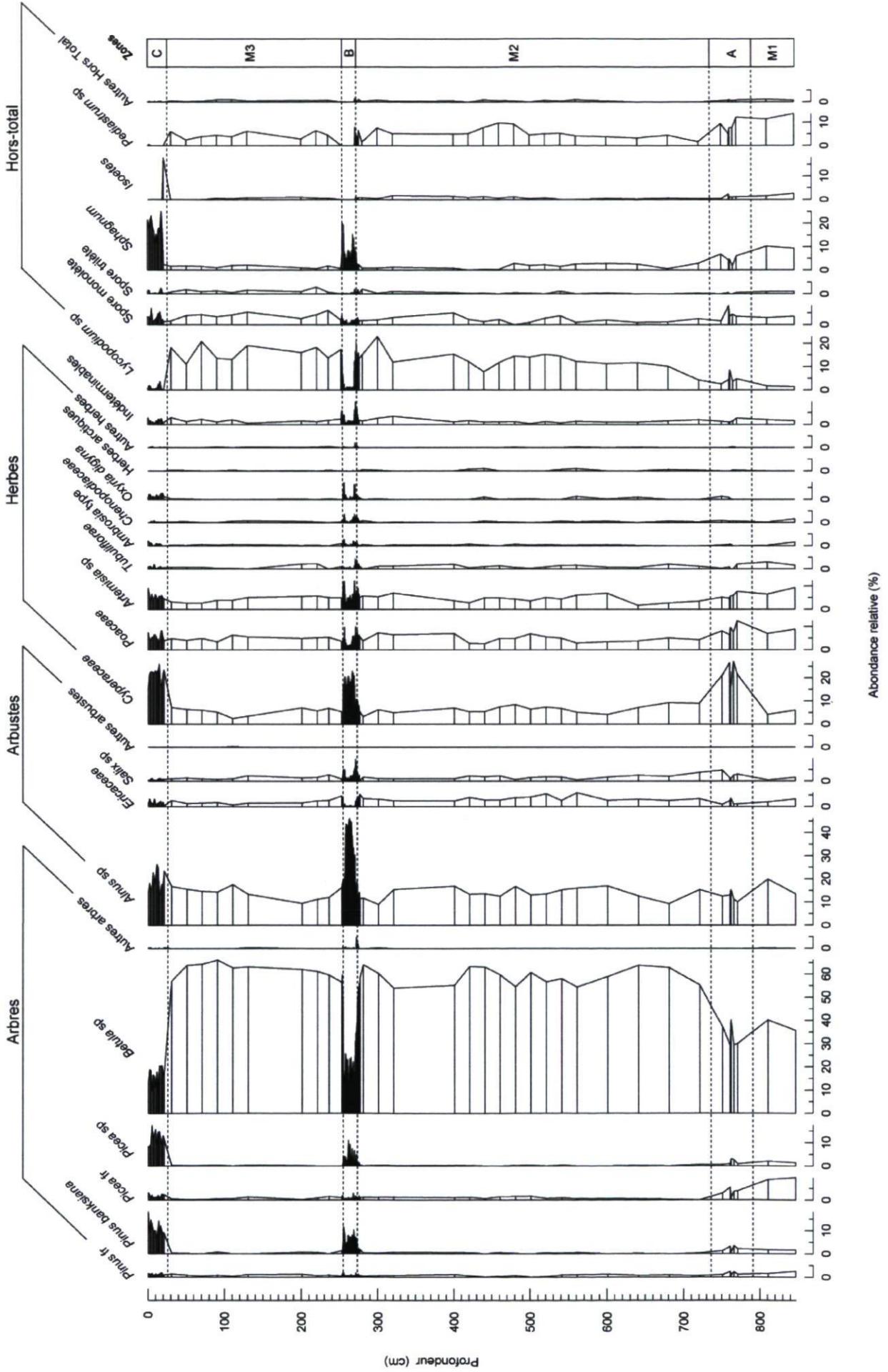


Figure 11: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit

Cratère des Pingualuit - Unité B

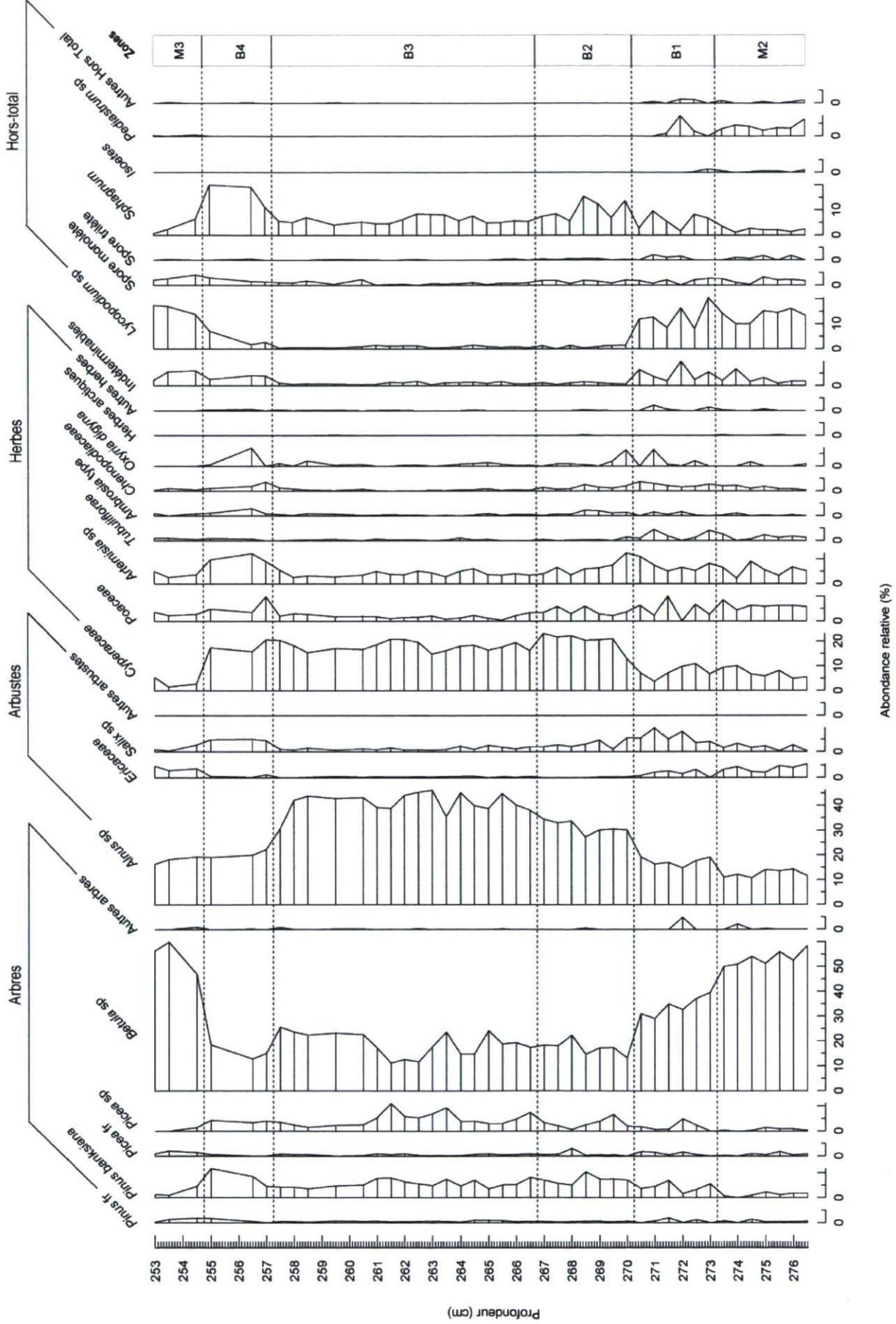


Figure 12: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit (Unité B : 273,25-254,75 cm)

Cratère des Pingualuit - Unité C

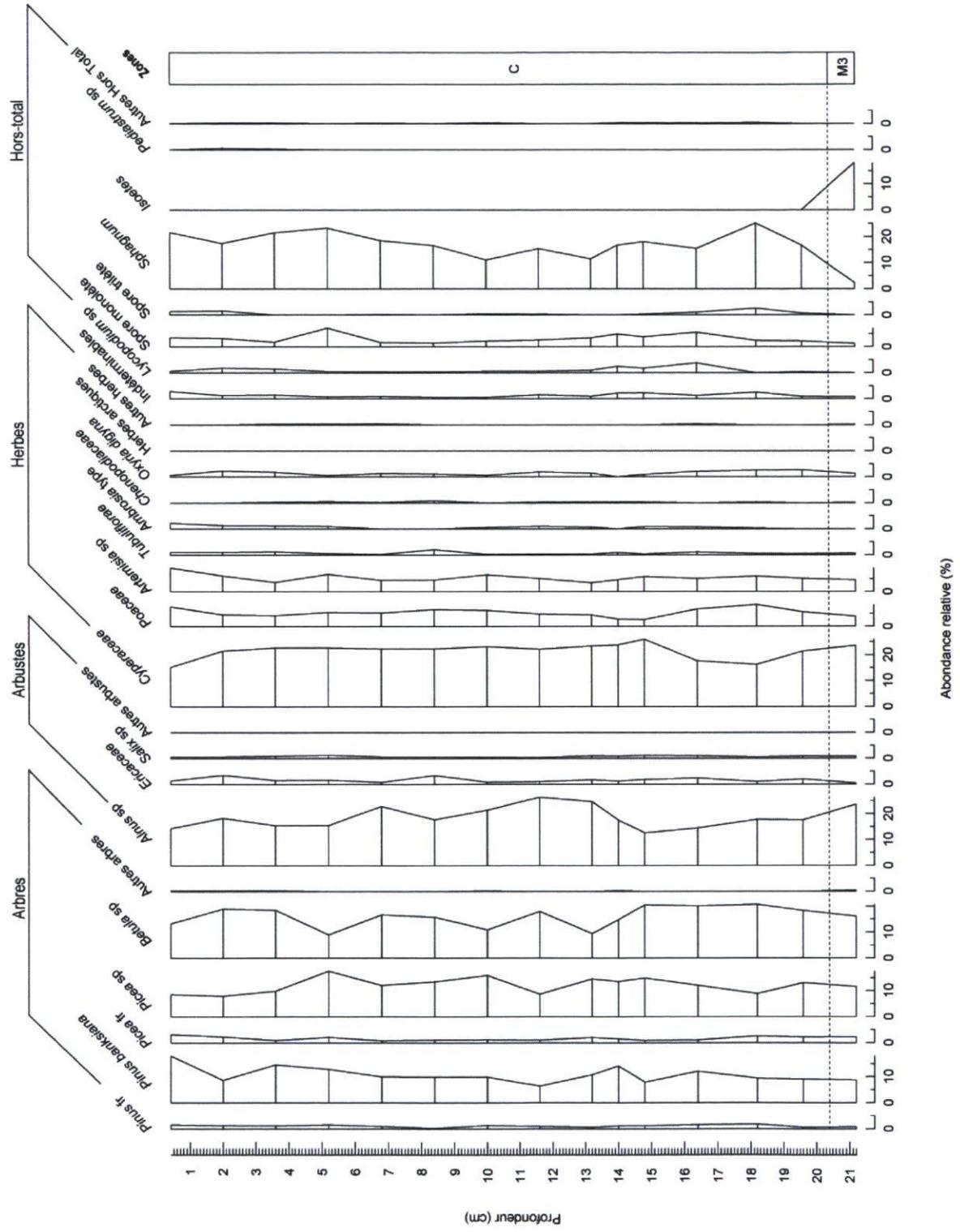


Figure 13: Diagramme pollinique du Cratère des Pingualuit (Unité C : 20,4-0 cm)

Unité B

L'Unité B couvre les profondeurs de 273,25 à 254,75 cm (Figures 10 et 12). À l'exception de quelques sections analysées à un pas analytique de 1 cm (253,5-254,5 cm; 255,5-256,5 cm; 258,5-259,5 cm; 259,5-260,5 cm), les analyses polliniques ont été effectuées en continu à tous les 0,5 cm d'intervalle entre les profondeurs 276,5 (sommet de l'Unité M2) et 253 cm (base de l'Unité M3), ce qui représente un total de 43 spectres polliniques. Quatre zones polliniques (B1, B2, B3 et B4) ont été distinguées.

Zone B1

La zone B1 s'étend entre les profondeurs 273,25 et 270,25 cm. On y note une diminution graduelle des pourcentages de *Betula* sp., de 40 % (273 cm) à 31 % (270,5 cm). La représentation de l'aune est relativement constante, s'établissant en moyenne à 19 %. Chez les arbres, on constate une augmentation de la représentation des gymnospermes comme *Pinus banksiana* et *Picea* sp. qui, comme dans l'Unité A, témoignent sans doute d'apports polliniques lointains en provenance de populations plus au sud. Les éricacées ainsi que les tubuliflores diminuent au sommet de la zone pour ensuite pratiquement disparaître. C'est également dans cette zone que *Salix* sp. et *Oxyria digyna* présentent leur maximum pollinique (6,1 et 6,4 %, respectivement). On remarque aussi une représentation notable d'*Artemisia* sp. dont les pourcentages croissants dépassent 10 % au sommet de la zone. Les Chenopodiaceae sont également présentes (moyenne de 2,6 %), de même que les Cyperaceae. Chez les sporomorphes, on remarque une forte chute de la représentation des *Lycopodium* sp. au sommet de la zone, la disparition complète des *Pediastrum* sp. en milieu de zone et, finalement, une augmentation progressive des sphaignes.

Zone B2

La zone B2 couvre les niveaux 270,25 à 266,75 cm. Les assemblages polliniques sont caractérisés par une représentation relativement faible, mais soutenue de *Betula* sp.

(moyenne de 17 %) et d'*Alnus* sp. (moyenne de 31 %). Les pourcentages de l'aulne sont significativement plus élevés que dans la zone B1. Les forts pourcentages de *Pinus banksiana* (jusqu'à 10 %) et de *Picea* (maximum 3,9 %), bien qu'il s'agisse toujours d'apports polliniques de longue distance, sont eux aussi plus élevés que précédemment. Les grains de pollen des éricacées sont pratiquement absents, et ce, jusqu'au sommet du diagramme, alors que le saule présente des pourcentages inférieurs à ceux de la zone B1 (moyenne : 3,1 %). Chez les herbacées, on observe une augmentation marquée des cypéracées qui atteignent un plateau d'environ 20 %. En revanche, d'autres herbacées montrent la tendance inverse, disparaissant presque au sommet de la zone : c'est le cas des Tubulifloreae, des Chenopodiaceae et d'*Oxyria digyna*. D'autres herbacées comme *Artemisia* sp. et les Poaceae montrent une légère diminution de leur représentation vers le sommet. Chez les taxons hors total, seules les sphaignes montrent une augmentation par rapport à la zone précédente. Très abondantes précédemment, les spores de *Lycopodium* sont ici très rares.

Zone B3

La zone B3 couvre les profondeurs entre 266,75 et 257,25 cm. Elle est caractérisée par une certaine stabilité de la composition des spectres polliniques, les pourcentages relatifs de chacun des taxons ne variant que très peu. La représentation de *Pinus banksiana* et de *Picea* sp. fluctue entre 5 et 7 %. Les pourcentages de *Betula* sp. s'établissent en moyenne à 19 % alors que ceux d'*Alnus* sp. se situent autour de 40 %. C'est dans cette zone que les pourcentages de l'aulne sont les plus élevés pour l'ensemble de la carotte sédimentaire. La représentation de *Salix* sp. et des Poaceae est moins importante que dans la zone B2. Chez les herbacées, ce sont les cypéracées qui atteignent les pourcentages les plus élevés (moyenne : 18 %) alors que l'abondance relative d'*Artemisia* sp. est stable à 5 %. La représentation moyenne des sphaignes se situe à 6 %.

Zone B4

Les assemblages polliniques de la zone B4 (257,5 à 253 cm) montrent des caractéristiques communes avec ceux de la zone B1. En effet, chez les arbustes, la représentation pollinique de l'aulne et du bouleau diminue, s'établissant en moyenne à 19 et 15 % respectivement, alors que celle du saule augmente à nouveau pour atteindre des pourcentages (5 %) similaires à ceux de la zone B1. Chez les plantes herbacées, si la représentation pollinique des cypéacées demeure constante et similaire à celle de la zone B3, il en est autrement pour plusieurs autres taxons qui affichent une nette augmentation (Poaceae, *Artemisia* sp., Tubuliflorae, Chenopodiaceae, *Oxyria digyna*). Enfin, chez les taxons hors total, on note le retour des spores de *Lycopodium* sp. et une franche augmentation de *Sphagnum*.

Interprétation de l'Unité B

Au cours de la période représentée par la zone B1, on remarque une diminution des pourcentages de *Betula* sp. par rapport à l'Unité inorganique sous-jacente M2 et ce, au profit des Cyperaceae et de plusieurs autres taxons herbacées. Cela suggère l'instauration d'un couvert végétal correspondant à une toundra herbacée (Anderson et al., 1991; Gajewski, 1991). Durant la zone B2, on note l'augmentation des pourcentages d'*Alnus* sp. tandis que ceux de *Betula* sp. diminuent. C'est également au cours de cette zone ainsi qu'au début de la zone suivante (B3) que plusieurs espèces herbacées disparaissent. La représentation de l'aulne permet de supposer que la zone B2 marque une densification du couvert végétal et la constitution d'une toundra arbustive (Gajewski, 1991). Cette densification atteint son maximum durant la zone B3 où les pourcentages d'*Alnus* sp. atteignent leur maximum pour l'ensemble de la carotte. La zone B4 est, pour sa part, caractérisée par de forts pourcentages des cypéacées, d'*Artemisia* sp. et d'*Oxyria digyna*, ainsi que par un maximum de *Sphagnum* et de *Salix* sp. En revanche, les pourcentages d'*Alnus* sp. et de *Betula* sp. sont assez faibles ce qui suggère un retour vers la constitution d'une toundra herbacée (Anderson et al., 1991; Lozkhin et al., 2006).

Unité C

La composition des assemblages polliniques de l'Unité C (20,4-0 cm) montre moins de changements par rapport à ceux de l'Unité B (Figures 10 et 13). On note d'abord que les apports lointains de *Pinus banksiana* et de *Picea* sp. sont relativement stables, les pourcentages oscillant entre 10 et 12 %. Les pourcentages de *Betula* sp. varient également peu (~15-20 %), à l'exception de deux légères baisses à 10 % (13,2 cm et 5,2 cm). On remarque aussi une augmentation mineure d'*Alnus* sp. à partir de 13,2 cm, l'aulne atteignant alors un maximum de 25 % à 11 cm. On note la présence d'autres arbustes tels que les éricacées et les saules, mais en beaucoup plus faibles proportions (1 à 5 %). Les pourcentages du saule sont toutefois moins élevés que dans la zone B4. Les Cyperaceae sont, chez les plantes herbacées, celles qui montrent les pourcentages les plus élevés (entre 20 et 25 %) alors que la représentation pollinique des Poaceae et d'*Artemisia* sp. est relativement constante (5 à 7 %). On y trouve également *Oxyria digyna* (1 à 3 %) pendant toute la durée de l'Unité C. Enfin, chez les sporomorphes hors total, la représentation sporale des sphaignes est élevée et atteint un maximum pour l'ensemble de la carotte sédimentaire de 25 % à 18,2 cm, alors que les spores d'*Isoetes* et des algues *Pediastrum* sont absentes.

Les assemblages polliniques de l'Unité C ressemblent à ceux de la zone B4. Les pourcentages des cypéracées de même que la présence des Poaceae et d'*Artemisia* sp. portent à croire que les herbacées dominaient (toundra herbacée). Les pourcentages polliniques assez élevés de *Pinus banksiana* et de *Picea* sp. suggèrent un paysage ouvert permettant l'enregistrement du transport de grains de pollen de sources lointaines (King, 1993).

Lac du Sud-Ouest

Des carottes de 73 à 90 cm de long ont été prélevées au lac du Sud-Ouest. Les sédiments consistent en de l'argile grise (de la base des carottes à 60 cm de profondeur) surmontée de 50 à 60 cm d'une gyttja silteuse de couleur gris-verdâtre. On trouve également un horizon centimétrique d'argile à 76 cm de profondeur (Richard et al., 1989; 1991). Un

diagramme pollinique simplifié est présenté à la Figure 14. Au total, 24 niveaux ont été analysés (soit 12 niveaux de plus que pour le premier diagramme de Richard et al., 1989) et 15 taxons sont présentés. Le diagramme est subdivisé en trois zones d'assemblages polliniques. De la base vers le sommet il s'agit des Zones SO-I, SO-II et SO-III (Figure 14). Les dates ^{14}C des sédiments du Lac du Sud-Ouest (48-50 cm : 7700 ans étal. BP; 32-34 cm : 7125 ans étal. BP; 20-22 cm : 6950 ans étal. BP; 10-12 cm : 1480 ans étal. BP) doivent être prise avec parcimonie, car elles pourraient être trop vieilles, du moins pour les sédiments inorganiques à la base. En effet, elles pourraient avoir été contaminées par du matériel plus ancien redéposé à partir de la matrice de till.

La Zone SO-I couvre les profondeurs 88 à 55 cm et correspond à la section de la carotte composée d'argile grise. Les spectres polliniques sont dominés par *Betula* sp. (plus de 40 %), *Salix herbacea* (jusqu'à 8 %), *Alnus crispa* (16 %), les Cyperaceae (entre 5 et 15 %), les Poaceae (12 %), *Artemisia* (10 %) et *Oxyria digyna* (3 %), de même que par les spores de *Lycopodium* type *annotinum*. On note ici que les concentrations polliniques sont très élevées, variant entre 41 000 et 58 000 grains cm^{-3} . La période couverte par la Zone I, suite à la déglaciation, suggère la présence du bouleau glanduleux qui était sans doute présent dans les endroits protégés, et aujourd'hui absent, ainsi que du saule, des éricacées, des poacées et des lycopodes. Ces espèces auraient été alors plus abondantes qu'actuellement (Richard et al., 1989). Toutefois, l'explication de la nature du couvert végétal est délicate. L'interprétation de Richard et al. (1989) était conditionnelle au caractère primaire du pollen de la Zone SO-I. Depuis lors, il y a eu les travaux sur les tills ainsi que la datation de quatre échantillons de sédiments. Trois des dates obtenues semblent trop vieilles, celle obtenue entre 48 et 50 cm (7700 ans étal. BP), entre 32 et 34 cm (7125 ans étal. BP) et entre 20 et 22 cm (6950 ans étal. BP). Ces dates sont rejetées, car elles indiqueraient des changements inacceptables du taux d'accumulation sédimentaire. Les concentrations polliniques élevées de la Zone SO-I suggèrent plutôt que la plus grande partie du pollen résultent d'un redépôt sédimentaire dont la source serait le till avoisinant (Richard et al., 1989; P.J.H. Richard, communication personnelle).

La Zone SO-II, entre 55 et 15 cm de profondeur, correspond à l'accumulation de la gyttja silteuse dans laquelle la concentration pollinique moyenne est moins élevée que dans la zone précédente, s'établissant à 22 600 grains cm^{-3} . Les assemblages polliniques sont caractérisés par une augmentation de la représentation d'*Alnus crispa* qui atteint un maximum de près de 30 % (22 cm) alors que la représentation pollinique de *Betula* sp. chute de façon marquée. Chez les herbacées, les Cyperaceae montrent aussi une augmentation, les pourcentages dépassant légèrement 30. Pour ce qui est des sporomorphes, on note une forte diminution des lycopodes ainsi qu'un développement massif des colonies de *Pediastrum*, ces dernières indiquant sans doute des eaux plus limpides (Weckström et al., 2010). Les taxons dominants de cette zone suggèrent la constitution d'une toundra arbustive où les arbustes se trouvaient probablement dans les endroits protégés.

Au sommet du diagramme (15-0 cm), la Zone SO-III est également composée de gyttja et une date de 1480 ± 65 ans étal. BP a été obtenue à 11 cm de profondeur. Les concentrations polliniques oscillent entre 13 800 et 29 700 grains cm^{-3} . Les assemblages polliniques sont caractérisés par un maximum, pour l'ensemble de la carotte, de la représentation pollinique des cypéracées (jusqu'à 40 %) et des poacées (environ 15 %), de même que par une augmentation des grains de *Picea* sp. et de *Pinus banksiana* (apports polliniques lointains). En revanche, les pourcentages du bouleau et de l'aulne sont moins élevés que précédemment. Cette diminution des arbustes pourrait indiquer leur disparition du paysage, favorisant ainsi un enregistrement plus important des apports polliniques extrarégionaux comme ceux de l'épinette et du pin. Ces conditions sont caractéristiques d'un paysage de toundra herbacée. Nous pouvons donc, grosso modo, associer la Zone SO-III du lac du Sud-Ouest à l'Unité C et à la Zone B4 du Cratère des Pingualuit tandis que SO-II serait plutôt associée la Zone B3 et la Zone SO-I au haut de l'Unité M2.

Lac du Sud-Ouest: CRA1B

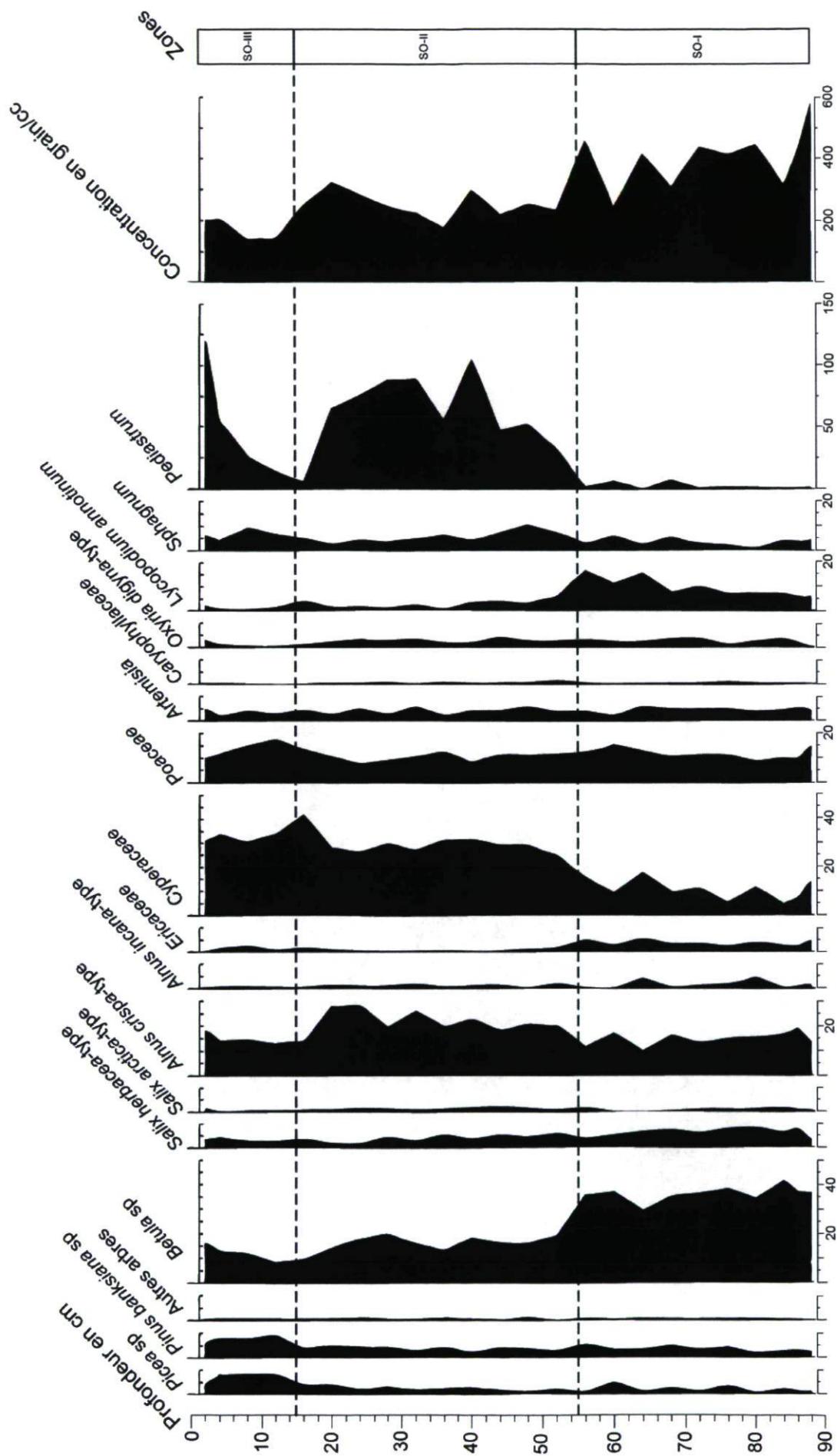


Figure 14: Diagramme pollinique simplifié du lac du Sud-Ouest : CRA 1B (modifié de P.J.H. Richard, communication personnelle). Zones selon Richard et al., 1989.

Analyses numériques

Les variables climatiques reconstituées pour le Cratère des Pingualuit à partir des assemblages polliniques sont les températures moyennes des mois de juillet et de janvier ainsi que les précipitations moyennes annuelles. Ces variables seront décrites séparément en fonction de la profondeur pour les zones d'assemblages polliniques des Unités B et C. En observant les graphiques des figures 15, 16 et 17, nous remarquons que les conditions climatiques ne peuvent effectivement pas être reconstituées de façon fiable pour les périodes glaciaires. Il suffit d'observer plus précisément l'Unité M2 de la figure 16a pour se rendre compte que les températures estivales reconstituées pour cette période sont supérieures aux températures de juillet pour les périodes interglaciaires. Pour ce qui est de l'Unité A, les variations sont faibles et, en raison du manque de niveaux analysés, ne peuvent être associées avec certitude à des changements des conditions climatiques. Pour ces raisons, nous nous concentrons sur les Unités B et C.

Température moyenne du mois de juillet

On remarque sur la figure 15 que la température moyenne de juillet pour l'Unité B se situe autour de 9 °C (Figure 15b). Durant la période représentée par cette unité, la température montre de légères variations comme une diminution d'un degré Celsius vers 262 cm et deux minima en début et fin d'unité (5,2°C à 269,5 cm et 5,6°C à 256,5 cm). Les températures de juillet pour l'Unité C sont, pour leur part, très stables (Figure 15c) et varient entre 6,5 et 7°C. Bien qu'elles soient légèrement inférieures à celles de l'Unité B, ces températures sont plus proches de la moyenne actuelle (5,6°C). Par conséquent, on remarque que les températures moyennes de juillet furent sans doute plus clémentes au cours de l'Unité B que pendant l'Unité C.

Température moyenne du mois de janvier

Les températures moyennes de janvier sont présentées à la figure 16. Les températures de janvier pour l'Unité B sont plus ou moins stables (Figure 16b). Bien qu'elles soient de faible amplitude, on note plusieurs variations. La valeur minimale se trouve à 264,5 cm (-27,4°C) et celle maximale à 261 cm (-23°C). La température moyenne pour l'ensemble

de l'unité est de -26°C . En ce qui concerne l'Unité C (Figure 16c), tout comme pour les températures de juillet, celles de janvier sont très stables (-22°C) et plus clémentes que l'actuelle (-28°C). On note donc un réchauffement des températures moyennes de janvier pour l'Unité C par rapport à l'Unité B.

Précipitations moyennes annuelles

La reconstitution des précipitations moyennes annuelles des Unités B et C (Figure 17) suggère que les valeurs sont semblables à la moyenne actuelle, celle-ci varie entre 300 et 400 mm par année. Les précipitations moyennes pour l'Unité B sont de 304 mm et celles de l'Unité C de 417 mm. Il est cependant important de noter que la principale différence entre les deux Unités concerne l'ampleur des variations. En effet, elles sont beaucoup plus importantes dans l'Unité B (Figure 17b). Le minimum est de 170 mm (à 275 cm) alors que le maximum est de 486 mm (à 261 cm). Dans l'Unité C, les précipitations moyennes annuelles varient entre 360 et 450 mm (Figure 17c). Les précipitations demeurent stables et au-dessus de la moyenne actuelle jusqu'à la surface. Notons également que les variations de ce paramètre et des moyennes de température pour janvier varient de façon similaire.

Reconstitution des températures moyennes de juillet (°C)

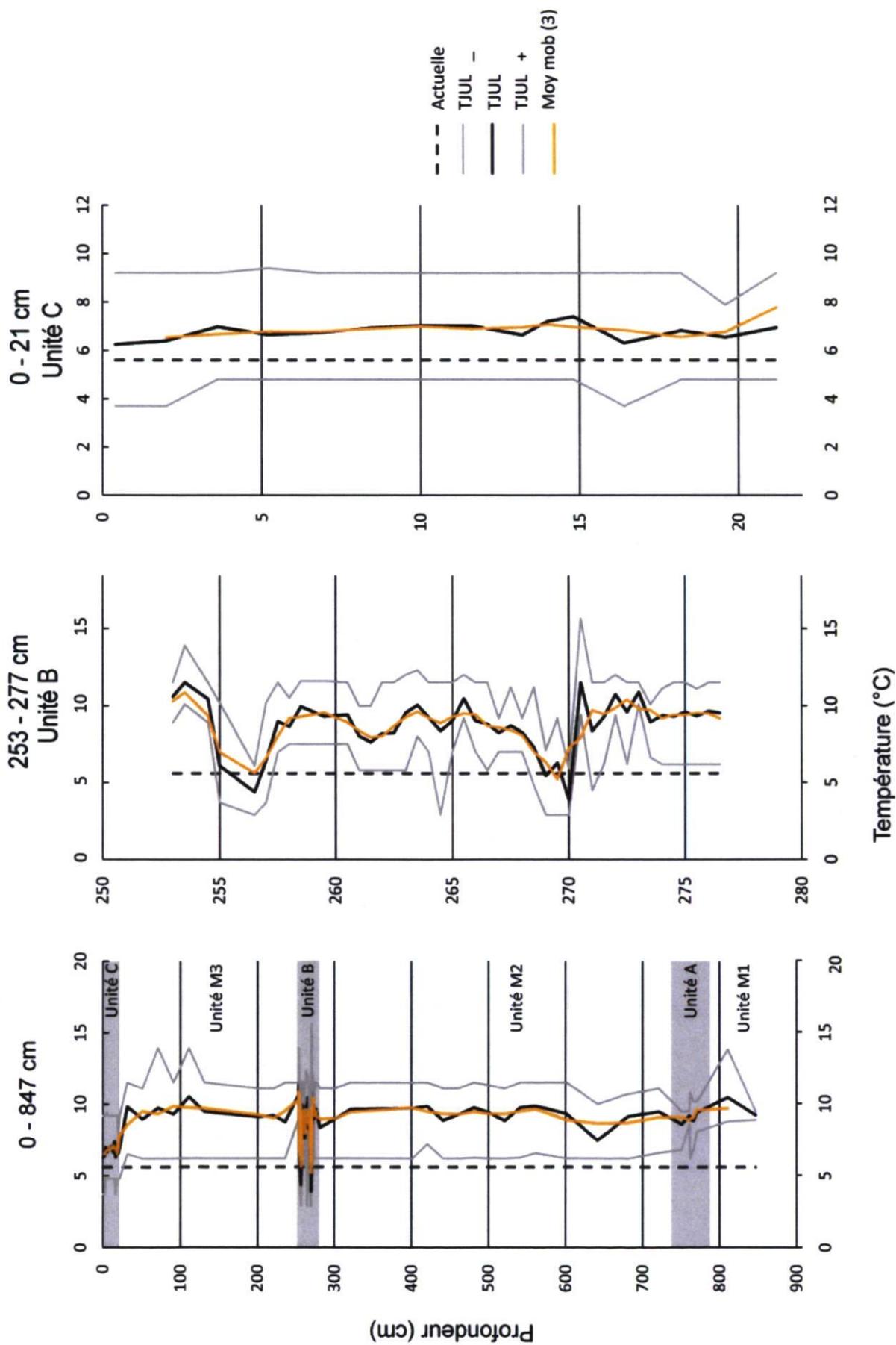


Figure 15: Reconstitution des températures moyennes de juillet pour (15a) l'ensemble de la carotte du Cratère des Pingualuit, 0-847 cm; (15b) l'Unité B, 253-277 cm; (15c) l'Unité C, 0-21 cm (Actuelle : température moyenne actuelle de juillet; TJUL - : analogue dont la température est la plus basse; TJUL + : analogue dont la température est la plus élevée; TJUL : température moyenne de tous les analogues; Moy mob (3) : moyenne mobile sur trois niveaux calculée à partir de la courbe TJUL.

Reconstitution des températures moyennes de janvier

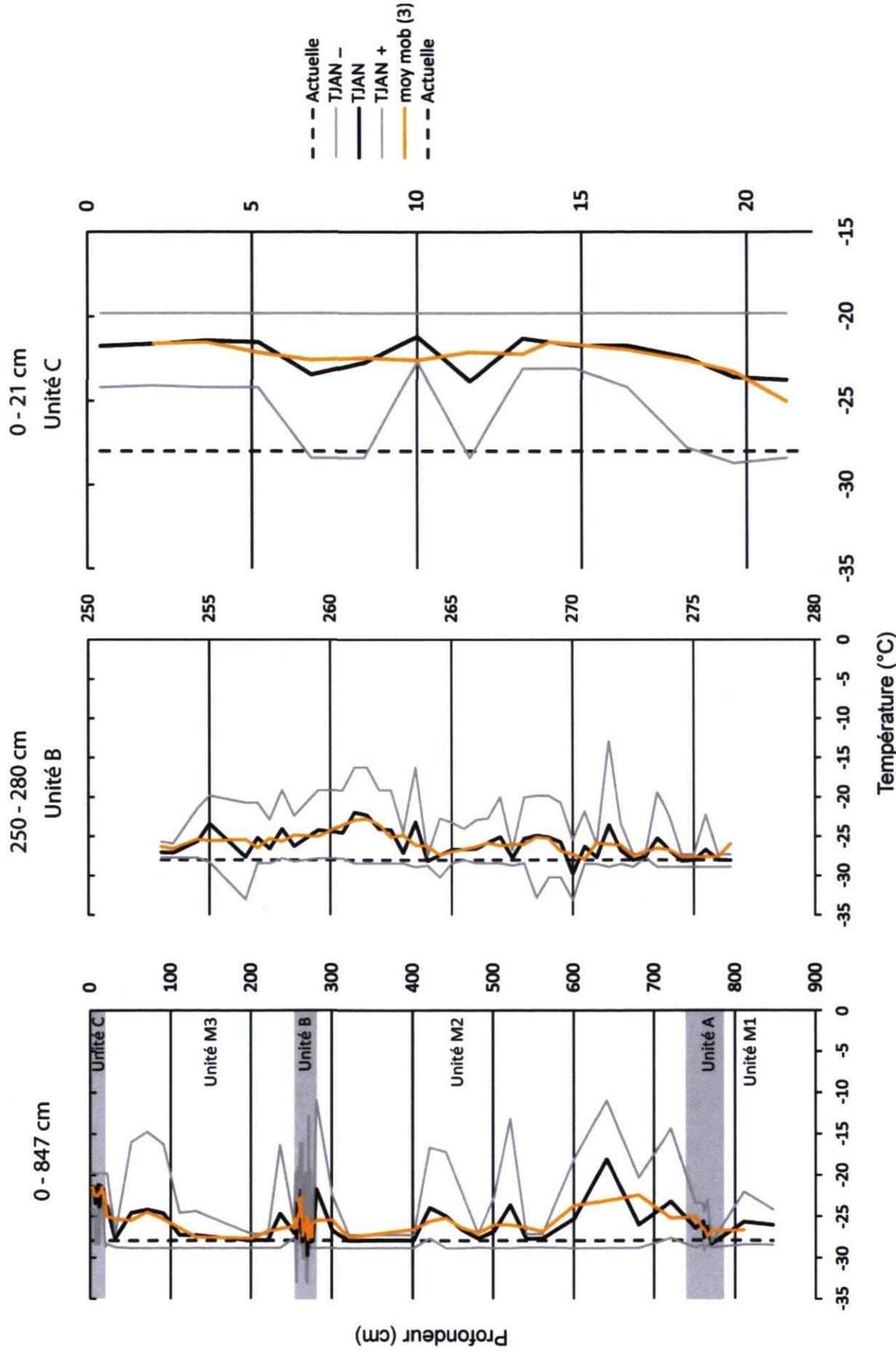


Figure 16 : Reconstitution des températures moyennes de janvier pour (16a) l'ensemble de la carotte du Cratère des Pingualuit, 0-847 cm; (16b) l'Unité B, 253-277 cm; (16c) l'Unité C, 0-21 cm (Actuelle : température moyenne actuelle de janvier; TJAN - : analogue dont la température est la plus basse; TJAN + : analogue dont la température est la plus élevée; TJAN : température moyenne de tous les analogues; moy mob (3) : moyenne mobile sur trois échantillons calculée à partir de la courbe TJAN).

Reconstitution des précipitations moyennes annuelles (mm)

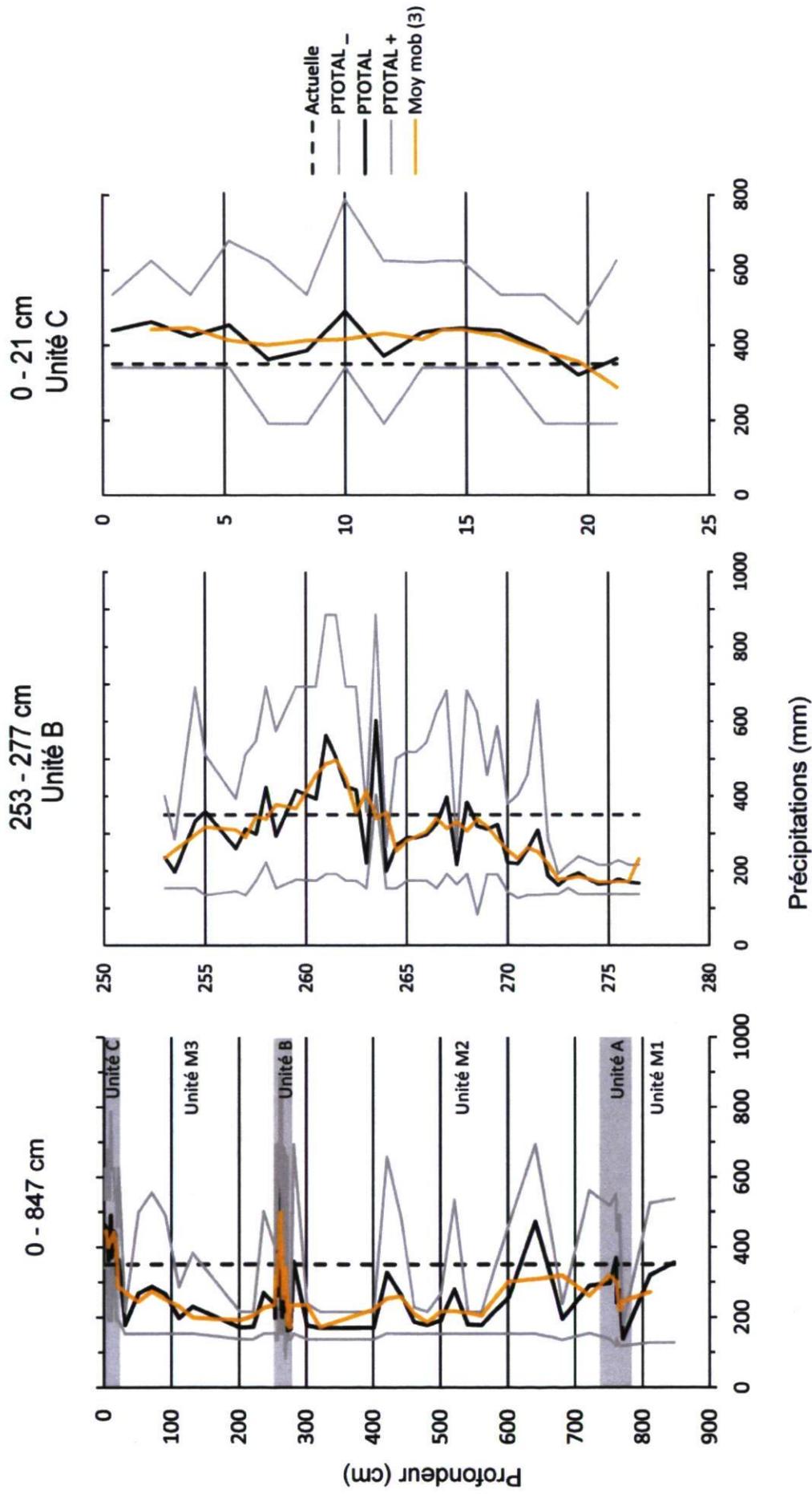


Figure 17: Reconstitution des précipitations moyennes annuelles pour (17a) l'ensemble de la carotte du Cratère des Pingualuit, 0-847 cm; (17b) l'Unité B, 253-277 cm; (17c) l'Unité C, 0-21 cm (Actuelle : précipitations moyennes annuelles actuelles; PTOTAL - : analogue dont les précipitations sont les plus basses; PTOTAL + : analogue dont les précipitations sont les plus élevées; PTOTAL : précipitations moyennes de tous les analogues; Moy mob (3) : moyenne mobile sur trois échantillons calculée à partir de la courbe PTOTAL).

Chapitre 4

Discussion

Stratigraphie

En considérant que les dates LSIR soient erronées, l'horizon organique qui se situe à la base de la carotte (760-780 cm) ne serait pas attribuable à l'interglaciaire Sangamonien. En effet, les six dates SMA effectuées dans cet horizon se situent dans l'intervalle 30-36 ka BP. Ainsi, il est envisageable d'associer cette sédimentation organique à un interstade. Si tel est le cas, cela impliquerait une ouverture du couvert de glace dans le nord du Québec à cette époque. Selon Michel Bouchard (communication personnelle), la perspective d'une ouverture du couvert de glace au cours du stade isotopique 3 (MIS 3; entre 60 et 24 ka BP) est envisageable. En effet, l'épisode de la dernière glaciation fut caractérisée par d'importantes instabilités climatiques (Dansgaard et al., 1993; Grootes et al., 1993; Johnsen et al., 2001). Des travaux effectués sur les isotopes de l'oxygène de carottes de glace récoltées au Groenland ont permis d'identifier des phases de changements abrupts de la température. Ces transitions depuis des conditions froides (stade) vers des conditions plus chaudes (interstade) se nomment événements de Dansgaard-Oeschger (Ditlevsen et al., 2008). L'un de ces événements pourrait avoir eu pour conséquence que le flot d'Ungava n'ait pas immédiatement recouvert la région du cratère suite au retrait du flot de Payne (Bouchard et Marsan, 1986). De plus, une étude récente de Andrews et MacLean (2003) a documenté une ouverture du détroit d'Hudson vers 34 ka BP, ce qui concorde avec les dates de la présente étude. La section organique située à la base de la carotte (760-780 cm) pourrait donc être associée à un interstade. Le détroit d'Hudson ainsi qu'une partie du territoire de la péninsule d'Ungava auraient donc été suffisamment déglacés et les conditions climatiques suffisamment clémentes pour permettre l'établissement d'une végétation de toundra herbacée et l'accumulation de matière organique au sein du lac.

Dynamique végétale

Comme mentionné plus haut, l'Unité A (790-736 cm) pourrait être associée à une période interstadaire. Les pourcentages élevés des cypéracées, des poacées et d'*Artemisia* sp. suggèrent la présence d'un couvert végétal similaire à celui d'une toundra herbacée. En ce qui concerne l'Unité B (273,25-254,75 cm), les pourcentages élevés des cypéracées et de plusieurs espèces d'herbacées dont *Oxyria dygina* et *Salix* sp. indiquent qu'une toundra herbacée se serait d'abord constituée suite au retrait glaciaire (Zone B1). Le couvert végétal se serait ensuite densifié et fut caractérisé, à l'Holocène moyen, par l'arrivée de l'aulne. L'interprétation de la constitution d'une toundra arbustive (Zones B2 et B3) repose sur les forts pourcentages d'*Alnus* sp. et la diminution de la représentation de la plupart des espèces herbacées. Bien que les grains de pollen de l'aulne n'aient pas été identifiés au niveau de l'espèce, les grains sont pour la plupart attribuables à l'aulne crispé (*Alnus crispa*). Le retour subséquent vers une toundra herbacée et des espèces caractéristiques de la Zone B1 s'est amorcé à la fin de l'Unité B (Zone B4) pour se poursuivre tout au long de l'Unité C (20,4-0 cm) jusqu'à nos jours. La continuité palynostratigraphique entre la Zone B4 et l'Unité C corrobore les datations et tend à confirmer la nature « intrusive » de sédiments inorganiques qui composent l'Unité M3.

Le patron de la dynamique végétale holocène déduite du diagramme sporopollinique du Cratère des Pingualuit est similaire à celui des autres études effectuées antérieurement dans les régions nordiques du Québec-Labrador (Short et Nichols, 1977; Richard, 1981; Gajewski et Garralla, 1992). Quelques particularités sont toutefois à mentionner.

La première particularité concerne les pourcentages élevés de l'aulne qui caractérisent l'Unité B3. La représentation de l'aulne atteint ici 40 %. Dans plusieurs autres études, on remarque aussi un maximum de la représentation de l'aulne dans les diagrammes polliniques suite au retrait glaciaire. C'est le cas notamment au site BI2 dans les toundras côtières de la baie d'Hudson (Gajewski et Garralla, 1992); au lac Pyramid Hills et à l'étang Hopedale, situés respectivement à 8 km à l'est de la rivière George et légèrement au nord de la ville de Hopedale sur la côte du Labrador (Short et Nichols, 1977), ainsi qu'au site Diana (Richard, 1981) sur l'île du Diana près de Quaqtq (Figure 1). Dans ces diagrammes,

l'aulne atteint également une représentation de 40 %. Ces forts pourcentages militent en faveur de sa présence et donc de la constitution d'une toundra arbustive à ces endroits. L'interprétation de l'abondance réelle de l'aulne crispé dans le paysage demeure toutefois délicate car il s'agit d'une espèce fortement surreprésentée par son pollen (Richard, 1993). En effet, des travaux effectués dans le delta du fleuve Mackenzie ont permis de déterminer que l'aulne était le taxon le plus surreprésenté par rapport à sa couverture réelle au sol avec des ratios de 10 à 20 pour 1 (Ritchie, 1984). Donc, lorsqu'une augmentation notable de la représentation de l'aulne survient (par exemple de 1-5 % à 30-65 %) dans un contexte où celle des autres taxons demeure stable, la couverture réelle de l'aulne pourrait alors passer d'inexistante (apports polliniques lointains) à éparse, ne couvrant pas plus de 5 % du paysage (Ritchie, 1984). Nous pouvons donc supposer que l'aulne était bien présent dans la région du cratère pendant l'Unité B sans toutefois être abondant.

Bien que l'aulne soit généralement surreprésenté dans les assemblages polliniques, les analogues modernes montrent que ses plus forts pourcentages se trouvent généralement dans les zones de toundra arbustive dense, de toundra forestière et dans le nord des régions boréales (Ritchie, 1984; Anderson et al., 1991; Richard et al., 1991; King, 1993). Malgré l'absence de preuves directes de la présence de l'aulne comme des macrorestes, il est possible d'émettre l'hypothèse que la toundra arbustive à aulne crispé s'étendait à une certaine époque à des latitudes aussi élevées que celles du cratère. Aujourd'hui, les populations les plus nordiques de l'aulne crispé au Québec se trouvent à la hauteur de la rivière Arnaud, au 60° parallèle tandis que celles de l'aulne rugueux (*Alnus rugosa*) s'arrêtent au 55° parallèle (Rousseau, 1974; Figure 18). Ceci impliquerait que l'aulne se trouvait au minimum à environ 140 km au nord de sa limite actuelle pendant l'Holocène moyen.

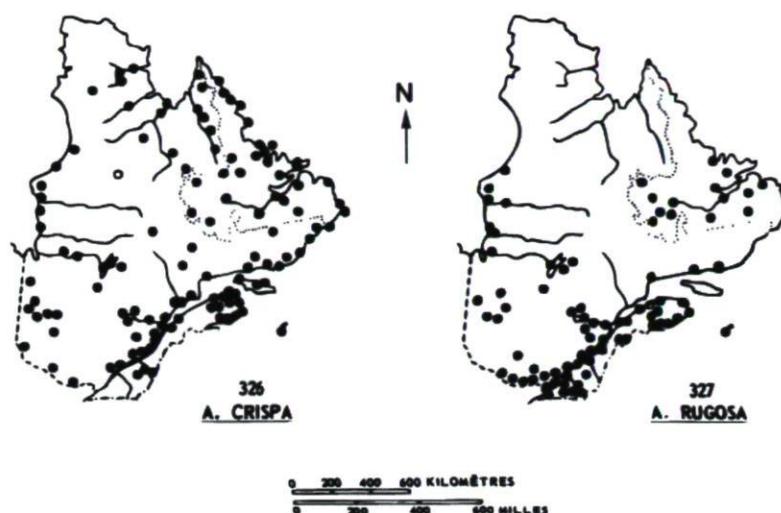


Figure 18: Répartition actuelle de l'aulne crispé (*Alnus crispa*) et de l'aulne rugueux (*Alnus rugosa*) (modifiée de Rousseau, 1974)

L'interprétation du diagramme pollinique du lac du Sud-Ouest permet de mettre en lumière un patron de colonisation végétale similaire à celui obtenu au Cratère des Pingualuit. Suite à la déglaciation, la forte représentation pollinique de l'aulne traduit sans doute la présence, à l'échelle régionale, d'une toundra arbustive. Cette phase est ensuite suivie de la disparition de l'aulne et de la formation d'une toundra herbacée (Bianca Fréchette, communication personnelle).

Un élément particulier, tant au lac du Sud-Ouest que dans le prisme sédimentaire d'une épaisseur de 14 cm récoltée antérieurement au cratère (Richard et al., 1989), concerne les concentrations polliniques très élevées dans les sédiments minéraux, concentrations supérieures à celles des sections plus organiques (Richard et al., 1989, Fréchette et al., 1996). Il est important de retenir que les fortes concentrations polliniques mesurées dans l'argile basale peuvent être le résultat d'un apport important de grains de pollen secondaires pris en charge depuis les dépôts meubles environnants et redéposés ensuite dans le lac (Richard et al., 1989). Une hypothèse proposée par Richard et al. (1991) et Fréchette et al. (1996) à cet effet est que la source de ce pollen secondaire soit les tills avoisinants. Ceux-ci ont en effet un contenu pollinifère très élevé (Fréchette et al., 1996). En raison du faible potentiel abrasif des derniers glaciers (voir Chapitre 1), les tills contiendraient encore des

grains de pollen de l'interglaciaire Sangamonien et peut-être même des interglaciaires précédents (Richard et al., 1989; 1991; Fréchette, 1994; Fréchette et al., 1996). Ces grains d'origine secondaire auraient donc été incorporés aux sédiments et engendreraient une augmentation significative des concentrations polliniques.

Cette hypothèse n'a cependant pas pu être testée dans le cadre de notre étude :

- en ce qui concerne les concentrations polliniques, les quantités de sédiments disponibles pour les analyses polliniques de chacun des niveaux étaient très petites. De plus, leur teneur en humidité était variable, certains étaient sous forme de poudre, d'autres de blocs, d'autres encore de boue ou d'un mélange d'une forme et l'autre. Ces variations engendrent un important risque d'erreur lors de la mesure du volume. Conséquemment, un biais variable et difficilement quantifiable a pu survenir au moment du calcul des concentrations. En raison de ce risque trop élevé et de l'impossibilité d'effectuer une rectification de l'erreur, les concentrations polliniques calculées n'ont pas été utilisées dans le cadre de ce mémoire.

- en ce qui concerne l'incorporation de grains de pollen des sédiments glaciaires dans les sédiments interglaciaires, nous ne sommes bien entendu pas à l'abri de ce genre d'inexactitude et il est probable que des grains identifiés au sein de la carotte soient d'origine secondaire. En effet, il n'a pas été possible de distinguer les grains qui auraient pu être redéposés, soit parce que la diversité d'espèces ne variait pas assez, soit parce que le degré de corrosion des grains n'était pas assez différent d'un type de sédimentation à l'autre.

Nous nous fierons donc à la dynamique végétale illustrée par notre diagramme pollinique. Si nous considérons que les Unités B et C se sont succédées dans le temps et appartiennent à la période holocène postglaciaire, nous remarquons une suite d'événements tout à fait cohérente. Un même patron cohérent fut aussi obtenu pour l'analyse des diatomées de la même carotte (Black et al., 2010). Ce ne serait sans doute pas le cas si d'importantes contaminations par des grains de pollen d'origine secondaire avaient eu lieu.

L'aulne crispé aurait donc connu une importante migration vers le nord pour ensuite se retirer aux latitudes que nous lui connaissons aujourd'hui. Nous supposons aussi que la végétation qui a colonisé la péninsule de l'Ungava pendant l'interstadaire qui a eu lieu vers 35 ka BP était similaire à celle d'aujourd'hui.

Reconstitutions climatiques

Parmi les divers types de reconstitutions climatiques quantitatives possibles à partir de l'analyse pollinique, nous avons retenu les températures moyennes de juillet et de janvier de même que les précipitations annuelles. Les résultats suggèrent que les températures de juillet étaient généralement plus chaudes d'environ 3°C en moyenne par rapport à celles d'aujourd'hui (5,6 °C), pouvant même être de 5°C plus élevées pendant l'Holocène moyen (Unité B). Cet écart s'est ensuite réduit pour être d'environ 1°C plus élevé que l'actuel pendant la période représentée par l'Unité C (Holocène supérieur). En revanche, on observe la situation inverse en ce qui concerne les températures moyennes de janvier (moyenne actuelle : -28°C). Elles étaient d'abord plutôt froides suite à la déglaciation (-26°C; Unité B) pour ensuite s'adoucir (-22°C; Unité C). Quant aux précipitations moyennes annuelles, elles furent semblables (304 mm an⁻¹ pour l'Unité B et 417 mm an⁻¹ pour l'Unité C) à la moyenne actuelle qui, elle, varie entre 300 et 400 mm an⁻¹. Ce qui différencie les deux périodes sont les écarts entre les minimums et les maximums. En effet, les variations furent beaucoup plus importantes pendant l'Unité B que pendant l'Unité C.

En tenant pour acquis que le pollen fossile soit essentiellement primaire, la fiabilité de la méthode employée pour effectuer ces reconstitutions climatiques quantitatives repose sur trois principaux postulats. Ceux-ci sont (1) que le climat est le principal facteur responsable des changements paléoécologiques observés, (2) que les interactions entre les plantes et le climat sont toujours demeurées les mêmes dans le passé, et (3) que les observations modernes comportent toutes les informations nécessaires à l'interprétation des données fossiles (Guiot et al., 2009). Bien que cette méthode ait permis de jeter les bases des reconstructions climatiques quantitatives et qu'elle fut grandement utilisée à travers le Monde, notamment en Europe (e.g. Huntley et Prentice, 1988; Guiot, 1990), elle n'est toutefois pas sans défauts (Guiot et al., 2009). En effet, des conditions climatiques

différentes de celles d'aujourd'hui ou des spectres polliniques fossiles sans analogue moderne peuvent limiter la précision des reconstitutions. Il a aussi été démontré que certains facteurs externes peuvent interférer avec la croissance des plantes. Le facteur le plus étudié est sans doute celui de l'effet des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère (Guiot et al., 2000; 2008; 2009; Garreta et al., 2010).

Ceci nous amène à constater deux erreurs possibles et inhérentes à la méthode utilisée dans cette étude. D'abord, un même spectre pollinique peut correspondre à plus d'un type de climat, surtout dans les régions où les précipitations sont abondantes et ne constituent pas le facteur limitant pour la végétation. Ensuite, un même type de climat peut produire plusieurs spectres polliniques différents (B. Fréchette, communication personnelle). Pour réduire l'impact de l'une ou l'autre de ces erreurs, il est important de bien choisir les variables à reconstituer. Généralement, le pollen comme seul bio-indicateur n'est pas suffisant pour produire une reconstitution précise des précipitations (Guiot et al., 2009). Dans les environnements arctiques, les températures moyennes de juillet sont toutefois statistiquement bien reconstruites (Fréchette et al., 2008).

Comparaison des températures moyennes de juillet

Des reconstitutions paléoclimatiques quantitatives ont aussi été réalisées dans les régions arctiques de l'est du Canada. Des résultats similaires à ceux du Cratère des Pingualuit ont été obtenus par Rolland et al. (2008) sur l'île de Southampton (Figure 1) pour les températures moyennes d'août à l'aide des capsules céphaliques des larves de chironomides. Leurs résultats suggèrent qu'au cours de la période hypsithermique, dont la fin se situe vers 4400 ans étal. BP, les températures de l'air du mois d'août étaient supérieures d'environ 2,2°C par rapport à l'actuel. Cette période chaude fut suivie d'une période de stabilité thermique et d'un refroidissement de l'ordre de 1,2°C au cours des 1000 dernières années. Des résultats semblables ont également été obtenus par Zabenskie et Gajewski (2007) sur la péninsule de Boothia au Nunavut à partir d'analyses polliniques (Figure 1). Les températures moyennes de juillet étaient plus élevées qu'aujourd'hui entre 5700 et 3800 ans étal. BP (7,8°C) et plus basses par la suite. Ces résultats concordent avec

ceux que Kaufman et al. (2004) ont répertoriés selon lesquels au Québec nordique, au Labrador et sur l'île de Baffin, la période la plus chaude aurait eu lieu entre 6300 et 3700 ans étal. BP. Cet optimum climatique serait vraisemblablement survenu sur les îles de l'Arctique avant le nord du Québec en raison de la présence de glaces résiduelles laissées par l'inlandsis Laurentidien et de la circulation atmosphérique dans l'Atlantique nord (Kaufman et al., 2004).

Pour les sections de la carotte du Cratère des Pingualuit pour lesquelles les températures de juillet sont les plus chaudes (Unité B), on note une représentation pollinique élevée d'*Alnus* sp. que nous savons être particulièrement favorisé par des températures de juillet plus élevées (Anderson et al., 1991). Cette période serait celle de l'optimum climatique holocène dans le nord du Québec. Pour les sections de la carotte durant lesquelles les températures estivales furent plus froides (Unité C), on remarque une diminution de l'aulne et une transition vers des taxons herbacés. Il s'agirait ici de la manifestation du refroidissement du Néoglaciale.

Ces observations confirment notre hypothèse selon laquelle « *la dynamique végétale s'est modifiée en fonction des changements du climat* ». Lorsque les conditions climatiques furent plus clémentes, le couvert végétal se serait bel et bien diversifié et densifié contrairement aux périodes plus difficiles où il se serait clairsemé.

Conclusion

La carotte sédimentaire récoltée au Cratère des Pingualuit était à priori prometteuse pour l'enregistrement de l'interglaciaire Sangamonien en raison de la présence de quelques horizons organiques au sein des sédiments inorganiques. Nous avons toutefois été confrontés à un système sédimentaire caractérisé, entre autres, par des mouvements de masse qui ont eu pour conséquence une importante accumulation de sédiments minéraux ayant entrecoupé ceux plus organiques datant tous de la période postglaciaire holocène. Les sédiments plus organiques de la carotte sont donc essentiellement d'âge Holocène moyen et supérieur.

Malgré l'absence de l'enregistrement sédimentaire sangamonien, il a cependant été possible de mettre en lumière quelques éléments inédits. L'objectif général du mémoire était de reconstituer l'histoire et la dynamique de la végétation d'un secteur de la péninsule de l'Ungava à l'aide de l'analyse pollinique. Nous avons pu établir que le couvert végétal régional qui s'est constitué suite au retrait des glaces, vers 6500 ans écal. BP, correspondait à une toundra herbacée. En réponse au réchauffement graduel des températures estivales d'environ 3°C (vers 6000 ans écal BP), cette toundra herbacée s'est progressivement transformée en une toundra arbustive caractérisée par la présence d'*Alnus crispa*. Les pourcentages élevés de l'aulne permettent de croire que l'espèce était présente régionalement bien que son abondance réelle dans le paysage demeure très difficile à estimer. Si l'aulne crispé était présent, cela représente une avancée d'environ 140 km plus au nord que sa limite septentrionale actuelle. Des analyses macrofossiles à partir de sédiments récoltés dans de petits lacs seraient toutefois nécessaires afin de certifier cette affirmation. Un retrait subséquent de l'aulne vers sa limite actuelle et un retour vers une toundra herbacée ont ensuite eu lieu pendant l'Holocène supérieur.

La présente étude a permis d'améliorer nos connaissances paléoenvironnementales pour la région du nord de la péninsule d'Ungava. À ces latitudes, rares sont les études qui ont été effectuées avec une si haute résolution stratigraphique. De plus, la méthode des analogues modernes est encore peu utilisée dans des régions aussi septentrionales. Il serait d'ailleurs

intéressant d'effectuer des reconstitutions climatiques dans un autre lac pour comparer les résultats de notre étude. Le lac du Sud-Ouest ne nous offrait malheureusement pas cette opportunité en raison de sa chronologie trop douteuse pour obtenir des résultats solides.

Perspectives de recherche

Comme dans la plupart des études palynologiques dans les régions arctiques, un problème de taille s'est présenté à nous : celui du redépôt des grains de pollen. À ce jour, les méthodes proposées pour remédier à ce problème sont essentiellement qualitatives. Dans le cadre d'une étude comme celle-ci, il est difficile de faire la distinction entre les grains d'origine primaire et ceux d'origine secondaire, car les taxons polliniques identifiés sont tous encore existants dans la région du cratère. En effet, certains grains de pollen datant du Tertiaire tardif ne sont pas assez différents des grains « modernes » pour pouvoir les identifier comme tels. Ils sont alors difficiles à différencier de ceux attribuables à des apports lointains (Gajewski et al., 1995). Certains indices peuvent aider à déterminer s'il y a eu contamination, notamment : la présence de grains de Taxodiaceae, de grosses spores trilètes, un grand nombre de grains de *Betula* à quatre pores, de *Myrica*, de *Larix* ou de *Tsuga*, ou encore une représentation soutenue d'espèces arborescentes décidues tels que *Ulmus*, *Quercus*, *Carya* ou *Fraxinus*. Il est important de noter que ces éléments sont des indices de contamination par redépôt et que leur absence ne signifie pas nécessairement qu'il n'y a pas eu de contamination (Gajewski et al., 1995). C'est le cas au Cratère des Pingualuit.

Gajewski et al. (1995) ont proposé des pistes pour tenter de résoudre le problème du redépôt des grains de pollen :

- D'abord, ils suggèrent d'élaborer les cartes isopolliniques des spectres modernes dans l'Arctique afin de repérer les possibles anomalies rencontrées au cours de l'interprétation des analyses polliniques (Elliot-Fisk et al., 1982).

- Ensuite, ils proposent d'examiner le ratio entre les grains de *Picea* et de *Pinus*. En se basant sur le fait que les pourcentages de *Picea* diminuent au nord de la limite des arbres, on note alors une augmentation relative des pourcentages de *Pinus* (Bourgeois et al., 1985). La situation contraire pourrait alors résulter d'une contamination.

- Enfin, ils évoquent la possibilité d'utiliser la microscopie à fluorescence pour déterminer l'âge des grains de pollen. Cependant, cette méthode est valable à l'échelle des ères géologiques et non à celle des dernières glaciations-déglaciations (Van Gijzel, 1967).

Une étude récente portant sur quatre lacs de l'île nord de la Nouvelle-Zélande a démontré le potentiel du recours à l'examen du degré de corrosion des grains de pollen lors des comptages (Wilmshurst et McGlone, 2005). En effet, il semble que les grains de pollen soient plus corrodés lors des périodes d'instabilité sédimentaire et de forte érosion. Par conséquent, les unités sédimentaires contenant les grains les plus corrodés ou une plus forte proportion de tels grains pourraient être considérées comme des périodes de remobilisation. En revanche, les unités caractérisées par des grains de pollen plutôt intacts seraient associées à des périodes de dépôt d'origine essentiellement primaire (Wilmshurst et McGlone, 2005). Enfin, dans le même ordre d'idée, il serait intéressant de développer une échelle de classification de la corrosion des grains de pollen afin de pouvoir déterminer à partir de quel moment nous pourrions les considérer comme étant d'origine secondaire. Comme nous avons pu observer plusieurs grains corrodés à divers degrés au cours des analyses, cette option pourrait permettre de résoudre en partie le problème de la remobilisation des grains.

Il serait également intéressant d'examiner plus en profondeur l'origine des grains de pollen préservés dans les sédiments considérés comme étant sous-glaciaires. Si le Cratère des Pingualuit était bel et bien recouvert par la glace au cours des périodes correspondant à l'accumulation de ces sédiments (Unités M1 et M2), comment de telles quantités de pollen s'y sont-elles déposées? Si les grains se sont déposés lors de la fonte de l'inlandsis, le pollen serait alors d'origine lointaine et se serait déposé sur le glacier en même temps que la neige. Le même processus se produit actuellement avec la calotte du Groenland (Rousseau et al., 2003). La comparaison des assemblages contenus dans la matrice sédimentaire du cratère que nous avons attribuée à des périodes sous-glaciaires avec le contenu pollinique de couches de glace datant de la même époque pourrait peut-être nous éclairer en ce qui a trait à la dynamique pollinique glaciaire.

Références

- Administration régionale Kativik (ARK), <http://www.parcsnunavik.ca/fr/index.htm>, (consulté le 23 juillet 2008).
- Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung (AWI), http://www.awi.de/en/research/research_divisions/geosciences/periglacial_research/projects/icdp_drilling_at_elgygytgyn_crater_lake/ (consulté le 14 novembre 2010).
- Anderson, P.M., Bartlein, P.J., Brubaker, L.B., Gajewski, K. et Ritchie, J.C., 1991. Vegetation-pollen-climate relationships for the arcto-boreal region of North America and Greenland. *Journal of Biogeography*, 18: 565-582.
- Anderson, T.W., Matthews, J.V., Mott, R.J. et Richard, S.H., 1990. The Sangamonian Pointe-Fortune Site, Ontario-Québec border. *Géographie physique et Quaternaire*, 44: 271-287.
- Andrews, J.T. et MacLean, B., 2003. Hudson Strait ice streams: a review of stratigraphy, chronology and links with North Atlantic Heinrich events. *Boreas*, 32: 4-17.
- Bartley, D.D. et Matthews, B., 1968. A palaeobotanical investigation of postglacial deposit in the Sugluk Area on Northern Ungava (Quebec, Canada). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 9: 45-61.
- Bennett, K.D., 2005. PSIMPOLL 4.25, program for plotting pollen diagrams and analysing pollen data, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Benninghoff, W.S., 1962. Calculation of pollen and spore densities in sediments by addition of exotic pollen in known quantities. *Pollen et Spores* 4: 332-333.
- Black, J.L., Hausmann, S., Pienitz, R., St-Onge, G., Guyard, H., Salonen, V-P., Lavoie, M., Girard-Cloutier, A.-M. et Luoto, T., 2010. Reconstruction of paleoenvironmental changes from Pingualuit Crater Lake sediments during glacial-interglacial cycles MIS 1 to MIS 8: a long term terrestrial record from the Canadian Arctic. European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, Austria.
- Bouchard, M.A., 1989a. L'histoire des travaux scientifiques au Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec ; volume 7, Collection Environnement et Géologie*, Université de Montréal, pp. 23-36.

- Bouchard, M.A., 1989b. Englaciation et glaciation du Cratère du Nouveau-Québec, un modèle théorique. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec* ; volume 7, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, pp. 139-163.
- Bouchard, M.A. et Marcotte, C., 1986. Regional glacial dispersal patterns in Ungava, Nouveau-Québec. *In* Current Research, Part B, Geological Survey of Canada, Paper 86-1B, pp. 295-304.
- Bouchard, M.A. et Marsan, B., 1989. Description du Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec* ; volume 7, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, pp. 37-58.
- Bouchard, M.A., Marsan, B., Péloquin, S., Fortin, G., Saarnisto, M., Schilts, W.W., David, P.P. et Fliszar, A., 1989. Géologie glaciaire du Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec* ; volume 7, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, pp. 101-136.
- Bouchard, M.A. et Saarnisto, M., 1989. Déglaciation et paléodrainages du Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec* ; volume 7, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, pp. 165-189.
- Bourgeois, J.C., Koerner, R.M. et Alt, B.T., 1985. Airborne pollen : A unique air mass tracer, its influx to the canadian High Arctic. *Annals of Glaciology*, 7: 109-116.
- Bourque, P.-A., 1997. La carte géologique du Québec, www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s5/5.1.carte.geol.quebec.html, (consulté le 28 juillet 2010)
- Channell, J.E.T., Sato, T., Kanamatsu, T., Stein, R., Malone, M., Alvarez-Zarikian, and the IOP Expeditions 303 and 306 Scientists, 2006. IODP Expeditions 303 and 306 Monitor Miocene-Quaternary Climate in the North Atlantic. *Scientific Drilling*, 2: 4-10.
- Clet-Pellerin, M. et Occhietti, S., 2000. Pleistocene palynostratigraphy in the St. Lawrence Valley and middle Estuary. *Quaternary International*, 68-71: 39-57.
- Daigneault, R.-A. et Bouchard, M.A., 2004. Les écoulements et le transport glaciaires dans la partie septentrionale du Nunavik (Québec). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41: 919-938.

- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, Jouzel, J. et Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364: 218-220.
- de Vernal, A. et Hillaire-Marcel, C., 2008. Natural variability of Greenland climate, vegetation, and ice volume during the past million years. *Science*, 320: 1622-1625.
- Dignard, N., 2003. La flore vasculaire de la région du Cratère du Nouveau-Québec, Nunavik, Québec. *Provancheria*, 29: 42 p.
- Ditlevsen, P.D., Kristensen, M.S. et Andersen, K.K., 2005. The recurrence time of Dansgaard-Oeschger events and limits on the possible periodic component. *Journal of Climate*, 18: 2594-2603.
- Elliot-Fisk, D.L., Andrews, J.T., Short, S.K. et Mode, W.N., 1982. Isopoll maps and an analysis of the distribution of the modern pollen rain, eastern and central Canada. *Géographie physique et Quaternaire*, 36: 91-108.
- Faegri, K. et Iversen, J., 1989. *Textbook of Pollen Analysis* (4th edition). John Wiley and Sons, Chichester, 328 p.
- Fréchette, B., 1994. Le till pollinifère de la région du Cratère du Nouveau-Québec, Ungava, Québec. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, 209 p.
- Fréchette, B., Bouchard, M.A. et Richard, P.J.H., 1996. Le till pollinifère de la péninsule du Nunavik, Québec septentrional. *Géographie physique et Quaternaire*, 50: 331-340.
- Fréchette, B., de Vernal, A. et Richard, P.J.H., 2008. Holocene and Last Interglacial cloudiness in eastern Baffin Island, Arctic Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45: 1221-1234.
- Fréchette, B., Wolfe, A.P., Miller, G.H., Richard, P.J.H. et de Vernal, A., 2006. Vegetation and climate of the last interglacial on Baffin Island, Arctic Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 236: 91-106.
- Gajewski, K., 1991. Représentation pollinique actuelle à la limite des arbres au Nouveau-Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28: 643-648.
- Gajewski, K., Garralla, S., 1992. Holocene vegetation histories from three sites in the tundra of northwestern Quebec, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 24: 329-336.

- Gajewski, K., Payette, S. et Ritchie, J.C., 1993. Holocene vegetation history at the boreal-forest--shrub-tundra transition in north-western Quebec. *Journal of Ecology*, 81: 433-443.
- Gajewski, K., Garneau, M. et Bourgeois, J.C., 1995. Paléoenvironnements of the Canadian High Arctic derived from pollen and plants macrofossils: problems and potentials. *Quaternary Science Reviews*, 14: 609-629.
- Garreta, V., Miller, P.A., Guiot, J., Hély, C., Brewer, S., Sykes, M.T. et Litt, T., 2010. A method for climate and vegetation reconstruction through the inversion of a dynamic vegetation model. *Climate Dynamics*, 35: 371-389.
- Grieve, R.A.F., Robertson, P.B., Bouchard, M.A. et Alexopoulos, J.S., 1989. Origin and age of the Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Pélouquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec ; volume 7, Collection Environnement et Géologie*, Université de Montréal, pp. 59-72.
- Grimm, E.C., 1987. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computer and Geoscience*, 13: 13-25.
- Groote, P.M., Stuiver, M., White, J.W.C., Johnsen, S. et Jouzel, J., 1993. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 366: 552-554.
- Guiot, J., 1990. Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 80: 49-69.
- Guiot, J., Hély-Alleaume, C., Wu, H. et Gaucherel, C., 2008. Interaction between vegetation and climate variability: what are the lessons of models and paleovegetation data. *Comptes Rendus Geoscience*, 340: 595-601.
- Guiot, J., Torre, F., Jolly, D., Peyron, O., Boreux, J.J. et Cheddadi, R., 2000. Inverse vegetation modeling by Monte Carlo sampling to reconstruct palaeoclimates under changed precipitation seasonality and CO₂ conditions: application to glacial climate in Mediterranean region. *Ecological Modelling*, 127: 119-140.
- Guiot, J., Wu, H.B., Garreta, V. et Magny, M., 2009. A few prospective ideas on climate reconstruction: from a statistical single proxy approach towards a multi-proxy and dynamical approach. *Climate of the Past*, 5: 571-583.

- Hillaire-Marcel, C. et de Vernal, A., 1989. Isotopic and palynological records of the Late Pleistocene in Eastern Canada and adjacent ocean basins. *Géographie physique et Quaternaire*, 43: 263-290.
- Hoffleit, D., 1953. On the origin of Chubb Crater. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 47: 126-126.
- Huntley, B. et Prentice, C.I., 1988. July temperatures in Europe from pollen data, 6000 years before present. *Science*, 241: 687-690.
- Johnsen, S.J., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Jørgen, P.S., Clausen, H.B., Miller, H., Masson-Delmotte, V., Sveinbjörnsdóttir, E. et White, J., 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science*, 16: 299-307.
- Juggins, L.A., 2002. *Palaeo Data Plotter*, Beta test version 1.0., University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, United Kingdom.
- Kaufman, D.S., Ager, T.A., Anderson, N.J., Anderson, P.M., Andrews, J.T., Bartlein, P.J., Brubaker, L.B., Coats, L.L., Cwynar, L.C., Duvall, M.L., Dyke, A.S., Edwards, M.E., Eisner, W.R., Gajewski, K., Geirsdóttir, A., Hu, F.S., Jennings, A.E., Kaplan, M.R., Kerwin, M.W., Lozhkin, A.V., MacDonald, G.M., Miller, G.H., Mock, C.J., Oswald, W.W., Otto-Bliesner, B.L., Porinchu, D.F., Rühland, K., Smol, J.P., Steig, E.J. et Wolfe, B.B., 2004. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W). *Quaternary Science Reviews*, 23: 529-560.
- Kerwin, M.W., Overpeck, J.T., Webb, R.S. et Anderson, K.H., 2004. Pollen-based summer temperature reconstruction for the eastern Canadian boreal forest, subarctic, and Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 23: 1901-1924.
- King, G., 1993. Vegetation and pollen relationship in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany*, 71: 193-210.
- Lamb, H.F., 1984. Modern pollen spectra from Labrador and their use in reconstructing Holocene vegetational history. *Journal of Ecology*, 72: 37-59.
- Lozhkin, A.V. et Anderson P.A., 2006. A reconstruction of the climate and vegetation of northeastern Siberia based on lake sediments. *Paleontological Journal*, 40 (Suppl. 5): 5622-5628.
- Lozhkin, A.V., Anderson, P.M., Matrosova T.V. et Minyuk, P.S., 2007. The pollen record from El'gygytgyn Lake: implications for vegetation and climate histories of northern Chukotka since the middle Pleistocene. *Journal of Paleolimnology*, 37: 135-153.

- Madore, L., Labri, Y., Sharma, K.N.M., Labbé, J.-Y., Lacoste, P., David, J., Brousseau, K. et Hocq, M., 2001. Géologie de la région du lac Klotz (35A) et du Cratère du Nouveau-Québec (½ sud de 35H). *Géologie Québec*, Québec, 44 p.
- Marie-Victorin, F., 2002. Flore laurentienne, 3^e édition. Gaëtan Morin éditeur, Boucherville, 1093 p.
- Marret, F., de Vernal, A., Pedersen, T.F. et McDonald, D., 2001. Middle Pleistocene to Holocene palynostratigraphy of Ocean Drilling Program Site 887 in the Gulf of Alaska, northeastern North Pacific. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38: 373-386.
- McAndrews, J.H., Berti, A.A. et Norris, G., 1973. Key to the Quaternary Pollen and Spores of the Great Lakes Region. Life Science Miscellaneous Publication. Royal Ontario Museum, Toronto, 64 p.
- Meen, V.B., 1957. Chubb Crater - A Meteor Crater. *The Royal Astronomical Society of Canada Journal*, 51: 137-154.
- Melles, M., Brigham-Grette, J., Glushkova O.Y., Minyuk, P.S., Nowaczyk N.R. et Hubberten, H.W., 2007. Sedimentary geochemistry of core PG1351 from Lake El'gygytgyn — a sensitive record of climate variability in the East Siberian Arctic during the past three glacial–interglacial cycles. *Journal of Paleolimnology*, 37: 89-104.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 2005. Plan directeur, Parc national des Pingualuit, Direction du développement durable, du Patrimoine écologique et des Parcs, Service des Parcs, Québec, 59 p.
- Ministère des ressources naturelles (MRN), 2002. Carte géologique du Québec, Édition 2002, Ministère des ressources naturelles, DV 2002-06, échelle 1 : 2 000 000, www.mrn.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp, (consulté le 21 mai 2010)
- Ministère des ressources naturelles et faune (MRNF), 2010. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec, www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp, (consulté le 25 mai 2010)
- Ouzilleau-Samson, D., Bhiry, N. et Lavoie, M., 2010. Late-Holocene palaeoecology of a polygonal peatland on the south shore of Hudson Strait, northern Québec, Canada. *The Holocene*, 20: 525-536.

- Overpeck, J.T., Webb III, T. et Prentice, I.C., 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra and the method of modern analogs. *Quaternary Research*, 23: 87-108.
- Payette, S., 1993. The range limit of boreal tree species in Québec-Labrador: an ecological and palaeoecological interpretation. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 79: 7-30.
- Payette, S., 1996. Toundra arctique. *In* Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (Édit.). Manuel de foresterie. Les Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 288-291.
- Prentice, I.C., 1980. Multidimensional scaling as a research tool in Quaternary palynology: a review of theory and methods. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 31: 71-104.
- Qumaq, T., 1992. La région du Nunavik, <http://www.avataq.qc.ca>, (consulté le 23 avril 2010)
- Reille, M., 1992. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 520 p.
- Reille, M., 1995. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Supplément 1. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 327 p.
- Reille, M., 1998. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Supplément 2. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 530 p.
- Richard, P.J.H., 1970. Atlas pollinique des arbres et de quelques arbustes indigènes du Québec. *Naturaliste canadien*, 97: 1-34, 97-161, 241-306.
- Richard, P.J.H., 1981. Paléophytogéographie postglaciaire en Ungava par l'analyse pollinique. *Paléo-Québec*, 13: 153 p.
- Richard, P.J.H., 1993. Origine et dynamique postglaciaire de la forêt mixte au Québec. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 79: 31-68.
- Richard, P.J.H., 1995. Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6000 ans BP: essai. *Géographie physique et Quaternaire*, 49: 117-140.
- Richard, P.J.H., Larouche, A. et Bouchard, M.A., 1982. Âge de la déglaciation finale et histoire postglaciaire de la végétation dans la partie centrale du Nouveau-Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 36: 63-90.
- Richard, P.J.H. Bouchard, M.A. et Gangloff, P., 1991. The significance of pollen-rich inorganic lake sediments in the Cratère du Nouveau-Québec area, Ungava, Canada. *Boreas*, 20: 135-149.

- Richard, P.J.H., Larouche, A.C. et Morasse, N., 1989. Études floristiques et paléophytogéographiques au Cratère du Nouveau-Québec. *In* Bouchard, M.A. et Péloquin, S. (Édit.), *L'Histoire naturelle du Cratère du Nouveau-Québec* ; volume 7, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, pp. 315-342.
- Ritchie, J.C., 1984. *Past and Present Vegetation of the Far Northwest of Canada*. University of Toronto Press, Toronto, 251 p.
- Rolland, N., Larocque, I., Francus, P., Pienitz, R. et Laperrière, L., 2008. Holocene climate inferred from biological (Diptera: Chironomidae) analyses in a Southampton Island (Nunavut, Canada) lake. *The Holocene*, 18: 229-241.
- Rousseau, C., 1974. *Géographie floristique du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 799 p.
- Rousseau, D.D., Duzer, D., Cambon, G., Jolly, D., Poulsen, U., Ferrier, J., Schevin, P. et Gros, R., 2003. Long distance transport of pollen to Greenland. *Geophysical Research Letters*, 30: 12-1 – 12-4
- Rousseau, J. et Raymond, M., 1955. The flora of Chubb Crater, Appendix. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 12: 496-498.
- Short, S.K. et Nichols, H., 1977. Holocene pollen diagrams from subarctic Labrador-Ungava: Vegetational history and climatic change. *Arctic and Alpine Research*, 9: 265-290.
- Société de la faune et des parcs du Québec (FAPAQ), 2000. *Parc des Pingualuit. État des connaissances*. Gouvernement du Québec, Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la planification et du développement des parcs québécois, Québec, 133 p.
- St-Onge, D.A., 1987. The Sangamonian Stage and the Laurentide Ice Sheet. *Géographie physique et Quaternaire*, 41: 189-198.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. et Reimer, R.W., 2005. CALIB 5.0. www.calib.qub.ac.uk
- Van Gijzel, P., 1967. Palynology and fluorescence microscopy. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2: 49-79.
- Viau, A.E. et Gajewski, K., 2009. Reconstructing millennial-scale, regional paleoclimates of boreal Canada during the Holocene. *Journal of Climate*, 22: 316-330.
- Walker, D.A., Raynolds, M.K., Daniëls, F.J.A., Einarsson, E., Elvebakk, A., Gould, W.A., Katenin, A.E., Kholod, S.S, Markon C.J., Melnikov, E.S., Moskalenko, N.G., Talbot,

- S.S., Yurtsev, B.A., and the other members of the CAVM team, 2005. The circumpolar Arctic vegetation map. *Journal of Vegetation Science* 16: 267-282.
- Weckström, K., Weckström, J., Yliniemi, L.-M. et Korhola, A., 2010. The ecology of *Pediastrum* (Chlorophyceae) in subarctic lakes and their potential as paleobioindicators. *Journal of Paleolimnology*, 43: 61-73.
- Whitmore, J., Gajewski, K., Sawada, M., Williams, J.W., Shuman, B., Bartlein, P.J., Minckley, T., Viau, A.E., Webb III, T., Shafer, S., Anderson, P. et Brubaker, L., 2005. Modern pollen data from North America and Greenland for multi-scale paleoenvironmental applications. *Quaternary Science Reviews*, 24: 1828-1848.
- Wilmshurst, J.M. et McGlone, M.S., 2005. Corroded pollen and spores as indicators of changing lake sediment sources and catchment disturbance. *Journal of Paleolimnology*, 34: 503-517.
- Wolfe, A.P., Fréchette B., Richard P.J.H., Miller G.H. et Forman S.L., 2000. Paleoecology of a >90 000- years lacustrine sequence from Fog Lake, Baffin Island, Arctic Canada. *Quaternary Science Reviews*, 19: 1677-1699.
- Zabenskie, S. et Gajewski, K., 2007. Post-glacial climatic change on Boothia Peninsula, Nunavut, Canada. *Quaternary Research*, 68: 261-270.

Annexe A : Données chronologiques du Cratère des Pingualuit

Carotte de surface

Laboratoire	No de laboratoire	Échantillon	Profondeur composite en cm	Âge ¹⁴ C	±	Âge étal. BP
Beta-256021		PING_SURF_1	0-1	830	40	740
UCIAMS-47806	ULA-620	Surf #5 - 1	0,4-0,7	1110	20	1013
Beta-256022		PING_SURF_2	4-4,7	1510	40	1420
UCIAMS-47807	ULA-621	Surf #5 - 2	4,2-4,5	1520	20	1430
Beta-256023		PING_SURF_3	6,7-7,7	2310	40	2265
UCIAMS-47803	ULA-617	Surf #5 - 3	7,4-7,7	2150	20	2180
Beta-256024		PING_SURF_4	10,3-10,8	2920	40	3080
UCIAMS-47808	ULA-622	Surf #5 - 4	10,4-10,7	2430	20	2520
UCIAMS-47809	ULA-623	Surf #5 - 5	13,1-13,3	3255	20	3485
UCIAMS-47810	ULA-624	Surf #5 - 6	13,6-13,9	15560	60	18750
Beta-256025		PING_SURF_5	14,5-15,7	4320	40	4905
UCIAMS-47811	ULA-625	Surf #5 - 7	14,6-14,9	4255	20	4841
UCIAMS-47812	ULA-626	Surf #5 - 8	17,3-17,6	1885	20	1810
Beta-256026		PING_SURF_6	18,3-19,3	2120	40	2150
UCIAMS-47813	ULA-627	Surf #5 - 9	18,8-19,1	2725	20	2817

Source : Hervé Guyard, communication personnelle

Carottier à piston

Laboratoire	No de laboratoire	Échantillon	Profondeur composite en cm	Âge ¹⁴ C	±	Âge étal. BP
Beta-256027		PING_TOP_PC	0-2	8680	50	9660
UCIAMS-74434	ULA-1549	PING_5cm	5	3885	15	4330
UCIAMS-75730	ULA-1550	PING_10cm	10	3825	15	4220
UCIAMS		PING_80 cm	78.5-80			
UCIAMS		PING_205 cm	204.5-205.5			
Beta-256019		PING_IG1_1	257,5-258,5	5080	40	5825
UCIAMS-47802	ULA-616	IG1 (sédiment lacustre)	264,8-265,2	4895	20	5624
Beta-256020		PING_IG1_2	265,5-267,5	5800	40	6585
UCIAMS-49080	ULA-655	IG1 (sédiment lacustre)	266-267	5705	25	6485
UCIAMS		PING_335 cm	334-335			
UCIAMS		PING_460 cm	459-460			
UCIAMS		PING_655 cm	654.5-655.5			
UCIAMS-75736	ULA-1551	PING_760cm	760	29550	270	34085
Beta-275124		PING_775cm	775	30060	260	34785
UCIAMS-75731	ULA-1552	PING_780cm	780	29310	330	33915
UCIAMS-75737	ULA-1553	PING_805cm	805	24570	170	29280
Beta-275125		PING_840cm	840	27760	210	31485
UCIAMS-75732	ULA-1554	PING_840cm	840	31080	420	35670

Source : Hervé Guyard, communication personnelle

Annexe B: Taxons polliniques non représentés dans les diagrammes sporopolliniques

Taxon		Pourcentages et profondeurs
Autres arbres	<i>Pinus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 2 et 131 cm • 0,6% à 274 cm • 0,9% à 255 et 272 cm
	<i>Pinus strobus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 261,5; 262,5 et 266 cm • 0,2% à 10; 21,2; 256,5; 259,5; 260,5; 265,5 et 811 cm • 0,3% à 0,4; 3,6; 14 et 762 cm • 0,6% à 268,5 cm • 0,8% à 257,5 cm
	<i>Larix laricina</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 301 cm
	<i>Tsuga canadensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 275 cm
	<i>Carya ovata</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 262,5 cm • 0,2% à 258 cm
	<i>Ulmus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,2% à 21,2 cm • 0,3% à 274,5 cm
	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 272,5; 751 et 771 cm
	<i>Quercus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,2% à 811 cm • 0,3% à 271,5 cm
	<i>Populus sp.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 274 cm
Autres arbustes	<i>Myrica gale</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 262,5 cm
	<i>Viburnum</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 111 cm
Autres herbes	Caryophyllaceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 261,5 et 269 cm • 0,2% à 6,8; 21,2; 258; 264,5; 481 et 641 cm • 0,3% à 5,2; 91; 131; 236; 255; 257,5; 273,5; 275; 561 et 762 cm

		<ul style="list-style-type: none"> • 0,4% à 766 cm • 0,5% à 271,5 cm • 1,4% à 273 cm • 1,5% à 271 cm
	Fabaceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 266 cm • 0,2% à 257; 267 et 601 cm • 0,3% à 269,5 et 771 cm • 0,6% à 751 cm • 1,0% à 762 cm
	Papaveraceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 261 cm • 0,2% à 201 cm
	Saxifragaceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 261,5 et 262 cm • 0,2% à 6,8 et 259,5 cm • 0,3% à 3,6; 221 et 268,5 cm • 0,5% à 256,5 cm
	<i>Polygonum</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 275 cm
	<i>Rumex</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 263 cm
	Rubiaceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 236 cm
Herbes arctiques	Ranunculaceae	<ul style="list-style-type: none"> • 0,2% à 51 cm • 0,3% à 268,5; 272,5; 274 et 281 cm • 0,6% 271 cm • 0,9% à 272 cm
	<i>Rubus chamaemorus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 266 cm • 0,2% à 201 et 259,5 cm • 0,3% à 31; 111; 272,5; 273,5; 274; 275,5; 281; 301; 721 et 771 cm • 0,4% à 766 cm • 0,6% à 541 et 681 cm • 0,7% à 421 cm • 1,0% à 274,5 et 561 cm • 1,3% cm à 441 cm

	<i>Koenigia islandica</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,3% à 236 cm
Autres Hors total	<i>Selaginella</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 262,5 cm
	<i>Huperiza</i> type <i>selago</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 0,2% à 6,8 et 266 cm • 0,3% à 2; 3,6; 14; 14,8; 16,4; 31 et 771 cm • 0,4% à 10 et 71 cm • 0,5% à 91; 201 et 236 cm • 0,6% à 751 cm • 1,0% à 273,5 et 441 cm
	<i>Equisetum</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • 0,2% à 51 cm • 0,3% à 272,5 cm
	<i>Botrychium</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1% à 261 cm • 0,2% à 201; 256,5 et 259,5 cm • 0,3% à 31; 236; 253,5; 271; 272; 281; 541 • 0,4% à 276; 321 et 601 cm • 0,5% à 18,2; 91; 131 et 481 cm • 0,6% à 221; 275; 401; 461 et 771 cm • 0,7% à 521 et 766 cm • 0,8% à 761 et 847 cm • 0,9% à 301 cm • 1,0 à 561 et 762 cm • 1,1% à 111 cm • 1,2% à 272,5; 276,5 et 811 cm