

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

Photographs included in the original manuscript have been reproduced xerographically in this copy. Higher quality 6" x 9" black and white photographic prints are available for any photographs or illustrations appearing in this copy for an additional charge. Contact UMI directly to order.

Bell & Howell Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UMI[®]



Université d'Ottawa • University of Ottawa

***ÉTUDE SUR LE DÉVELOPPEMENT
DES CALCRÈTES DE FISSURES DU YUKON SEPTENTRIONAL,
DU PLÉISTOCÈNE À AUJOURD'HUI***

Par

 **Yanie Chauret**

**Département de Géographie
Université d'Ottawa**

**Thèse présentée à
l'École des Études Supérieures et de la Recherche
en vue de l'obtention d'une
Maîtrise ès Arts, Géographie**

Université d'Ottawa, Ottawa



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

0-612-48142-5

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord mon directeur de thèse, Bernard Lauriol, pour avoir eu confiance dans mon travail et pour m'avoir permis de vivre une expérience de terrain inoubliable dans les régions arctiques. Tout au long de cette recherche, il fut un guide d'une disponibilité généreuse, de qui j'ai appris la patience et la persévérance dans le travail.

Je remercie aussi André Desrochers pour ses précieux conseils et enseignements sur l'étude de la roche calcaire et des carbonates secondaires, ainsi que pour m'avoir permis l'accès à son laboratoire pendant de longs mois. Claude Hillaire-Marcel et Bassam Ghaleb, pour m'avoir rendu accessibles les résultats de leur travail de datation U/Th, de même que Ian D. Clark pour son étude sur les isotopes stables.

Danielle Fortin a apporté une contribution nécessaire, par son assistance technique lors de l'observation des micro-organismes au microscope à balayage électronique. De plus, je ne puis taire la qualité du travail de Georges Mrazek dans la préparation des échantillons et celui de Pierre Bertrand dans le traitement des microphotographies.

Cette recherche a généreusement été supportée par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et par le Programme de formation Scientifique dans le Nord (NSTP).

J'exprime enfin une reconnaissance sans limite à mes amis Caroline, Marianne, Richard, Lucie et les autres, ainsi qu'à mes parents. Leur support moral et leur sincère affection m'ont donnés l'énergie nécessaire pour accomplir cette thèse.

RÉSUMÉ

Les calcrètes de fissures sont des dépôts de carbonates secondaires que l'on retrouve accolés à l'une des surfaces internes des fissures de la roche calcaire. Si les fissures de la roche où elles se sont développées en sont très riches, elles n'ont jusqu'à maintenant été observées que dans les régions froides et sèches du lac Centrum situé au nord-est du Groënland, ainsi que dans les massifs calcaires du nord du Yukon.

Il existe peu d'informations disponibles sur le sujet précis des dépôts de carbonates secondaires localisés dans les fissures de la roche calcaire des régions subarctiques. Par conséquent, l'objectif de la thèse est de déterminer quelles sont les conditions favorables à leur genèse et à leur croissance, ainsi que de dresser un portrait général de l'expression du temps sur leurs micro-structures au cours de leur développement. Pour atteindre cet objectif, une analyse des composantes macroscopiques et microscopiques des calcrètes de fissures a été réalisée sur une série d'échantillons provenant de trois régions calcaires du nord du Yukon : la région de Joe Creek située dans les Monts British, la montagne de Bear Cave ainsi que les calcaires du Dempster Highway situés dans les Monts Ogilvie.

Les observations sur le terrain ont d'abord révélé que les calcrètes de fissures se développent abondamment à l'intérieur de fissures fermées de façades rocheuses exposées au sud et que le relief de leur surface laisse toujours son empreinte sur la roche qui lui fait face dans la fissure.

Les observations au microscope pétrographique optique indiquent qu'à maturité, elles peuvent être formées de six fabriques principales, qui se sont développées les unes après les autres selon un ordre chronologique défini. Ces fabriques sont composées d'une abondance variable de cristaux de calcite primaire et secondaire, qui s'organisent entre eux pour former quatre textures laminées et cinq textures non laminées. Cependant, l'analyse de l'abondance des fabriques et des textures par rapport à la localisation des sites d'échantillonnage, n'indique aucune tendance significative.

Les observations au microscope à balayage électronique révèlent la présence de micro-organismes calcifiés et emprisonnés au cœur des structures des calcrètes. Bien que les textures laminées de ces dépôts rappellent celles des stromatolites, auxquels on attribue souvent la genèse à une biominéralisation, la présence de micro-organismes dans le cas des calcrètes de fissures, n'est pas concluante étant donné l'état calcifié dans lequel ils sont. D'autre part, les résultats d'analyse en cathodoluminescence, qui concordent avec ceux des analyses isotopiques déjà réalisés, suggèrent un milieu de genèse et de croissance anaérobie et saturé en eau.

Enfin, des datations $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ effectuées par d'autres chercheurs, suggèrent que les calcrètes de fissures se seraient développées au cours du dernier interglaciaire, il y a 82 000 ans, et que certaines seraient encore actives aujourd'hui. L'étude de ce type de dépôt s'avère donc être un outil important dans la détermination d'une chronologie exacte de l'évolution du climat au cours de cette période. De plus, même si plusieurs mystères perdurent encore au sujet des calcrètes de fissures, l'ensemble de la recherche a cependant permis d'établir une base importante de connaissances sur leurs composantes microscopiques, ainsi que sur leur environnement de genèse et de croissance.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
 Chapitre premier : INTRODUCTION	 1
1.1 <u>Revue de littérature</u>	3
1.1.1 Les dépôts de calcite secondaire localisés sur la surface inférieure des sédiments fluvio-glaciaires, des cailloux et des blocs rocheux reposant sur la surface du sol	4
1.1.2 Les fragments de calcrêtes	6
1.1.3 Les placages de calcite secondaire sous-glaciaires	6
1.1.4 Les dépôts de carbonate secondaire localisés à l'intérieur des fissures de la roche calcaire	7
1.2 <u>Problématique</u>	7
1.2.1 Énoncé du problème et intérêt de l'étude	7
1.2.2 Objectif	9
1.2.3 Hypothèse de recherche	10
 Chapitre 2 : CADRE PHYSIQUE	 11
2.1 <u>Une région épargnée par les glaces du Pléistocène</u>	11
2.2 <u>La géologie des formations calcaires du Yukon</u>	13
2.3 <u>Le climat</u>	14
2.4 <u>La végétation</u>	14
2.5 <u>Localisation et description des trois régions à l'étude</u>	15
2.5.1 La montagne de Bear Cave	16
2.5.2 Les calcaires du Dempster Highway	16
2.5.3 La région de Joe Creek	18
 Chapitre 3 : MÉTHODE ET TECHNIQUES	 20
3.1 <u>Travaux sur le terrain</u>	20
3.1.1 Plan de travail	20

3.1.1.a	Premier échantillonnage	20
3.1.1.b	Deuxième échantillonnage	20
3.1.1.c	Troisième échantillonnage	21
3.1.2	Prélèvement des échantillons	21
3.1.3	Observation des caractéristiques environnementales des sites étudiés ..	22
3.2	Travaux en laboratoire	23
3.2.1	Macroscopie	23
3.2.2.a	Application	23
3.2.2.b	Préparation des échantillons	26
3.2.3	Microscopie électronique	26
3.2.3.a	Application	26
3.2.3.b	Préparation des échantillons	27
3.2.4	Cathodoluminescence (CL)	27
3.2.4.a	Application	27
3.2.4.b	Préparation de l'échantillon	29
3.2.5	Isotopes stables	29
3.2.6	Datations $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$	29
Conclusion		30
Chapitre 4	RÉSULTATS	31
4.1	Observations sur le terrain et évidences macroscopiques	31
4.1.1	La montagne de Bear Cave	32
4.1.1.a	Tors localisés sur le sommet de la montagne	32
4.1.1.b	Base de crêtes et de grandes failles localisées sur le sommet de la montagne	34
4.1.1.c	Dalles exposées et roches enfouies sous le sol	34
4.1.1.d	Entrées de cavernes ou porches	35
4.1.1.e	Tors de versant	35
4.1.2	Le Dempster Highway	37
4.1.3	Les Monts British	38
4.2	Macroscopie	38
4.3	Péetrographie	41
4.3.1	Les fabriques	41
4.3.2	Les textures	46
4.3.2.a	Les textures laminées	46
4.3.2.b	Les textures non laminées	47
4.3.3	Les successions temporelles de fabriques	51
4.3.4	Autres caractéristiques péetrographiques	52
4.3.4.a	La porosité	52
4.3.4.b	Fabriques de remplissage des pores	53
4.4	Microscopie électronique	53
4.5	Cathodoluminescence (CL)	54
Conclusion		57

Chapitre 5 : DISCUSSION	59
5.1 <u>Les conditions initiales favorables à la genèse des calcrètes de fissures</u>	59
5.1.1 L'âge des calcrètes de fissures	59
5.1.2 Processus de genèse	60
5.1.2.a <i>Le début de genèse d'une calcrète de fissures dans une mince fissure de la roche</i>	60
5.1.2.b <i>Les composantes détritiques</i>	61
5.1.2.c <i>Les micro-organismes</i>	63
5.1.3 L'environnement de genèse	64
5.2 <u>La croissance des calcrètes de fissures dans les pores de la roche</u>	64
5.2.1 Les six fabriques	65
5.2.1.a <i>Chronologie relative à la genèse de chacune des fabriques...</i>	65
5.2.1.b <i>La vitesse de précipitation</i>	66
5.2.1.c <i>Succession de générations à l'intérieur d'une même fabrique</i>	66
5.2.2 Le néomorphisme dans les structures	67
5.2.2.a <i>Origine et migration du néomorphisme dans les structures</i>	67
5.2.2.b <i>Les textures primaires</i>	68
5.2.2.c <i>Les textures secondaires</i>	68
5.2.2.d <i>Les textures en phase transitoire</i>	69
5.3 <u>Les conditions actuelles</u>	72
5.3.1 Le facteur thermique	73
5.3.2 Caractéristiques de la roche hôte	73
5.3.3 Le corridor non englacé du Yukon	75
CONCLUSION	76
<u>Modèle de genèse des calcrètes de fissures</u>	78
BIBLIOGRAPHIE	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Calcrètes de fissures se développant à l'intérieur des fissures d'une paroi de roche calcaire.	2
Figure 1.2 :	Bloc de calcaire marqué de l'empreinte du relief de surface d'une calcrète de fissures.	2
Figure 2.1 :	Carte de localisation des trois régions étudiées, ainsi que des quatre sites d'échantillonnage le long du Dempster Highway.	12
Figure 2.2 :	Le versant sud de la montagne de Bear Cave haute de 500 m à partir du fond de la vallée.	17
Figure 2.3 :	Photographie des tors qui se dressent dans les 200 derniers mètres de la partie haute du versant sud du massif de Bear Cave.	18
Figure 2.4 :	Partie haute d'un des versants de montagne faisant partie des formations calcaires de la région de Joe Creek.	19
Figure 3.1 :	Profil de la montagne de Bear Cave illustrant les cinq situations environnementales étudiées sur le versant sud.	22
Figure 4.1 :	Photographie du site « TOR#1 1995 » de la montagne de Bear Cave.	36
Figure 4.2 :	Illustrations des différentes structures identifiées sur la surface des calcrètes de fissures à l'aide d'une loupe binoculaire.	39
Figure 4.3 :	Illustrations des trois structures composées identifiées sur la surface des calcrètes de fissures à l'aide d'une loupe binoculaire.	40
Figure 4.4 :	Microphotographies prises au microscope pétrographique optique montrant les six principales fabriques dont sont composées les calcrètes de fissures, ainsi que les textures identifiées dans chacune.	44
Figure 4.5 :	Microphotographies prises au microscope pétrographique optique montrant les différentes textures identifiées dans les fabriques des calcrètes de fissures.	45
Figure 4.6 :	Microphotographies prises au microscope pétrographique montrant trois différents types de ciments de remplissage tardif des pores dans les calcrètes de fissures.	55
Figure 4.7 :	Micorphotographies prises au microscope à balayage électronique montrant les différents types de colonies de micro-organismes emprisonnées dans la calcite des calcrètes de fissures.	56

Figure 5.1 :	Microphotographie du début de genèse d'une calcrète de fissures à l'intérieur d'une mince fissure de la roche.	60
Figure 5.2 :	Microphotographies au microscope pétrographique optique montrant (A) l'intégration de grains de calcaire appartenant à la roche hôte, dans la calcrète de fissures en développement, ainsi que (B) le prolongement d'une zone différenciée de la roche hôte, à l'intérieur d'une calcrète de fissures en développement.	62
Figure 5.3 :	Microphotographie d'une calcrète de fissure développée en partie sur une veine de calcite qui entre dans la roche.	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Classification des sites d'échantillonnage de la montagne de Bear Cave selon leur situation sur le versant sud.	21
Tableau 4.1 : Principales caractéristiques macroscopiques relevées lors des travaux de terrain dans chacun des sites étudiés.	33
Tableau 4.2 : Les six principales fabriques observées dans les calcrètes de fissures et leurs principales caractéristiques.	42
Tableau 4.3 : Résultats d'identification au microscope pétrographique optique de la ou des textures(s) associée(s) à chacune des fabriques qui compose chacun des 52 échantillons de calcrètes de fissures.	48
Tableau 4.4 : Fréquence de chaque texture identifiée dans chacune des fabriques de tous les échantillons, par rapport au nombre total de textures identifiées dans chaque fabrique.	49
Tableau 4.5 : Abondance de chacune des textures par rapport au total de textures identifiées dans les échantillons provenant des différentes situations de versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek.	50
Tableau 4.6 : Abondance des six fabriques et des successions temporelles de fabriques de type colonnette et de type digité et/ou dôme, par rapport au total de chacune d'entre elles identifiée dans les échantillons provenant des différentes situations du versant Sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek.	50
Tableau 4.7 : Les fabriques qui caractérisent les deux principaux types de successions temporelles, soit les successions temporelles de type colonnette et de type digité et/ou dôme.	51

Chapitre premier

INTRODUCTION

Les environnements calcaires des régions sub-arctiques sont généralement propices au développement d'encroûtements de carbonates secondaires qui apparaissent sous diverses formes et divers contextes locaux. L'une des formes les plus courantes est celle que l'on retrouve accolée sur les surfaces inférieures de cailloux et de blocs rocheux. Ces formes, que l'on appelle « calcrètes », ont soulevé beaucoup d'intérêt pour leur potentiel dans l'étude des paléoclimats en milieux de pergélisol continu. On appelle calcrètes tout matériel terrestre composé majoritairement mais non exclusivement de carbonate de calcium, apparaissant sous une variété de formes allant de poudreuses, nodulaires, à fortement indurées. Elles résultent de la cimentation, ainsi que de la réorganisation et du remplacement du carbonate de calcium dans les profils de sols, la roche mère ou les sédiments, dans des endroits où la zone vadose et les eaux de sol peu profondes deviennent saturées en carbonate de calcium (Wright et Tuckher, 1991).

Une autre forme de dépôts de carbonates secondaires, s'apparentant à celle que l'on retrouve accolé sous les cailloux et les blocs rocheux, a été découverte par Lauriol et Clark, alors qu'ils s'adonnaient à des recherches géomorphologiques sur les massifs calcaires du nord du Yukon. Ce nouveau genre de dépôt de carbonates secondaires, était cette fois accolé à l'une des surfaces internes des fissures de la roche calcaire (figure 1.1). Étant donné leur ressemblance avec les calcrètes que l'on retrouve accolées aux surfaces inférieures de cailloux et de blocs rocheux, ainsi que leur localisation à l'intérieur des fissures de la roche, on leur a attribué le nom de « calcrètes de fissures ».

Les calcrètes de fissures ont une épaisseur moyenne de 1.5 cm, qui peut varier de quelques microns jusqu'à 3 cm. Leur surface est poreuse et présente de délicates structures allant des formes granulées, nodulaires à colonnaires. La paroi rocheuse qui leur est opposée à l'intérieur de la fissure, est invariablement marquée de l'empreinte du relief de sa surface (figure 1.2) et leur couleur



Figure 1.1 : Calcrètes de fissures se développant à l'intérieur des fissures d'une paroi de roche calcaire.



Figure 1.2 : Bloc de calcaire marqué de l'empreinte du relief de surface d'une calcrète de fissures. La surface marquée de l'empreinte faisait face à la calcrète tout au long de sa croissance.

est généralement voisine de celle de la roche sur laquelle elles se sont développées. L'observation au microscope optique montre qu'elles sont composées de micro-laminations semblables à celles que l'on observe dans les structures des stromatolites. Quelques échantillons ont déjà fait l'objet de datations $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ au département des sciences de la Terre de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Les résultats indiquent que les calcrètes de fissures se seraient développées au cours du dernier interglaciaire, il y a 82 000 ans, et que certaines d'entre elles seraient toujours actives. Elles ont été répertoriées dans plusieurs environnements calcaires localisés à l'intérieur des limites du corridor non englacé du Yukon, soit dans les Monts British, les Monts Richardson et les Monts Ogilvie. Des recherches effectuées dans des environnements calcaires situés à l'extérieur des limites de ce corridor, n'ont pas permis jusqu'à présent de constater leur présence.

Jusqu'à maintenant, seuls Adolphe et Loubière (1987) et Loubière (1987) ont remarqué l'existence de précipitations calcaires semblables au lac Centrum situé au nord-est du Groënland. Leurs travaux ne proposent pas cependant de modèle de croissance explicatif. L'objet de cette thèse est donc de comprendre quelles sont les conditions environnementales, telles les conditions d'ensoleillement, de circulation d'eau, d'érosion et de pergélisol, responsables de la genèse des calcrètes de fissures, ainsi que celles qui ont favorisé leur croissance à partir du dernier interglaciaire jusqu'à aujourd'hui, exclusivement à l'intérieur des limites du corridor non englacé du Yukon septentrional.

1.1 Revue de littérature

L'étude des carbonates secondaires continentaux est un sujet large et généralement bien documenté. Pourtant, on retrouve actuellement dans la littérature bien peu d'informations concernant le sujet précis des dépôts carbonatés localisés à l'intérieur des fissures de la roche en milieux froids et secs, c'est-à-dire les calcrètes de fissures. Dans cette section du chapitre premier de la thèse, nous proposons une revue des études réalisées sur l'ensemble des différents types de dépôts de carbonate de calcium secondaires en milieux froids et secs. Nous ferons la description des formes de dépôts étudiées, ainsi que la description des processus associés à leur genèse. Ceci permettra de rendre compte des principales composantes offertes par ces milieux et de leur implication dans les processus de dissolution et reprécipitation de la calcite.

1.1.1 Les dépôts de calcite secondaires localisés sur la surface inférieure des sédiments fluvio-glaciaires, des cailloux et des blocs rocheux reposant sur la surface du sol

Des concrétionnements en choux-fleurs apparaissant sous les surplombs des corniches ou sur les faces inférieures des blocs des versants calcaires du Spitsberg, ont été observés et décrits par André (1991, p. 192-197). Ils sont formés de pendeloques millimétriques qui se soudent parfois pour donner naissance à de véritables croûtes calcaires atteignant 2 mm d'épaisseur.

Forman et Miller (1984) ont fait l'étude de dépôts de carbonates semblables qu'ils ont retrouvés soudés à la base des sédiments fluvio-glaciaires des plages soulevées de l'extrême ouest de l'archipel de Svalbard au Spitsberg. Ils apparaissent sous la forme d'accumulations de carbonates en pendentifs minces à épais. Selon les auteurs, il est probable que les eaux de sol soient saturées en carbonates et qu'elles subissent dans les profondeurs, une précipitation chimique et/ou biologique sous les éléments grossiers des sédiments.

Des encroûtements sous les cailloux allant jusqu'à 2 cm d'épaisseur et non compris dans un profil de sol, ont aussi été étudiés par Swett (1974) sur l'île d'Ella Ø, ainsi qu'à Albert Heims Bjoerje au Groënland. Ces calcrètes présentent une surface micro-digitée ainsi que des laminations stromatolitiques, que l'auteur attribue à une accréation probablement engendrée par l'activité biologique d'algues. Swett (1974) souligne la contribution possible du pergélisol lorsqu'il décrit les deux mécanismes qui seraient à l'origine de la précipitation de ces dépôts. Dans le premier cas, la présence du pergélisol empêcherait la percolation des eaux de fonte chargées en matériaux dissous dans le sol et la précipitation ferait suite à l'évaporation de ces eaux. Dans le second, le pergélisol serait aussi responsable de la création d'un gradient température/solubilité à l'intérieur de la couche active du sol (d'une profondeur de 1 à 1,5 m) durant la saison chaude. Ce gradient favoriserait la mise en solution du calcaire près du pergélisol, puis la précipitation du carbonate de calcium à la surface du sol.

Bunting et Christensen (1978) présentent des informations additionnelles sur des croûtes calcaires se développant sur la face inférieure des galets, qu'ils ont découvertes dans la portion sud des îles de la Reine Élisabeth. Ils affirment que la micro-morphologie de ces calcins ne présente pas toujours des laminations et qu'ils peuvent donc se développer avec ou sans la présence de colonies d'algues. La reprécipitation de la calcite peut de plus se produire dans des environnements sans pergélisol ou dans une géologie propice à la dissolution. Leurs recherches les ont menés à conclure que ces

dépôts sous les galets s'accumulent durant la saison sèche de l'été vers la fin août, alors que les eaux de fonte des neiges lessivent la surface du sol de ses carbonates et les mobilisent dans les 20 à 30 premiers cm sous la surface. L'intense évaporation de cette eau à la fin de l'été permet la reprécipitation de la calcite sous les galets.

Marlin et Dever (1995) et Marlin *et al.* (1993) ont aussi fait l'étude de dépôts de carbonates secondaires, développés principalement sur la face inférieure des éléments grossiers d'un profil pratiqué dans une terrasse fluvio-glaciaire de la péninsule de Brögger au Spitsberg. Ces encroûtements se présentent sous la forme de placages de couleur grise à brune, d'une épaisseur d'environ 1 mm et d'une morphologie de surface colonnaire. Les auteurs font aussi état de l'importance de la présence du pergélisol dans leur développement. Ils expliquent que le processus de précipitation se réalise en système clos lors du gel des solutions et de la propagation des deux ondes de gel, atmosphère et pergélisol, dans la couche active (« effet mâchoire »). L'eau comprise dans la couche active subit une évaporation en surface ainsi qu'en profondeur (vers 70 cm de la surface), lors de la migration de la vapeur vers les deux fronts froids, à l'intérieur du système clos suivant le mécanisme de cryodessiccation. Au contact des parois froides, la vapeur subit une condensation, puis un regel. Un processus d'exclusion des solutés s'opère lors de la croissance de la glace dans le sol et lors de l'évaporation par cryodessiccation. La teneur en calcite augmente ainsi progressivement dans la solution résiduelle, jusqu'à sa sursaturation et à sa précipitation. Les placages carbonatés sont présents sur l'ensemble du profil. Ceci découle probablement du fait que la profondeur de fermeture du système a pu changer au cours du temps en fonction des variations climatiques et des changements de position du permafrost.

Plusieurs études de l'effet de la végétation sur la dureté de l'eau ont été menées dans des milieux froids, tels que dans une mare d'eau peu profonde formée dans les sols tourbeux du nord-ouest de l'île Somerset (Smith, 1972), dans un bassin localisé sur les rives du fjord Vendom dans le sud-ouest de l'île d'Ellesmere (Woo et Marsh, 1977), ainsi que dans les domaines karstiques localisés dans le sud des montagnes Rocheuses au Canada (Ford, 1971). Ces études montrent un lien entre l'augmentation de la dureté de l'eau et la production de CO₂ dans le sol par des processus biogéniques. On observe en effet qu'une augmentation de la production du CO₂ se produit lorsque la végétation recommence ses activités photosynthétiques et que la décomposition de la matière organique s'intensifie en début de période estivale. Cet apport supplémentaire de CO₂ s'ajoute sous forme dissoute à l'eau du sol. C'est ainsi que la présence de la végétation et donc de la matière

organique, contribue à accélérer la décalcification du calcaire en milieux froids. Woo et Marsh (1977) ont d'ailleurs fait l'observation de croûtes calcaires précipitées sur la surface inférieure des blocs calcaires reposant sur le sol du bassin étudié. Leur étude comparée sur les eaux de sol en milieux carbonatés non recouverts de végétation, ainsi que sur celles des milieux carbonatés recouverts de végétation, montre que ces dernières ont une dureté totale et une concentration en bicarbonates bien plus élevée. Ils affirment aussi que la matière organique contribuerait à la précipitation des carbonates en croûtes laminées.

1.1.2 Les fragments de calcrètes

Dijkmans, Galloway et Mook (1986) ont signalé la présence de fragments de calcrètes dispersés dans les surfaces de déflation retrouvées entre les dunes de sables de Kobuk (contenant des carbonates) situées dans le nord-ouest de l'Alaska. La taille de ces fragments varie de quelques millimètres à quelques décimètres et leur épaisseur est de plus de 5 cm. Leur surface de couleur gris noir, fortement cannelée et alvéolée, indique une sérieuse désagrégation par le vent et les précipitations. Les résultats obtenus, suite à l'analyse de la composition isotopique des calcrètes, indiquent que la diminution de la pression partielle en CO_2 est la principale responsable de la précipitation des carbonates contenus dans les sables. Ils indiquent aussi que le processus d'évaporation de l'eau ne serait pas significatif.

1.1.3 Les placages de calcite secondaire sous-glaciaires

Une autre forme de dépôts de carbonates secondaires bien connue sont les placages de calcite de quelques centimètres d'épaisseur, que l'on retrouve sur la surface de la roche-mère récemment exposée suite au retrait de glaciers dans les zones tempérées. Généralement, ils forment des cannelures allongées, coupées par des rides profondes et parallèles à la direction de la glace. Ces dépôts ont déjà été observés et décrits dans les montagnes Rocheuses par Hallet (1976) et Ford *et al.* (1970), dans les Alpes par Bauer (1961), ainsi que dans la Gatineau par Hillaire-Marcel *et al.* (1979). Ils sont le résultat d'une précipitation chimique se produisant sous la glace, lorsqu'elle se déplace sur la surface rocheuse. Hallet (1976) suggère que la rencontre d'un obstacle par la base du glacier, induit une pression de fonte qui crée un film d'eau très fin, dans lequel les carbonates

provenant de la roche entrent en solution à l'avant de l'obstacle. Ce film d'eau se déplace en même temps que la glace vers l'arrière de l'obstacle, où il regèle en partie suite au relâchement de la pression. Les carbonates sont alors exclus lors du regel, pour être accumulés dans le film d'eau qui subsiste. Ce processus que l'on appelle communément en anglais « regelation process » est répété à mesure que le glacier avance et rencontre de nouveaux obstacles. Les carbonates s'accumulent de plus en plus dans le film d'eau jusqu'à ce que la solution soit sursaturée et qu'il y ait précipitation.

1.1.4 Les dépôts de carbonates secondaires localisés à l'intérieur des fissures de la roche calcaire

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, les calcrètes qui se développent à l'intérieur des fissures des rochers calcaires dans les régions subarctiques, n'ont jusqu'à présent, fait l'objet d'aucune étude approfondie. Seuls Adolphe et Loubière (1987) et Loubières (1987) ont à ce jour été intéressés par la présence de calcins localisés dans les fissures de la roche-mère, ainsi que sur la partie enterrée de cailloux qui proviennent d'une terrasse dominant le lac Centrum au nord-est du Groënland. Les auteurs les ont décrits comme étant des concrétionnements de type « chou-fleur », d'une morphologie assez régulière d'un échantillon à l'autre et présentant des microlaminations. Ils se sont attardés à une description des microstructures, ainsi qu'à une interprétation paléoclimatique des différentes zones à la manière des dendrochronologues. Aucun modèle de genèse n'a été suggéré dans leurs articles. Les auteurs ont cependant remarqué la présence de colonies bactériennes qu'ils ont interprétées comme étant à l'origine de la cristallisation en microlaminations, après avoir réussi à provoquer en laboratoire, le développement de nouveaux voiles bactériens lors de leur mise en culture.

1.2 Problématique

1.2.1 Énoncé du problème et intérêt de l'étude

Ainsi, les différentes recherches réalisées au sujet des dépôts de carbonates secondaires se développant en milieux froids et secs, ont surtout été réalisées à partir de dépôts que l'on retrouve accolés à la surface inférieure des cailloux et des blocs calcaires reposants sur la couche active du sol et à celle de la fraction grossière comprise dans la couche active d'un profil de sédiments fluvio-

glaciaires. Les fragments de calcrètes dispersés sur la surface du sol, les placages carbonatés sous-glaciaires, ainsi que les croûtes localisées dans les fissures de la roche calcaire, sont d'autres formes de dépôts carbonatés assez bien connus.

Nous avons vu dans la section précédente, que si les formes que prennent ces dépôts sont variées, ils ont tous en commun dans leur environnement immédiat, la disponibilité du calcaire et d'eau de façon occasionnelle ou continue. La genèse d'un dépôt carbonaté débute lorsque les éléments entrant dans la constitution des divers carbonates (de calcium, de magnésium, de fer, de sodium ou de dolomie) sont mobilisés dans la phase aqueuse. Dans cet état, tout facteur provoquant le départ d'eau ou de gaz carbonique conduit à la saturation de la solution, puis à une précipitation de carbonate. Nous avons aussi vu que les principaux facteurs qui favorisent ces deux dernières conditions en milieux froids et secs, sont le pergélisol, l'intense évaporation de l'eau durant la saison chaude, l'exclusion des solutés lors du gel des solutions, ainsi que la présence de la végétation. Le pergélisol empêche d'abord la percolation des eaux de fonte qui stagnent dans la couche active pour subir éventuellement une intense évaporation durant la saison sèche et chaude. Il est responsable de l'établissement d'un gradient température/solubilité dans la couche active favorisant la mise en solution du calcaire à son contact et la précipitation en surface (lorsque l'eau est évaporée). Il est aussi la composante principale de « l'effet mâchoire » décrit par Marlin et Dever (1995) et Marlin *et al.* (1993), qui se produit au début de la saison froide lors de la propagation des deux ondes de gel atmosphère et pergélisol. L'exclusion des solutés par gel des solutions est un phénomène actif et directement responsable de la précipitation dans ce dernier processus, ainsi que dans le processus de genèse des croûtes sous-glaciaires. Enfin, la présence de la végétation est un facteur non négligeable, puisqu'il agit de façon indirecte en favorisant un apport supplémentaire de CO₂ dans la phase aqueuse.

Le problème est que peu d'informations sont actuellement disponibles au sujet des facteurs environnementaux responsables de la cristallisation des carbonates secondaires à l'intérieur des fissures de la roche calcaire, soit des calcrètes de fissures, confinées dans le territoire non englacé du Yukon. Pourtant, tous admettent l'importante implication de ce type de concrétion dans l'interprétation des paléoclimats et de l'évolution de la géomorphologie des terrains. L'intérêt de l'étude des calcrètes de fissures réside donc dans le fait qu'elles n'aient pu se développer qu'à l'intérieur des limites d'un territoire spécifique, c'est-à-dire celles du corridor non englacé du Yukon, et qu'elles aient bénéficié des conditions périglaciaires qui régnaient durant toute la période

du Quaternaire. Ce phénomène est rare en Amérique du Nord. La majorité des territoires ayant été recouverts par les glaces du Quaternaire, la plupart des concrétions que l'on observe aujourd'hui à l'extérieur des cavernes, n'ont tout au plus que 10 000 ans.

1.2.2 Objectif

L'objectif de la thèse est de dresser un portrait général de l'expression du temps sur les micro-structures des calcrètes de fissures au cours de leur développement, ainsi que de déterminer quelles sont les conditions environnementales, telles que les conditions d'ensoleillement, de circulation d'eau, d'érosion et de pergélisol, qui ont favorisé leur genèse et leur croissance à partir du dernier interglaciaire jusqu'à aujourd'hui, à l'intérieur des limites du corridor non englacé du Yukon.

Nos observations sur le terrain ont permis de constater que les sites où l'on a répertorié les calcrètes de fissures, démontraient des différences de conditions d'érosion, d'exposition aux radiations solaires, de circulation d'eau, etc. Des observations en laboratoire de plusieurs échantillons à la loupe binoculaire, au microscope pétrographique optique et au microscope à balayage électronique, ont aussi permis de dénombrer plusieurs types de macro et micro-structures. Pour atteindre l'objectif, nous tenterons de déterminer si les différences de conditions environnementales soulignées sur le terrain s'expriment dans les structures des échantillons de calcrètes de fissures. L'observation d'un certain nombre d'échantillons en cathodoluminescence, ainsi que la référence aux travaux d'analyses isotopiques déjà réalisés (Lauriol et Clark, 1998 ; Sabourin, 1997), permettent surtout de comprendre quelles étaient les conditions initiales et favorables à leur développement. Enfin, la référence aux résultats de datations U/Th (Ghaleb, et *al.* 1997) sert à situer les résultats de cette recherche dans un cadre temporel.

1.2.3 Hypothèse de recherche

L'objectif formulé dans la section 1.2.2, permettra de vérifier l'hypothèse de recherche suivante :

« Les différences de conditions environnementales que l'on observe sur le terrain s'expriment dans les structures des échantillons de calcrètes de fissures prélevées dans trois régions localisées dans le territoire non englacé du Yukon, soit la montagne de Bear Cave, le long du Dempster Highway et dans la région de Joe Creek. »

Chapitre 2

CADRE PHYSIQUE

Les échantillons de calcrètes de fissures faisant l'objet de cette thèse ont été prélevés dans vingt et un sites localisés dans trois régions calcaires. Ces régions sont localisées à l'intérieur des limites du territoire non englacé du Yukon : le long du Dempster Highway et sur la montagne de Bear Cave situés dans les Monts Ogilvie, ainsi que dans la région de Joe Creek située dans les Monts British (figure 2.1).

Nous présentons dans ce chapitre une description générale des caractéristiques du territoire non englacé du Yukon, de la géologie des formations calcaires, ainsi que du climat et de la végétation qui prédominent l'ensemble du territoire. Nous terminerons avec la localisation et la description des trois régions échantillonnées dans le cadre de ce travail de recherche.

2.1 Une région épargnée par les glaces du Pléistocène

Le territoire étudié a probablement été sous l'influence de conditions climatiques semblables à celles d'aujourd'hui ou plus sévères au cours du Quaternaire. Le centre et le nord du Yukon ont en effet été épargnés par les glaces Laurentiennes, dont l'avancée maximale vers l'ouest se serait arrêtée aux Monts Richardson (Hughes *et al.* 1989). Avec les régions non englacées de l'Alaska, de l'est de la Sibérie et du « intervening shelf areas » (régions satellites intervenantes), le corridor épargné par les glaces au Yukon constitue la portion orientale de la Béringie (Hopkins, 1967). Il est aussi la plus grande étendue de territoire au Canada, à avoir pu évoluer sous l'influence de conditions périglaciaires durant tout le Pléistocène (Hughes *et al.* 1981). Cette région soulève donc divers intérêts. Elle fut un refuge glaciaire pour bon nombre d'espèces animales et végétales et, ayant été épargnée du passage des glaciers au cours de cette période, la géomorphologie de ses hautes terres a évolué sous l'effet seul des agents atmosphériques (le vent, le gel, la pluie, etc.).

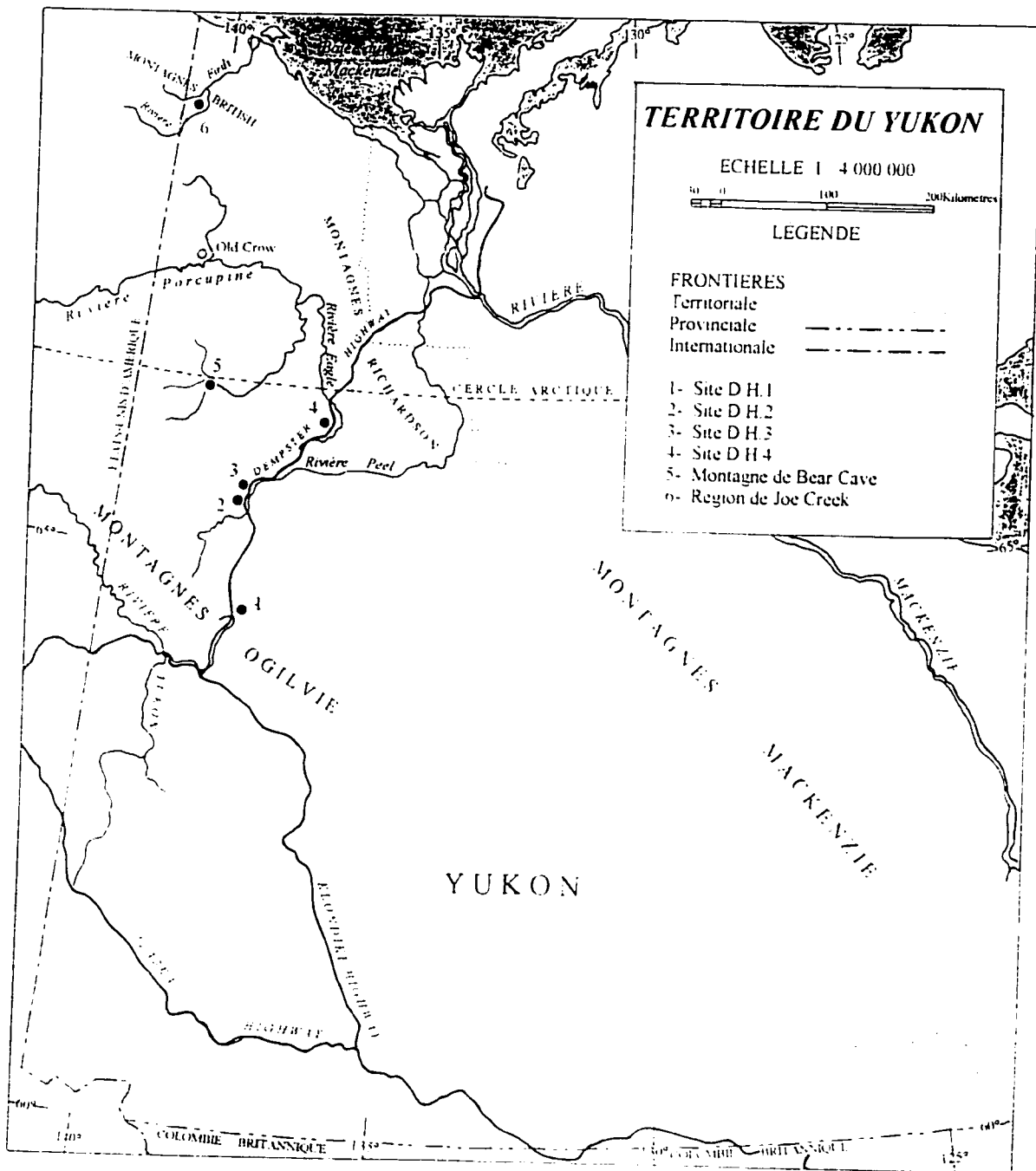


Figure 2.1 : Carte de localisation des trois régions étudiées, ainsi que des quatre sites d'échantillonnage le long du Dempster Highway

Le corridor non englacé du Yukon se caractérise par la diversité du relief de ses terrains, allant des basses terres planes jusqu'à des montagnes aux sommets arrondis ou localement accidentés. Les terrasses de cryoplanation et les tors abondent dans les régions montagneuses. Nous pouvons aussi observer dans les massifs calcaires de nombreuses cavernes riches en spéléothèmes de tous genres et bien développés (Lauriol, Ford and Cinq-Mars, 1997). Les dépôts de surface dominants dans l'ensemble de ces régions, sont des roches altérées et des colluvions sur les versants, des limons organiques et du matériel tourbeux dans les dépressions, ainsi que des sédiments fluviaux le long des grands cours d'eau (Hughes, 1972).

2.2 La géologie des formations calcaires du Yukon

Les formations calcaires du nord du Yukon occupent environ 15 000 km² du territoire et affleurent dans les Monts British, les Monts Richardson et les Monts Ogilvie.

L'orogénèse des Monts British eut lieu lors des déformations engendrées par le soulèvement de Romanzof il y a environ 60 Ma (Gabrielse, 1975). Ces monts forment, avec la chaîne de Brooks et la plate-forme de Beaufort avoisinante, un ensemble de structures disposées selon un arc de grande envergure, visible sur une distance de 400 km dans le nord du Yukon et le nord-ouest du district du Mackenzie (Gabrielse et Yorath, 1991). De façon générale, les Monts British démontrent un alignement nord-ouest et sud-est. Ils sont principalement constitués d'un assemblage de schistes, de quartzites et de calcaires marins (Ritchie, 1984 ; Ortman, 1981), comprenant des dépôts para-autochtones des groupes d'Endicott et de Lisburne, originant du Carbonifère (Richards, Bamber et Utting, 1996).

Les Monts Ogilvie font partie de la zone de plissement de Taïga-Nahoni. Leur déformation s'est produite avec la déflexion d'Ogilvie (Norris, 1972), qui s'est traduite par un changement brutal de la direction des plis et des failles ayant affectés les roches paléozoïques et plus anciennes. Les deux chaînons Taïga et Nahoni forment maintenant un coude dont l'orientation respective est nord-sud et ouest-est (Gabrielse et Yorath, 1991 ; Norris, 1996). Les affleurements calcaires sont fréquents dans les Monts Ogilvie. Ils sont généralement composés de calcaires à grains fins (Morrow et Geldsetzer, 1991 ; Bamber *et al.* 1991) déposés en milieu d'eau peu profonde, et font partie des formations d'Ogilvie (Devonien) dans le nord-ouest, de Gossage (Devonien) dans la partie plus à l'est et de

Jungle Creek (Permien) dans la région ouest (Green et Roddick, 1972 : Ortman, 1982 : Ortman, 1981).

2.3 Le climat

La région est caractérisée par un climat de type continental froid, qui ressemble à celui des autres régions boréales de hautes latitudes au Canada. Les hivers sont particulièrement longs (début d'octobre à fin avril) et froids, puisqu'ils sont dominés par l'air continental arctique sec et très froid (Ritchie, 1984). Les moyennes de températures annuelles enregistrées au village d'Old Crow sont d'environ $-10,5^{\circ}\text{C}$, avec une amplitude annuelle allant de $14,3^{\circ}\text{C}$ en juillet, à $-35,3^{\circ}\text{C}$ en janvier. Le régime des précipitations annuelles est plutôt faible, soit de 250 mm/an, dont la moitié est sous forme de neige (Environnement Canada, 1982). Ceci s'explique par le fait que la région est abritée derrière les Monts St-Élias et la chaîne Côtière, et que les masses d'air froid ont une faible capacité de rétention d'eau (Ryder, 1989). De telles conditions climatiques sont responsables de la présence du pergélisol continu dans le nord du Yukon (à partir de la latitude 67° nord) et discontinu ailleurs au Yukon, ainsi que dans les montagnes du district du Mackenzie (Ryder, 1989). Son épaisseur varie de 50 m tout près de la limite sud du pergélisol continu et discontinu (Ritchie, 1984), jusqu'à 600 m dans les alentours du delta du Mackenzie (Burn, 1994 et Mackay, 1967).

2.4 La végétation

Dans la région qui nous intéresse, c'est-à-dire la région des Monts British et des Monts Ogilvie, les communautés végétales se divisent en trois différents groupes ou zones de végétation suivant la classification de Ritchie (1984). Dans les vallées et les basses terres, le couvert végétal est généralement de type forêt boréale nordique. Il se présente sous la forme d'une forêt continue, le plus souvent dominée par deux espèces d'épinettes (*Picea glauca* et *P. mariana*), qui sont parfois associées au bouleau (*Betula papyrifera*) et/ou au peuplier (*Populus tremuloides* et *P. balsamifera*). Cette forêt boréale nordique prolifère aussi sur la base des versants de montagnes et sur les montagnes à faible élévation. Les versants exposés au sud sont habituellement recouverts d'épinettes blanches (*Picea glauca*), tandis que les versants exposés au nord sont dominés par l'épinette noire (*Picea mariana*) (Ritchie et al. 1982). La limite des arbres près du cercle arctique se

situé à environ 900 m et demeure à moins de 200 m près des Monts British et au nord des Monts Old Crow (Lauriol, Duchesne et Clark, 1995).

Au-delà de cette zone, dans les habitats de hautes montagnes et de sites exposés des hautes terres, où les sols sont composés de matériaux grossiers, tels que les crêtes rocheuses, les éboulis et les sommets rocheux, on retrouve une toundra d'herbes et d'arbustes de montagne, dominée par deux genres importants d'herbacés (*Carex* et *Bouteloua*), ainsi que des arbustes rabougris. Cette toundra de montagne est plutôt discontinue et occupe aussi très souvent la zone de toundra arbustive à bruyères dans les sites où le microclimat est moins favorable. Les trois composantes végétales de la toundra de montagne varient en fonction du type de roche, de l'exposition, ainsi que de l'intensité du phénomène de cryoturbation.

C'est sur les versants intermédiaires du nord du Yukon et des montagnes de forte élévation localisées un peu plus au sud (comme les Brooks Ranges), que l'on retrouve la toundra arbustive à bruyères des hautes terres. Cette communauté végétale est généralement continue et dominée par des genres appartenant à la famille des bruyères (*Vaccinium*, *Ledum*, *Arctostaphylos*, etc.), par le bouleau nain (*Betula glandulosa*) et des espèces rabougries de saules.

2.5 Localisation et description des trois régions à l'étude

Avant de faire la description des massifs calcaires des trois régions étudiées, précisons que le terme « tor » sera souvent utilisé dans cette thèse, non pas pour sa signification génétique, mais pour son utilité descriptive. Les formes rocheuses que nous appelons tors, ne sont effectivement pas de vrais tors, puisque le processus responsable de leur apparition sur les versants des montagnes calcaires du Yukon, n'est pas le même que celui qui caractérise habituellement la genèse des tors. Cependant, ces rochers qui se dressent sur les versants et les sommets des montagnes étudiées, ont une forme qui rappelle beaucoup celle des tors.

2.5.1 La montagne de Bear Cave

Le massif de Bear Cave fait partie des Monts Keele, localisés plus précisément dans le nord des Monts Ogilvie. Il s'élève à environ 500 m du fond des vallées avoisinantes (980 m du niveau marin) et s'étend sur une longueur de 5 km par 4 km de large. Comme la plupart des massifs faisant partie des Monts Keele, il se caractérise par un sommet formant un large plateau, par la morphologie arrondie de ses versants et par de vastes vallées où prolifère la forêt boréale (figure 2.2). Il est longé au pied de son versant sud-ouest, puis contourné à l'ouest par la rivière Fishing Branch. Cette rivière étant un facteur d'érosion majeur, le versant sud-ouest est beaucoup plus abrupt que le versant opposé. La végétation est plutôt sporadique dans les 200 derniers mètres (figure 2.3) et entrecoupée par des talus d'érosion qui s'étendent au pied des tors et des falaises. Sur ce versant nous pouvons observer quelques porches de cavernes riches en spéléothèmes, des tors et quelques falaises dont les fissures sont pratiquement toutes remplies de calcrètes de fissures. Les échantillons proviennent de seize sites situés dans la partie la plus élevée (environ les 80 derniers mètres) de ce versant.

2.5.2 Les calcaires du Dempster Highway

Les calcaires qui affleurent le long du Dempster Highway ont fait l'objet de quatre échantillonnages entre Dawson et Eagle Plains :

- Site D.H. 1, situé à environ 6 km de la North Fork Pass, tout près de la rivière Blackstone Est.
- Site D.H. 2, tout près de l'emplacement où le Engineer Creek passe de l'est à l'ouest sous le Dempster Highway.
- Site D.H. 3, situé à environ 30 km au Nord du passage de la rivière Ogilvie sous le Dempster Highway.
- Site D.H. 4, situé à environ 25 km au sud d'Eagle Plains.

Les affleurements calcaires sont relativement fréquents tout le long du Dempster Highway, surtout à partir du site D.H. 1 jusqu'au site D.H. 3. Leur morphologie aux versants arrondis et les larges vallées recouvertes de végétation rappellent le massif de Bear Cave. Cependant, les tors sont localisés à des altitudes beaucoup moins élevées, soit entre 50 et 150 m de la base des versants et dans la majorité des cas, la végétation prolifère jusqu'à environ 250 m au-dessus de la vallée. Au-



Figure 2.2 : Le versant sud de la montagne de Bear Cave haute de 500 m à partir du fond de la vallée, dans laquelle on peut apercevoir la rivière Fishing Branch. On observe dans sa partie basse une forêt boréale bien développée, qui devient de plus en plus sporadique vers les 400 m d'altitude. Les porches de cavernes riches en spéléothèmes, les tors et quelques falaises dont les fissures sont pratiquement toutes remplies de calcrètes de fissures, sont localisés dans les 80 derniers mètres environ de sa partie haute

delà de cette zone, l'érosion des tors est très active, c'est pourquoi la plupart des sommets sont dépourvus de végétation et recouverts de cailloux et de blocs calcaires. Lors de notre échantillonnage, nous avons observé que les calcrètes de fissures étaient très rares ou même absentes dans les fissures de la roche calcaire émergeant de cette zone qui n'est pas recouverte de végétation.

2.5.3 La région de Joe Creek

La région de Joe Creek est dominée par un ensemble de montagnes situées dans les Monts British (figure 2.4) dont le relief varie entre 500 et 750 m, avec quelques sommets pouvant atteindre une altitude de 1800 m (Ritchie, 1984). Leur morphologie varie beaucoup : elle est caractérisée par des versants où l'on observe des surfaces de colluvions inclinées, des rochers d'érosion escarpés, de longues arêtes de roches et des tors. Ces versants sont entrecoupés par des vallées tantôt étroites, dépourvues de végétation, et dans lesquelles s'écoulent des ruisseaux dont les lits sont faits de graviers, ou par de larges vallées recouvertes de végétation. Les calcrètes de fissures n'ont été découvertes qu'à l'intérieur des fissures des tors émergeant des versants qui longent les vallées où la végétation prolifère (Lauriol, Clark, Hillaire-Marcel, et Ghaleb, 1996).



Figure 2.3 : Les tors qui se dressent dans les 200 derniers mètres de la partie haute du versant sud de la montagne de Bear Cave, sont entourés d'une végétation sporadique et sont longés à leur pied, par des talus d'érosion.



Figure 2.4 : Partie haute d'un des versants de montagne faisant partie des formations calcaires de la région de Joe Creek, sur lequel se dressent des tors. La végétation est pratiquement inexistante vers les sommets de ces montagnes et l'érosion très active. Contrairement à la montagne de Bear Cave, les calcrètes de fissures ne se retrouvent pas dans les fissures des tors qui émergent de la partie haute des montagnes de cette région. On les observe plutôt dans les fissures des tors de la zone de faible altitude sur les versants sud qui longent des vallées recouvertes de végétation et où l'érosion est moins active.

Chapitre 3

MÉTHODE ET TECHNIQUES

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode et les différentes techniques exploitées lors des travaux d'échantillonnage et de laboratoire. Nous élaborons aussi sur l'application associée à chacune des techniques dans la recherche d'une réponse à l'hypothèse posée au chapitre premier de la thèse.

3.1 Travaux sur le terrain

3.1.1 Plan de travail

L'échantillonnage des calcrètes de fissures a été fait dans le but de recueillir une quantité appréciable d'échantillons provenant de différents contextes environnementaux. Pour ce faire, trois régions localisées à différentes latitudes ont été sélectionnées, puis échantillonnées au cours des étés 1994, 1995 et 1996.

3.1.1.a Premier échantillonnage

Le premier échantillonnage a été effectué dans la région de Joe Creek par Bernard Lauriol et Ian D. Clark durant l'été 1994. Cette première phase d'échantillonnage avait pour but de faire des prélèvements de quelques échantillons, ainsi que des observations préliminaires sur l'environnement dans lequel les calcrètes de fissures avaient été découvertes. Ces observations ont permis d'établir une tactique d'échantillonnage pour les deux étés qui allaient suivre.

3.1.1.b Deuxième échantillonnage

Au cours de la seconde phase d'échantillonnage (été 1995), nous avons pour objectif d'étudier les calcrètes de fissures à différentes élévations sur le versant sud de la montagne de Bear Cave. Comme le montre la figure 3.1, nous avons fait l'étude de tors se trouvant sur le sommet de la

montagne, de la base de grandes crêtes ou falaises localisées à l'extrémité supérieure du versant, de l'entrée de cavernes ou de porches, ainsi que de tors situés sur le versant. Différents sites appartenant à l'une ou l'autre de ces catégories ont été sélectionnés et ont fait l'objet d'échantillonnage (tableau 3.1).

3.1.1.c Troisième échantillonnage

Au cours de l'été 1996, nous sommes retournés faire des prélèvements sur la montagne de Bear Cave. Ceci a permis d'ajouter quatre sites supplémentaires et de faire des observations sur des calcrètes découvertes sur la surface inférieure de dalles exposées et enfouies sous une trentaine de centimètres dans le sol (tableau 3.1). Un échantillonnage de quatre autres sites, les sites D.H.1, D.H.2, D.H.3 et D.H.4 illustrés sur la carte de la figure 2.1, localisés dans les formations calcaires qui longent le Dempster Highway, ont aussi été sélectionnés et échantillonnés durant ce même été. Nous avons fait ce dernier travail de terrain en fonction de deux objectifs : 1) observer si les calcrètes étaient présentes dans les fissures de la roche calcaire localisée à l'extérieur des limites du corridor non englacé du Yukon et 2) prélever des calcrètes sur une distance nord-sud d'environ 500 Km.

SITUATION SUR LE VERSANT	Tors de sommet de montagne	Base de crêtes et de falaises	Dalles et roches enfouies	Cavernes ou porches	Tors de versant
SITES ÉCHANTILLONNÉS	T.S.T., 1995 S.V.B., 1995 S.V.D., 1995	S.V.A., 1995 S.V., 1996 G.F.S., 1995	C., 1996	B.C., 1994 B.C., 1995 S., 1996 C.A., 1996	TOR#1, 1995 F.M., 1995 F.M., 1996 B.E., 1995 T.P.M., 1995

Tableau 3.1 : Classification des sites d'échantillonnage de la montagne de Bear Cave selon leur situation sur le versant sud.

3.1.2 Prélèvement des échantillons

Les calcrètes ont été retirées du socle rocheux à l'aide d'un pied de biche ou d'une masse. Étant donné la fragilité de ce type de croûte carbonatée, chaque échantillon a été prélevé avec le bout de roche sur lequel il s'est développé. Soulignons cependant, que les échantillons en mauvais état ou trop minces sont sous représentés dans notre collection. Nous avons en effet ramené au laboratoire

des échantillons sélectionnés en fonction de leur qualité pour d'éventuelles datations U/Th, coupes en lames minces et analyses isotopiques.

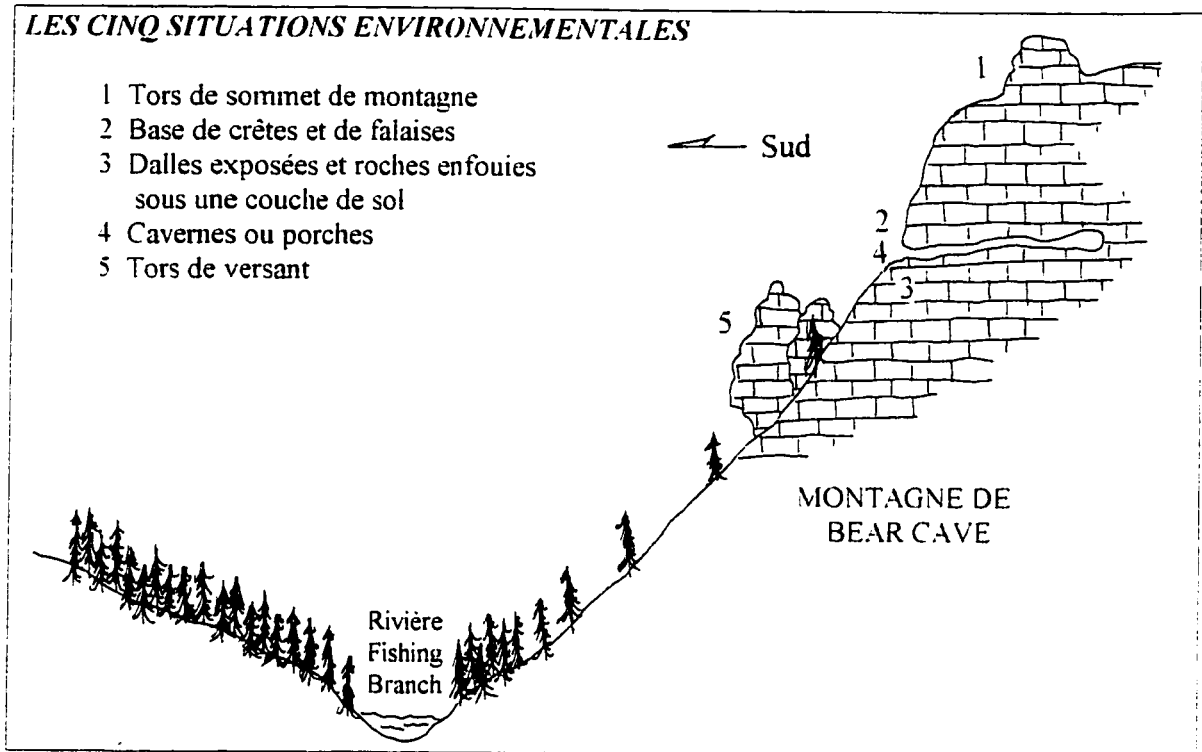


Figure 3.1 : Profil de la montagne de Bear Cave illustrant les cinq situations environnementales étudiées sur le versant sud. Afin de représenter chacune des composantes du profil, l'échelle n'a pas été respectée.

3.1.3 Observations des caractéristiques environnementales des sites étudiés

Les sites échantillonnés ont fait l'objet d'observations qualitatives concernant :

- 1) la localisation sur le versant
- 2) le degré de fissuration de la roche (très fissurée, friable ou massive)
- 3) l'abondance de la végétation dans l'environnement immédiat
- 4) l'abondance des calcrètes selon l'orientation de la face rocheuse
- 5) l'état de fraîcheur apparente des calcrètes
- 6) la disposition des calcrètes à l'intérieur des fissures
- 7) l'épaisseur générale des calcrètes
- 8) l'ouverture des fissures par rapport à l'épaisseur des calcrètes (fissures ouvertes ou fermées)
- 9) l'humidité générale des fissures de la roche

Des mesures de la température à l'intérieur des fissures de la roche ont été prises dans quelques sites localisés sur la montagne de Bear Cave durant l'été 1995.

3.2 Travaux en laboratoire

3.2.1 Macroscopie

L'observation des échantillons à l'aide d'une loupe binoculaire de type Stereo Zoom[®] 4 de Bausch & Lomb à un grossissement variant entre 10,5X à 45X, a servi à faire l'identification et la classification des structures à l'échelle macroscopique. Afin que ce travail d'observation soit fait de façon méthodique, la description qualitative et quantitative de chaque échantillon a été conduite par la fiche signalétique 1. L'identification des macro-structures, leur organisation, leur taille et leur orientation par rapport à la surface rocheuse ont donc été notées, en plus de l'épaisseur de la calcrète, sa couleur, sa densité et sa fraîcheur apparente. Ce premier travail de laboratoire ne nécessite aucune préparation particulière des échantillons.

3.2.2 Pétrographie

3.2.2.a Application

Tous les échantillons de calcrètes de fissures ont été longuement observés à l'aide d'un microscope pétrographique optique de type Nikon HFX-DX, à des grossissements de 100X, 200X et 400X. Ce travail d'observation consiste à faire l'identification, ainsi que la description qualitative et quantitative des différentes caractéristiques pétrographiques présentes dans les calcrètes de fissures. Tous les échantillons de calcrètes observés ont donc été identifiés et décrits à l'aide de la fiche signalétique 2. Cette fiche comprend l'identification de l'échantillon et de chacune des principales fabriques qui le compose. Elle comprend aussi la taille des principales fabriques ainsi que la description des textures, des composantes détritiques et de la porosité.

- Fiche signalétique 1 -

Observations à la loupe binoculaire

Échantillon no. :

Morphologie d'ensemble

Structures individuelles

- taille (cm)

- orientation

Épaisseur(cm)

Couleur

Densité

Fraicheur apparente

Commentaires : Schéma général :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

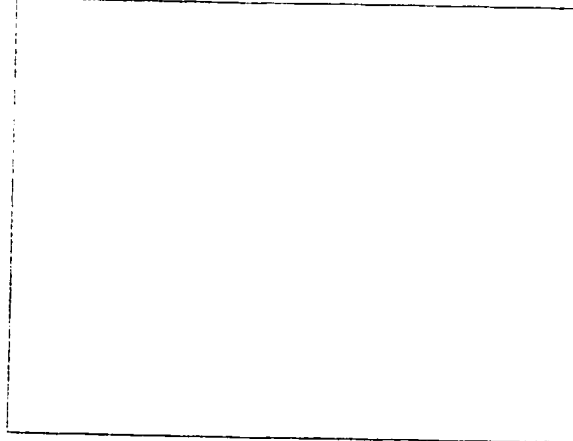
.....

.....

.....

.....

.....



Observations au microscope pétrographique optique

Identification de chacune des fabriques observées :

Pour chacune des fabriques identifiées :

-composantes détritiques : (cm)

..... (cm)
..... (cm)

.....(cm)

.....(cm)

- texture(s) :

.....

.....

- porosité :

.....

.....

Commentaires :

Schéma général :

3.2.2.b Préparation des échantillons

Les échantillons ont été montés sur lames minces par le technicien Georges Mrazek au département des sciences de la terre de l'Université d'Ottawa. Étant donné la nature poreuse, friable et donc fragile des calcrètes, le technicien les a plongées dans une résine d'époxie préalablement liquéfiée par chauffage, puis, les a laissées refroidir pour obtenir le durcissement. Chaque échantillon ainsi solidifié par la résine, a été taillé à l'aide d'une scie à diamant afin d'obtenir une fine lamelle polie d'environ 30 µm d'épaisseur. Ces lamelles ont ensuite été montées sur lames de verre, puis recouvertes d'une lamelle de verre très mince.

3.2.3 Microscopie électronique

3.2.3.a Application

Comme mentionné au chapitre premier de ce travail de recherche, certains auteurs attribuent la précipitation des carbonates secondaires en laminations, à des processus découlant de l'activité biologique d'algues microscopiques ou de cyanobactéries (Swett, 1974 ; Bunting et Christensen, 1978 ; Adolphe et Loubière, 1987 et Loubière, 1987). L'observation au microscope à balayage électronique a donc été utilisée dans le but de vérifier la présence ou l'absence de restes de micro-organismes fossiles, tels que des bactéries, des cyanobactéries ou des champignons emprisonnés dans les échantillons de calcrètes. Ce travail a été accompli au laboratoire de microscopie électronique CURFEM de l'Université Carleton à Ottawa.

Parmi les 52 échantillons étudiés, nous en avons sélectionnés 19 pour l'application de cette technique. Deux critères de sélection ont guidé le choix des échantillons. Nous voulions pouvoir 1) observer des échantillons provenant de tous les sites étudiés et 2) observer les échantillons les mieux préservés de chacun des sites.

L'identification du genre et de l'espèce d'un micro-organisme nécessite de découvrir la combinaison de caractéristiques qui le définit et qui n'est pas celle d'aucun autre. Il est par la suite possible de consulter des systèmes d'identification disponibles sous forme de clés ou de tables, dans lesquelles on trouve les caractéristiques d'identification arrangées selon une structure logique. Ces caractéristiques peuvent par exemple être la morphologie de la cellule, sa réaction à différents colorants ou à la fermentation au sucre (Pelczar, Chan et Krieg, 1986). Dans la majorité des cas,

l'obtention de ces caractéristiques implique de faire des expérimentations simples, mais sur des colonies de cellules vivantes. Si l'on vérifie la présence de micro-organismes emprisonnés dans la calcite des échantillons de calcrètes de fissures, il est pratiquement assuré que ces derniers sont calcifiés et donc non vivants. Dans ce cas, l'identification des micro-organismes à un tel niveau de précision est impossible. Elle se limite à la classification des colonies selon leurs principales caractéristiques morphologiques, c'est-à-dire la forme et l'arrangement des cellules.

3.2.3.b Préparation des échantillons

L'utilisation du microscope à balayage électronique sert à faire l'observation de micro-organismes emprisonnés à l'intérieur des croûtes carbonatées, c'est-à-dire ceux qui seraient contemporains à la genèse des calcrètes. Les échantillons ont donc été préparés de façon à éviter toute contamination subséquente. Pour ce faire, nous avons suivi la procédure de préparation de roches poreuses décrite par Trewin (1988).

Un fragment d'environ 1cm x 1cm de chaque échantillon a d'abord été brisé, pour l'obtention d'une surface brute et non polie. Cette manipulation est délicate, puisque la surface brisée ainsi obtenue doit, dans la mesure du possible, être représentative de la séquence complète des macro-structures de la croûte. Nous avons par la suite submergé les fragments dans de l'eau distillée pendant une période de 5 à 6 heures, afin de les nettoyer. Une fois séchés, ils ont été fixés sur des lamelles de métal à l'aide d'une mince couche d'un ciment de carbone conducteur de type Leit-C, de façon à pouvoir observer la surface brute et non polie. Une fois bien fixés, une couche épaisse du même ciment de carbone conducteur a été appliquée sur le pourtour des fragments. Cette dernière manipulation sert à réduire les charges émises par l'échantillon dans le faisceau d'électrons du microscope et permet une meilleure résolution d'image. Après une période de séchage sous la hotte de 24 heures, les échantillons ont été enduits d'une mince couche d'or à l'aide d'un « sputter coater » au laboratoire de microscopie électronique. La couche d'or sert à réduire, elle aussi, le nombre de charges émises dans le faisceau d'électrons du microscope.

3.2.4 Cathodoluminescence (CL)

3.2.4.a Application

Par définition, la luminescence est l'émission de lumière à partir d'un solide excité par une forme

quelconque d'énergie. Dans le cas précis de la cathodoluminescence, la lumière émise résulte de l'excitation causée par le bombardement d'un faisceau d'électrons et provient de ce que l'on appelle les centres de luminescence (Miller, 1988). Dans la nature, très peu de minéraux sont parfaits. Ces centres de luminescence sont les imperfections qui s'accumulent dans la matrice du cristal ou dans sa composition lors de la croissance normale du minéral.

L'utilisation de cette technique pour l'étude des calcrètes de fissures est utile à deux niveaux. Elle permet d'abord de faire des observations que le microscope pétrographique optique ne permet pas. Elle sert par exemple à distinguer et identifier certains minéraux ayant des propriétés optiques similaires ou étant de très petite taille. On l'utilise aussi pour visualiser certaines caractéristiques texturales des fabriques, ainsi que des phénomènes à très petite échelle. Elle sert enfin à distinguer les grains détritiques originaux des grains authigènes (ciments et grains de remplacement).

La cathodoluminescence permet en second lieu, de faire une étude stratigraphique des ciments de calcite et donc d'obtenir une reconstitution de l'histoire géochimique et diagénétique des carbonates. Les ciments de calcite qui remplissent les pores présentent en effet des zones de croissance concentriques et luminescentes, de couleurs et d'intensités variables. L'intensité de la luminescence ainsi que la couleur observée, varient en fonction de la composition en ions de substitution du Ca^{2+} dans la mosaïque des cristaux de calcite. Les ions Mn^{2+} et Fe^{2+} tendent à précipiter comme ions de substitution du Ca^{2+} dans la calcite et la proportion de chacun est contrôlée par le potentiel d'oxydoréduction de leur environnement chimique (McLane, 1995). L'ion Mn^{2+} est le principal activateur de CL et l'ion Fe^{2+} est le principal inhibiteur de CL. Les ciments de calcite sont fortement luminescents s'ils sont composés d'une grande proportion en Mn^{2+} , tandis qu'ils sont non luminescents lorsque l'ion Mn^{2+} est absent du minéral. La présence du Fe^{2+} combinée à celle du Mn^{2+} donne une luminescence que l'on dit terne ou « dull » (en anglais) et de couleur orange à brune selon le degré d'action du Fe^{2+} sur le Mn^{2+} . Une inhibition complète de la luminescence par le Fe^{2+} donne une luminescence noire qui peut facilement être confondue à l'absence de luminescence.

L'étude de la cathodoluminescence des calcrètes de fissures a été réalisée sur un échantillon à l'aide d'un microscope pétrographique optique équipé d'un générateur de faisceaux d'électrons. Nous avons sélectionné cet échantillon pour ses fabriques bien développées et d'une grande variété, ainsi que pour ses composantes cristallines altérées.

3.2.4.b Préparation de l'échantillon

Étant donné la difficulté que représente l'étape de la coupe des calcrètes de fissures en fines lamelles, l'échantillon utilisé dans l'application de cette technique a été sélectionné parmi les 52 déjà coupés et montés sur lames minces. Nous n'avons eu qu'à retirer la fine lamelle de verre qui la recouvrait par chauffage et à polir sa surface pour optimiser la résolution optique. Afin de réduire au maximum les anomalies de luminescence, l'échantillon n'a finalement pas été recouvert à nouveau d'une fine lamelle de verre (Miller, 1988).

3.2.5 Isotopes stables

L'analyse de profils d'isotopes stables ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$) pratiqués sur une série d'échantillons de calcrètes de fissures, a déjà été produite par Lauriol et Clark (1998), et Sabourin (1997) au département des sciences de la terre de l'Université d'Ottawa. Dans ce travail de recherche, nous référons aux résultats de ces analyses, qui renseignent sur les conditions de température, d'évaporation et d'hydrologie souterraine ayant prévalu au moment de la genèse des croûtes.

3.2.6 Datations $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$

Six échantillons de calcrètes de fissures ont été datés selon la méthode de datations $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ par Ghaleb et Hillaire-Marcel du GEOTOP de l'Université du Québec à Montréal (Ghaleb, et al., 1997). Les résultats de ces datations sont utilisés à titre de référence pour donner un cadre chronologique à nos travaux de recherche.

Conclusion

La méthode et les techniques employées dans la thèse ont été sélectionnées dans le but de vérifier l'hypothèse posée au chapitre premier. Ainsi, les travaux d'échantillonnage ont été effectués sur vingt et un sites localisés dans trois régions calcaires du Yukon non englacé et formant entre eux un transect nord/sud de près de 1000 kilomètres. Ceci a permis d'obtenir une grande quantité d'échantillons de calcrètes de fissures provenant de sites qui présentent des différences de conditions environnementales, telles que de circulation d'eau, d'exposition aux radiations solaires et de degré de fissuration de la roche, de pergélisol, ainsi que d'abondance de végétation.

L'étude macroscopique et microscopique des calcrètes de fissures sert d'abord à faire une identification et une classification détaillée de leurs composantes physiques et biologiques. L'analyse de ces résultats permet aussi de comprendre les mécanismes associés à la naissance des calcrètes dans les fissures de la roche, de rendre compte de la vitesse de précipitation, de déterminer s'il est possible la nature et la provenance des grains détritiques, ainsi que de comprendre comment se manifestent les phénomènes d'altération à travers l'évolution sédimentaire des croûtes. L'observation des échantillons en cathodoluminescence permet de compléter les données accumulées lors de l'analyse pétrographique et de comprendre quelle a été l'influence exercée par l'environnement chimique sur les calcrètes à travers le temps. Les résultats d'analyse des isotopes stables sont une référence qui renseigne sur les conditions climatiques (température, précipitation et évaporation) et hydrogéologiques qui prévalaient au moment de la cristallisation. Par ailleurs, les résultats de datations U/Th établissent un cadre chronologique aux analyses.

Chapitre 4

RÉSULTATS

Nos connaissances des conditions spécifiques qui permettent le développement des calcrètes de fissures ne sont pas encore complètes. Nous verrons cependant dans ce chapitre, que les travaux d'échantillonnage réalisés dans trois régions calcaires du Yukon, permettent d'accumuler des informations importantes, au sujet du développement des calcrètes de fissures et des conditions environnementales actuelles qui agissent sur leur évolution. Les travaux de laboratoire montrent surtout comment les pressions exercées par le milieu se sont manifestées sur les calcrètes de fissures à travers le temps.

4.1 Observations sur le terrain et évidences macroscopiques

Les calcrètes de fissures sont ces accumulations de carbonates secondaires observées localement dans les fissures de la roche des formations calcaires du Yukon. Leur existence dans la nature est rare et leur cristallisation est associée à un environnement karstique, localisé dans les régions périglaciaires arctiques. Comme il a déjà été mentionné dans la section 1.1.4 du chapitre premier, des dépôts de carbonates secondaires semblables et se développant dans les fissures de la roche-mère, n'ont en effet été signalés qu'au Groënland par Adolphe et Loubière (1987) et Loubière (1987). Ces auteurs ne font pas mention dans leurs travaux de l'abondance de ce type de calcrètes dans la roche de la terrasse où ils les ont découvertes. Mais après avoir visité des terrains calcaires sur une distance de près de 1000 km à travers le Yukon, nous sommes en mesure d'affirmer qu'elles peuvent être très abondantes lorsque les conditions le permettent. Cependant, nos observations à travers ce large territoire nous ont aussi appris que leur abondance pouvait être très inégale d'un site à l'autre. Dans la section qui suit, nous verrons quels sont les résultats de ces observations pour chacun des sites échantillonnés dans les trois régions calcaires visitées. Le tableau 4.1 résume les différentes caractéristiques concernant le degré de fissuration de la roche-mère, l'abondance des fissures dans la roche, ainsi que l'abondance, l'état et l'apparence générale des calcrètes de fissures observées à chacun des sites échantillonnés.

Mais avant de passer en revue les résultats d'observations de terrain de chacun des sites et afin d'éviter trop de répétition, voyons d'abord les caractéristiques qui s'observent systématiquement, d'un site à l'autre. Dans tous les sites visités, les calcrètes sont localisées à l'intérieur des fissures de la roche calcaire. La fissure comprend une surface de croissance sur laquelle la calcrète est accolée et une surface opposée à la calcrète. La surface de croissance est toujours localisée sur le bloc de calcaire qui se détache facilement du socle à l'aide d'un pied de biche ou à la main, tandis que la surface opposée est toujours sur la roche qui demeure accrochée au socle. Ainsi, si l'on détache un bloc de calcaire d'un socle rocheux, la calcrète demeure accolée à ce bloc. Dans tous les sites, la surface opposée à la calcrète est marquée de l'empreinte du relief de surface (figure 1.2) de cette calcrète. Enfin, les calcrètes de fissures sont généralement d'une couleur voisine à celle de la roche sur laquelle elles se sont développées, soit de différents tons de gris, gris jaunâtre et parfois même noirs.

4.1.1 La Montagne de Bear Cave

Parmi les trois régions visitées, la montagne de Bear Cave est celle qui a été la plus étudiée. En effet, plus de la moitié de notre collection d'échantillons proviennent de différents sites localisés sur cette montagne. De façon générale elles y sont très abondantes, cependant les dépôts de calcite secondaire ne s'observent que dans les fissures de la roche qui affleure sur le versant sud du massif. Tous les sites échantillonnés sont donc localisés dans la partie haute de cette façade et comme nous l'avons expliqué dans la section 3.1.1 du chapitre 3, nous les avons divisés en cinq catégories selon leur situation sur le versant (figure 3.1 et tableau 3.1).

4.1.1.a Tors localisés sur le sommet de la montagne

Cette première catégorie comprend les trois sites suivants : **T.S.T.1995**, **S.V.-B1995** et **S.V.-D1995**. Chacun de ces sites est en fait un tor qui se dresse sur le sommet de la montagne et dont nous avons prélevé des échantillons à partir des façades nord-est. La roche des trois sites est généralement très fissurée et sèche. Ainsi, les blocs de calcaires se détachent sans effort du socle rocheux, mais les calcrètes de fissures sont rares malgré l'abondance des fissures. La plupart des croûtes sont très abimées et n'atteignent pas plus de 5 mm. Certaines d'entre elles sont même recouvertes de lichens.

MONTAGNE DE BEAR CAVE		Caractéristiques macroscopiques des sites d'échantillonnage classifiés selon leur situation sur le versant sud de la montagne de Bear Cave		
SITUATION	SITES	ROCHE HÔTE	FISSURES	CALCRÈTES
Tors de sommet montagne	T S T 95 S V B 95 S V C 95	Les blocs se détachent facilement	Abondantes Sèches	Rares Généralement détériorées Épaisseur maximale de 5 mm Certaines sont recouvertes de lichens
Base de crêtes et de grandes falaises	S V A 95 S V 96	Les blocs se détachent facilement	Abondantes Humides Fermées Verticales et horizontales	Très abondantes (dans toutes les fissures) Très bon état de conservation Épaisseur moyenne de 0,5 cm Croissance du haut vers le bas
	G F S 96	Généralement dure	Peu abondantes Ouvrées	Rares Forment souvent un relief de surface en forme de boudins
Surface inférieures de dalles exposées	C 96	Les blocs se détachent facilement	Abondantes Humides	Très abondantes (dans presque toutes les fissures) Très bon état de conservation Croûtes très denses Souvent recouvertes de mousse verte ou rose
Surfaces inférieures de dalles enfouies		Enfouie sous 30 cm de terre et débris calcaires Les blocs se détachent facilement	Abondantes Humides	Abondantes (pas présentes systématiquement) Très bon état de conservation Croûtes très denses Souvent recouvertes de mousse verte ou rose
Entrées de cavernes	B.C 94/95 S 96 C.A. 96	Massive Semble avoir subi érosion active	Peu abondantes	Peu abondantes Souvent détériorées
Tors de versant	TOR#1 95	A 2 m du sol, côtés sud-ouest et sud-est		
		Les blocs se détachent facilement	Abondantes Ouvrées et sèches en surface ou Fermées et humides côté sud et sud-est. Souvent fermées et humides côté sud-ouest. Toujours fermées et humides plus en profondeur	Généralement abondantes Ont des traces de détérioration (si la fissure est ouverte) Très bon état de conservation (si la fissure est fermée) Plus abondantes et meilleur état côté sud-ouest
		A 2 m du sol, côté nord		
		Massive	Rares Souvent ouvées	Peu abondantes Généralement détériorées
	Bases enterrées, côtés sud-est sud-ouest			
	Les blocs se détachent facilement	Abondantes Humides Fermées	Très abondantes Aucune détérioration Faible épaisseur (maximum de 1 mm) Souvent recouvertes d'une mousse verte ou rose	
	F M 95 F M 96	Massive	Abondance moyenne	Abondantes par rapport au nombre de fissure Généralement très épaisses (maximum de 3 cm) Forment souvent relief en forme de boudins
	B.E 95	Les blocs se détachent facilement	Abondance moyenne	Plus abondantes et plus épaisses sur la façade ouest que la façade est
	T.P.M. 95	Plutôt dure	Abondance moyenne	Surtout localisées sur les façades sud-ouest
Caractéristiques macroscopiques des sites d'échantillonnage des régions du Dempster Highway et de Joe Creek				
RÉGIONS	SITES	ROCHE HÔTE	FISSURES	CALCRÈTES
Dempster Highway	D.H.1	Massive	Rares	Rares Faible épaisseur (moyenne de 2 mm) Généralement détériorées
	D.H.2	Moins massive qu'au site D.H.1	Peu abondantes	Rares Faible épaisseur (entre 2 et 5 mm) Souvent détériorées
	D.H.3	Les blocs se détachent facilement Présence de microlapiès	Abondance moyenne	Abondance moyenne Faible épaisseur (moyenne de 5 mm) Souvent en bon état de conservation
	D.H.4	Les blocs se détachent facilement Présence de microlapiès	Abondantes	Abondantes Épaisseur très variable (maximum de 1 cm) Souvent en bon état de conservation
Joe Creek	J.C. 94	Érosion très active de la roche	Peu abondantes	Rares Présentes surtout dans partie basse des versants, où il y a de la végétation

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques macroscopiques relevées lors des travaux de terrain dans chacun des sites étudiés. Elles concernent la dureté générale de la roche hôte, l'abondance des fissures dans la roche, ainsi que l'abondance, l'état et l'apparence générale des calcrètes de fissures observées.

4.1.1.b Base de crêtes et de grandes falaises localisées sur le sommet de la montagne

Cette seconde catégorie comprend les sites **S.V.-A1995**, **S.V.-11996** et **G.F.S.1995**. Les deux premiers forment deux murs d'environ trois mètres de haut et dont l'extrémité supérieure se termine au sommet du versant. Le calcaire de ces murs est quadrillé d'abondantes fissures fermées pour la plupart, qui s'allongent dans les sens horizontal et vertical. Les fissures horizontales sont très riches en calcrètes, qui se sont toutes développées à partir de la surface supérieure (du haut vers le bas dans la fissure). De façon générale, les calcrètes de fissures de ces deux sites sont en très bon état et sont pratiquement toutes composées en surface, de délicates colonnettes densément accolées les unes aux autres. De plus, lorsque l'on retire des blocs de ces murs, on remarque que la roche est humide à l'intérieur des fissures.

Le site **G.F.S.1995** est une grande falaise d'exposition sud-ouest qui s'élève sur une trentaine de mètres au sommet du versant. Pour des raisons pratiques, l'échantillonnage n'a été effectué que dans la partie basse de cette falaise, c'est-à-dire dans les deux premiers mètres à partir du sol. La roche est plus massive que celle des deux sites précédents, les fissures sont peu abondantes et plus larges. Dans ces rares fissures, peu de calcrètes se sont développées. Nous avons aussi remarqué que beaucoup d'entre elles formaient en surface des genres de boudins alignés de façon parallèle à la paroi de la falaise.

4.1.1.c Dalles exposées et roches enfouies sous le sol

Seul le site **C.1996** fait partie de cette catégorie. C'est un replat rocheux qui affleure sur le versant sud à une dizaine de mètres environ du sommet de la montagne. Ce replat s'allonge sur près de 15 mètres à partir du versant et s'étend sur une largeur de plus de 20 mètres. À quelques endroits, il est recouvert d'une couche de terre noire/brune mélangée à des débris calcaires d'une épaisseur moyenne de 30 cm. Les calcrètes de fissures ont été échantillonnées au hasard sur toute sa surface. Nous les avons découvertes accolées à la surface inférieure de pratiquement toutes les dalles de calcaire soulevées, un peu par curiosité, à l'aide d'un pied de biche. Les calcrètes de fissures observées dans ce site ont cette particularité d'être si denses, qu'il est difficile de les distinguer de la roche sur laquelle elles se sont développées. Lors des travaux sur ce site, nous avons remarqué qu'immédiatement après avoir été prélevées, les calcrètes étaient humides et très souvent recouvertes d'une mousse verte ou rose.

Certains échantillons proviennent aussi de dalles enfouies sous une couche de sol. Les premiers ont été découverts à environ 30 cm de profondeur et nous les avons observés jusqu'à environ 60 cm.

Ici, les dalles ne sont pas recouvertes systématiquement d'une calcrète de fissures sur leur surface inférieure, mais il est cependant possible d'observer de très beaux spécimens. À part d'être salis par la poussière et les débris organiques du sol, les échantillons provenant de la roche enfouie sous le sol ressemblent à ceux qui proviennent de la roche non enfouie.

4.1.1.d Entrée de cavernes ou porches

Dans cette nouvelle catégorie, nous avons regroupé les sites **B.C.1994**, **B.C.1995**, **S.1996** et **C.A.1996**. Les deux premiers sont la caverne de Bear Cave ayant été échantillonnée durant l'été 1994 sur son mur extérieur, ainsi que dans les premiers mètres (à partir de l'entrée) de son couloir intérieur au cours de l'été 1995. Le site **S.1996** est le mur extérieur d'un porche d'une profondeur d'environ 5 m, tandis que le site **C.A.1996** est celui d'une petite caverne qui s'ouvre dans la roche d'un grand tor situé à une cinquantaine de mètres du sommet.

Les murs extérieurs de la caverne de Bear Cave et du site **S.1996** sont de grandes falaises d'orientation sud, qui rejoignent le sommet de la montagne environ 25 m plus haut. La roche qui les compose est plutôt massive et peu fissurée. Les calcrètes de fissures n'y sont pas très abondantes et très souvent, elles sont dans un état de détérioration. Ces falaises semblent avoir subi une période d'érosion très active, puisqu'un long talus de 30 m, dans lequel on retrouve des débris calcaires couverts de calcrètes de fissures, s'étend à leur pied.

Nous avons aussi fait la découverte de calcrètes de fissures sur les parois d'entrée de la caverne. Des spécimens ont été prélevés à partir de l'entrée jusqu'à 2,10 m, mais elles ont été observées jusqu'à 8 m. De façon générale, les croûtes qui se trouvent dans le premier mètre de l'entrée sont peu abondantes et fragiles. Leur croissance semble avoir été interrompue depuis longtemps, puisque leur surface présente des traces de dissolution. Celles que l'on retrouve entre les deuxièmes et quatrièmes premiers mètres de l'entrée sont tout aussi rares, cependant on remarque qu'elles sont plus fraîches et probablement toujours actives. Finalement, à 8 m de l'entrée, les calcrètes de fissures sont très minces (pas plus de 3 mm d'épaisseur), encore plus rares et dans un état de détérioration avancée.

4.1.1.e Tors de versant

Cette dernière catégorie regroupe tous les sites qui sont des tors se dressant sur le versant sud, à une distance de 40 et 60 m du sommet de la montagne. Le site **TOR#11995** est un petit tor d'une quinzaine de mètres de long, de 4 ou 5 m de large et d'une dizaine de mètres de hauteur. Il se

trouve à environ 25 m de la caverne de Bear Cave plus bas sur le versant. Sa petite taille nous a permis de faire une étude comparée de ses façades sud-est, sud-ouest et nord. Chaque façade a donc été étudiée de la base jusqu'à une profondeur de 50 cm dans le sol, ainsi qu'à une hauteur d'environ 2 m du sol. Les calcrètes de fissures se développent sur toutes les façades à l'intérieur de fissures verticales et horizontales. Leur apparence, leur épaisseur et leur état de fraîcheur sont hétérogènes d'un échantillon à l'autre. Cependant, nous avons remarqué que les croûtes présentent des traces de dissolution lorsque les fissures sont trop ouvertes. À deux mètres du sol, la roche est toute aussi pourrie au sud-est qu'au sud-ouest. Les fissures de la face sud-ouest sont toutefois plus humides, les calcrètes sont plus abondantes et plus épaisses en général. Les bases enterrees de ces deux façades sont comparables. Les fissures y sont abondantes et très humides. Les calcrètes sont présentes dans presque toutes les fissures et apparaissent sous forme de couches très fines dépourvues de traces de dissolution. De plus, la plupart d'entre elles sont recouvertes d'une mousse verte ou rose. La roche de la façade nord est quant à elle plutôt sèche, massive et pratiquement dépourvue de calcrètes de fissures autant à la base, qu'au-dessus du sol. Les rares croûtes observées dans la roche de cette façade avaient une épaisseur maximale de 1 mm.



Figure 4.1 : Façade ouest du site « TOR#1 1995 ». C'est un petit tor d'une quinzaine de mètres de long, de 4 à 5 cm de large et d'une dizaine de mètres de hauteur. La végétation est relativement abondante autour de ce tor et un long talus d'érosion (difficilement observable sur cette photographie), s'allonge sur près de 15 m à partir de la base du tor vers le bas du versant.

Le site **F.M.1995/1996** est une falaise qui se trouve à environ 10 m du TOR#1 1995 et qui fait partie du même rocher que la caverne de Bear Cave. Dans l'ensemble, la roche est plus massive et moins fissurée que celle du TOR#1. Mais, comme pour ce dernier, les calcrètes sont très abondantes, surtout dans les fissures localisées sur la façade sud-ouest par rapport à la façade sud-est. Parmi tous les sites étudiés, c'est dans cette falaise que nous avons observé les calcrètes les plus épaisses. Certaines atteignent en effet un peu plus de trois cm d'épaisseur. Elles formaient une croûte de près de 50 cm de large, localisée dans une fissure verticale ouverte, qui s'étendait à partir du sol jusqu'à une hauteur de 10 m environ. Les calcrètes présentes dans les fissures ouvertes sont, ici aussi, dans un état de détérioration. De plus, plusieurs d'entre elles ont un relief de surface en forme de boudins qui s'allongent parallèlement à l'axe de la surface du mur.

Le site **B.E.1995** est un long tor localisé à une centaine de mètres à l'est du TOR#1. Il s'allonge du haut vers le bas du versant sur environ 50 m. De façon générale, les calcrètes de fissures observées sur celui-ci sont beaucoup plus délicates que celles des autres sites. La façade ouest semble cependant plus propice à leur développement, puisque les fissures de cette surface rocheuse sont plus riches en calcrètes que celles de la façade est. Enfin, les calcrètes localisées dans les fissures de la façade est sont généralement plus minces que celles de la façade ouest.

Le dernier site de cette catégorie, **T.P.M.1995**, regroupe quelques tors émergeant sous la limite des arbres du versant nord-ouest de la montagne à environ 4 km de là. La plupart des calcrètes de fissures sont localisées dans la roche de leur façade sud-ouest et très souvent en mauvais état.

4.1.2 Le Dempster Highway

Les quatre sites visités le long du Dempster Highway ont permis d'amasser plusieurs échantillons et de faire de nouvelles observations à travers toute la formation calcaire qui longe la route. Contrairement à la montagne de Bear Cave, chaque site d'échantillonnage n'est pas une falaise ou un tor de calcaire. Ce sont plutôt quatre territoires couvrant une surface de versant d'environ 100 m X 200 m, à partir desquels on a pu faire des observations et prélever des échantillons sur plusieurs tors.

Au site D.H.1, la roche est massive et les fissures sont rares. La roche est de moins en moins massive à partir du site D.H.2 et le nombre de fissures augmente. Aux sites D.H. 3 et D.H.4, la

roche est donc généralement très fissurée et les débris de calcaire se détachent facilement du socle à l'aide d'un pied de biche ou d'une masse. Tout comme sur la montagne de Bear Cave, les calcrètes de fissures se développent toujours dans les fissures de la roche exposée au sud, tandis que leur abondance et leur taille augmentent graduellement le long de notre transect sud/nord.

Ainsi, au site D.H.1, elles sont rares, en mauvais état et n'atteignent pas plus de 2 mm d'épaisseur. Aux sites D.H.2 et D.H.3, elles sont généralement un peu plus épaisses (entre 2 et 5 mm), dans un meilleur état de conservation, mais encore relativement rares, surtout au site D.H.2. À partir du site D.H.3, nous avons remarqué que la roche était souvent couverte de petites cavités arrondies de 1 mm à 1 cm de diamètre, que nous croyons être des microlapiès. Le site D.H.4 nous a surpris par l'abondance des croûtes présentes dans pratiquement tous les joints de la roche. Cependant, une excursion dans la partie haute de ce versant, nous a permis de remarquer qu'elles étaient absentes dans les fissures de la roche qui émerge dans la zone dépourvue de végétation. Les talus d'érosion, qui s'étendent au pied des tors dans cette zone, contiennent pourtant de nombreux débris de calcrètes de fissures.

4.1.3 Les Monts British

Les calcrètes de fissures ont été pour la première fois échantillonnées dans cette région un peu par curiosité. Nous détenons par conséquent peu de spécimens et peu d'informations à son sujet. Nous savons cependant que les calcrètes sont rares dans cette région et qu'elles sont surtout présentes dans les parties basses des versants, où la végétation prolifère. Sur les sommets, elles sont peu abondantes et en très mauvais état de conservation.

4.2 Macroscopie

Observées à l'œil nu, les calcrètes de fissures ont une texture poreuse et sont composées de structures délicates et fragiles. Comme le montre la figure 4.2, les principales structures observées à la loupe binoculaire sont des granules, des nodules, des choux-fleurs, des colonnettes simples et des colonnettes arborescentes.

Les granules sont habituellement présentes sur la surface de calcrètes en début de croissance et ayant une épaisseur de quelques microns à 1 mm. Ils confèrent à la surface de la croûte une

Les granules sont habituellement présentes sur la surface de calcrètes en début de croissance et ayant une épaisseur de quelques microns à 1 mm. Ils confèrent à la surface de la croûte une apparence et une texture rugueuse ou granuleuse. Lorsque les croûtes sont un peu plus épaisses, soit entre 1 et 2 mm tout au plus, nous voyons apparaître les nodules. Ces structures sont de petits renflements de forme sphérique, dont la taille et le diamètre moyen sont respectivement 1,5 mm et 1 mm. Si la densité des calcrètes est faible, on peut observer la présence de granules et/ou des nodules entre les structures plus complexes. Les choux-fleurs sont eux aussi des structures sphériques, mais leur taille et leur diamètre sont légèrement plus grands (jusqu'à 2mm).

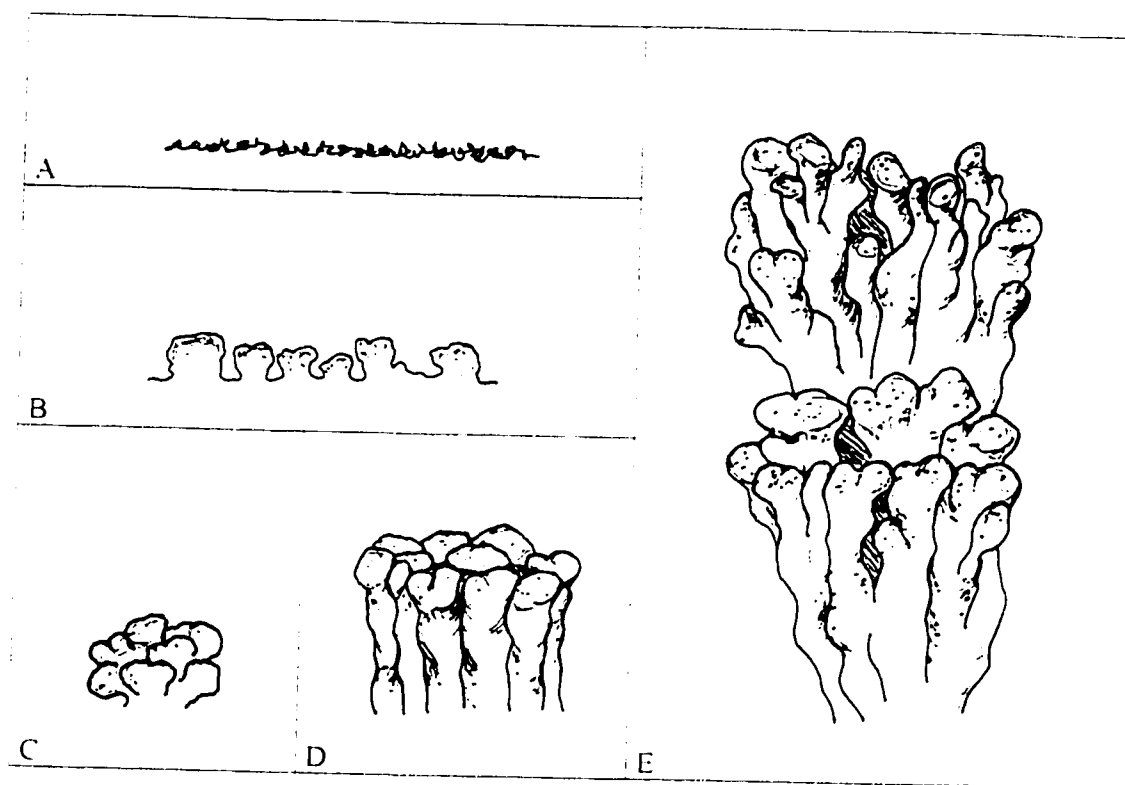


Figure 4.2 : Illustrations des différentes structures identifiées sur la surface des calcrètes de fissures à l'aide d'une loupe binoculaire : (A) les granules, (B) les nodules, (C) les choux-fleurs, (D) les colonnettes simples et (E) les colonnettes ramifiées.

Observées à la loupe binoculaire, ces structures sont couvertes de petits renflements et ressemblent aux concrétions de type choux-fleurs, que l'on voit souvent accrochés aux parois des cavernes. Les calcrètes, ayant une épaisseur d'au moins 5 mm, sont souvent couvertes en surface de colonnettes simples ou ramifiées. Ces dernières structures sont de fines tiges de calcite qui se dressent généralement de façon perpendiculaire à la surface de la croûte et pouvant être simples ou

ramifiées. Le diamètre des tiges simples est d'environ 0.5 mm, tandis que leur taille est très variable et d'une moyenne d'environ 4 mm. Les colonnettes ramifiées atteignent des tailles pouvant aller dans certains cas jusqu'à 1,5 cm.

La disposition des structures sur la surface des croûtes est dans certains cas aléatoire et dans d'autres, organisée en structures, que nous appelons les structures composées. Ces structures composées confèrent aux calcrètes un relief de surface identifiable à l'oeil nu. Ainsi, nous reconnaissons les structures composées suivantes : les boudins, les réticules et les choux-fleurs.

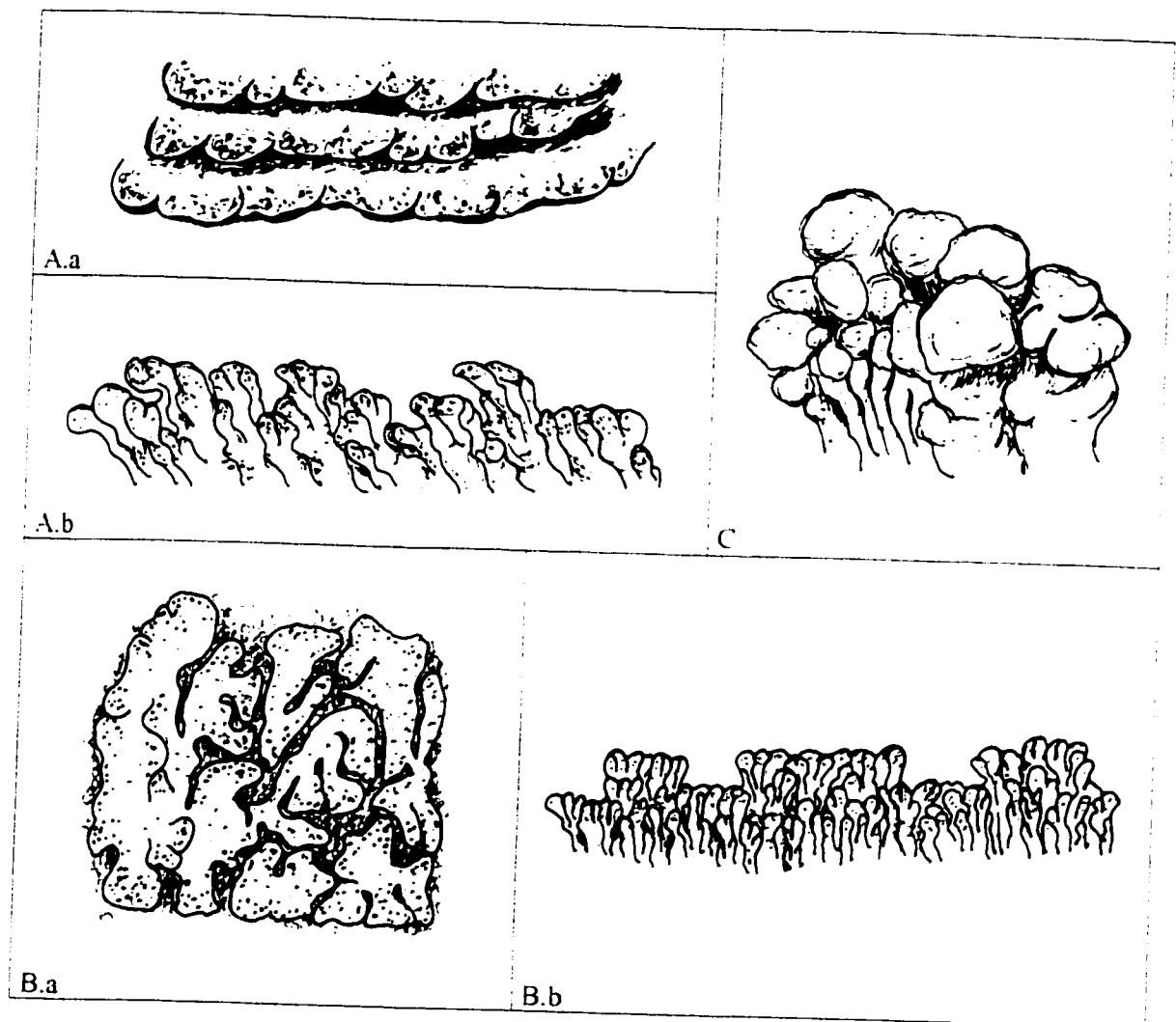


Figure 4.3 : Illustrations des trois structures composées identifiées sur la surface des calcrètes de fissures à l'aide d'une loupe binoculaire : (A) les boudins vu a) du dessus et b) de profil, (B) les réticules vu a) du dessus et b) de profil, ainsi que (C) les choux-fleurs vu de profil.

Comme le montre la figure 4.3, les trois structures composées sont, la plupart du temps, fait d'un assemblage organisé de colonnettes ramifiées. Les boudins sont des alignements concentrés de la plus jeune génération de colonnettes (diamètre moyen de 1,5 mm), disposés de façon plus ou moins parallèle. Ils sont habituellement entrecoupés de micro-tranchées, dans lesquelles on peut distinguer la génération de structures qui les a précédée. En coupe transversale, les boudins ressemblent à des genres de vagues orientées. Dans leur milieu de croissance, ils sont toujours alignés parallèlement à l'axe de la paroi rocheuse sur laquelle ils se sont développés, et les colonnettes qui les composent, sont toujours orientées vers le bas. Les réticules ressemblent un peu aux boudins, mais sont généralement composés de colonnettes ramifiées de plus faibles diamètres (soit d'environ 1 mm) et orientées, cette fois, de façon perpendiculaire à la surface sur laquelle elles se sont développées. Les colonnettes sont alignées côte à côte et forment des genres de chaînes tortueuses, reliées entre elles en un réseau. Finalement, les choux-fleurs sont des structures composées de colonnettes ramifiées de larges diamètres (environ 1,5 à 2 mm), amalgamées entre elles, un peu comme des bouquets. Les structures composées de type choux-fleurs ressemblent, elles aussi, aux choux-fleurs de cavernes.

4.3 Pétrographie

Ces mêmes échantillons ont été coupés en lames minces et observés au microscope pétrographique optique. Ces observations ont permis une identification plus fine des principales structures ou fabriques qui composent les calcrètes de fissures, de faire une description des différentes textures identifiées à l'intérieur des fabriques, ainsi que d'identifier d'autres caractéristiques pétrographiques contenues dans les calcrètes de fissures.

4.3.1 Les fabriques

Lors de nos observations, nous avons d'abord découvert que les calcrètes de fissures sont composées de six fabriques principales. Nous avons aussi remarqué l'existence d'une chronologie relative au développement de chacune de ces fabriques. Comme le montre le tableau 4.2, dans l'ordre chronologique de genèse ces six fabriques sont : I) une couche de calcite horizontale de base (figures 4.4.A, 4.4.D et 4.6.B), II) une série de nodules (figures 4.3.B et 4.6.B), III) de larges colonnettes ramifiées (figures 4.4.B, 4.4.D, 4.4.E, 4.4.G, 4.5.H et 4.6.B), IV) des colonnettes plus

FABRIQUES	(I) COUCHE BASALE	(II) NODULES	(II) LARGES COLONNETTES	(IV) FINES COLONNETTES	(V) DIGITÉE		(VI) DÔMES
DESCRIPTION	Couche de calcite basale; reposant directement sur la roche	Série de renflements de forme circulaire	Tiges de calcite courtes, trapues et ramifiées comme les tiges d'un végétal	Fines tiges de calcites pouvant être simples ou ramifiées	Série de tiges très fines de calcite, dont les extrémités inférieures ont tendance à partir d'un même point pour former un genre d'éventail	Série de dômes très densément accolés les uns aux autres et toujours laminés	
ÉPAISSEUR	≤ 1 mm	1,5 mm	2,5 mm	3 à 7 mm	3 mm	3 à 4 mm	
DIAMÈTRE	-	1 mm	1 mm	0,5 mm	≤ 0,5 mm	3 à 4 mm	
L E S T E X T U R E S	LAMINÉES	PHAS.	LAMINÉES	PHAS.	LAMINÉES	LAMINÉES	PHAS.
	1) Alternance de laminations de micrite bruns ou noirs et de laminations de cristaux de micro-sparite gris clair, mêlés à des grains détritiques	Prim.	1) Alternance de laminations de cristaux de micrite bruns ou noirs et de laminations de cristaux de micro-sparite gris clair, mêlés à des grains détritiques	Prim.	1) Alternance de laminations de cristaux de micrite bruns ou noirs et de laminations de cristaux de micro-sparite gris clair, mêlés à des grains détritiques	1) Alternance de laminations de micrite bruns ou noirs et de laminations de cristaux de micro-sparite gris clair, mêlés à des grains détritiques	Prim.
	3) Calcites fibro-radiales laminées, qui s'éteignent en lumière polarisante et de couleur jaune à brun. Les fibres de calcite forment parfois des petits lobes	Prim.	2) Taches de micrite noires de forme circulaire ou allongée, alignées les unes à la suite des autres pour former des laminations que l'on distingue parmi des cristaux de micro-sparite	Prim.	3) Calcites fibro-radiales laminées, qui s'éteignent en lumière polarisante et de couleur jaune à brun. Les fibres de calcite forment parfois des petits lobes	3) Calcites fibro-radiales laminées, qui s'éteignent en lumière polarisante et de couleur jaune à brun. Les fibres de calcite forment parfois des petits lobes	Prim
			4) Laminations diffluses composées d'une alternance de bandes gris foncé de micro-sparites (très petite taille) et de bandes gris clair de micro-sparites (grosse taille)	Trans.	4) Laminations diffluses composées d'une alternance de bandes gris foncé de micro-sparites et de bandes gris clair de micro-sparites	4) Laminations diffluses composées d'une alternance de bandes gris foncé de micro-sparites et de bandes gris clair de micro-sparites	Trans.
	NON LAMINÉES	PHAS.	NON LAMINÉES	PHAS.	NON LAMINÉES	NON LAMINÉES	PHAS.
	9) Hâtonnets de sparite blancs à jaunâtres très purs (sans inclusions organiques), disposés côte à côte et perpendiculaires à la roche	Sec.	5) Taches de micrite noires et de forme circulaire, dans une matrice de cristaux de sparite grossiers et de couleur gris clair	Trans.	7) Mélange hétérogène de cristaux de micro-sparite de différent tons de gris	6) Cristaux de sparite subanguleux et grossiers, qui s'éteignent en lumière polarisante, dont la couleur varie entre des tons de gris à noirs ou de jaunâtres à bruns	Trans.
			6) Cristaux de sparite subanguleux et grossiers, qui s'éteignent en lumière polarisante, dont la couleur varie entre des tons de gris à noirs ou de jaunâtres à bruns	Trans.		7) Mélange hétérogène de cristaux de micro-sparite de différent tons de gris	Trans.
			7) Mélange hétérogène de cristaux de micro-sparite de différent tons de gris	Sec.			
			8) Mélange hétérogène de cristaux de micro-sparite et de sparite, avec inclusions détritiques, dont la couleur varie entre le jaune et le brun	Sec.			

Tableau 4.2 : Les six principales fabriques qui caractérisent les calcrites de fissures selon l'ordre chronologique de genèse de chacune, ainsi que la description, l'épaisseur, le diamètre et les différentes textures associées à chacune d'entre elles. Chacune des textures est classée selon qu'elle est en phase primaire, secondaire ou transitoire entre ces deux phases. Ces résultats ont été obtenus à partir de l'observation au microscope pétrographique optique de 52 échantillons de calcrites de fissures coupés en lames minces.

fines et longues, et, simples ou ramifiées (figure 4.4.C), V) une fabrique digitée (figures 4.4.G et 4.4.H), ainsi que VI) des dômes laminés (figures 4.4.F et 4.4.H).

En effet, les calcrètes de fissures sont toujours composées à la base d'une couche de calcite horizontale, qui repose directement sur la surface rocheuse. L'absence de cette couche basale dans la séquence de fabriques de quelques échantillons, est attribuable à un bris de cette partie de la calcrète lors de la coupe en lame mince. La seconde fabrique apparaît lorsque la couche de calcite basale se déforme dans la partie supérieure, en une série de renflements que nous appelons les nodules. Des zones de cristallisation préférentielles et plus étroites sont ensuite créées sur les nodules, pour laisser place au développement de genres de tiges de calcite. Parfois, d'autres zones de précipitation préférentielles peuvent se former sur la partie supérieure des tiges et nous voyons alors apparaître des ramifications. Ces tiges simples ou ramifiées constituent la troisième fabrique, que l'on appelle les larges colonnettes simples ou ramifiées. Les larges colonnettes sont souvent suivies de la quatrième fabrique, composée d'une autre série de colonnettes simples ou ramifiées, mais plus fines et plus longues que les précédentes. La cinquième fabrique apparaît soit directement sur la couche de calcite basale ou sur les larges colonnettes. Elle est composée de tiges de calcite très fines ($\leq 0,5$ mm de diamètres), ayant tendance à se ramifier très rapidement lors de la cristallisation, pour prendre l'apparence d'un éventail digité. Cette cinquième fabrique est par conséquent la fabrique digitée. La sixième fabrique s'observe habituellement à la suite de la fabrique digitée, mais parfois aussi directement sur la couche de calcite basale. Nous la décrivons comme étant une série de larges dômes densément accolés les uns aux autres et présentant toujours une texture laminée.

Figure 4.4 : Microphotographies prises au microscope pétrographique optique montrant : (A) a) Une couche de calcite basale horizontale laminée, ainsi qu'un banc d'altération de b) la texture 3 par c) la texture 6. La flèche indique la limite du banc d'altération. (B) a) Une série de nodules, surmontés de trois générations de b) larges colonnettes. (C) Fines colonnettes composées de la texture laminée 1. (D) a) Une couche de calcite basale horizontale composée de la texture 9, surmontée de b) larges colonnettes. On remarque une altération provenant de la périphérie des larges colonnettes et qui transforme la c) texture laminée 1 en d) texture non laminée 7. (E) Larges colonnettes, dont la première génération est composée de a) la texture laminée 4 et la dernière de b) la texture non laminée 7. (F) Une série de dômes laminés. (G) a) Larges colonnettes surmontées de la b) fabrique digitée. (H) a) La fabrique digitée, surmontée de b) dômes laminés.



Figure 4.4

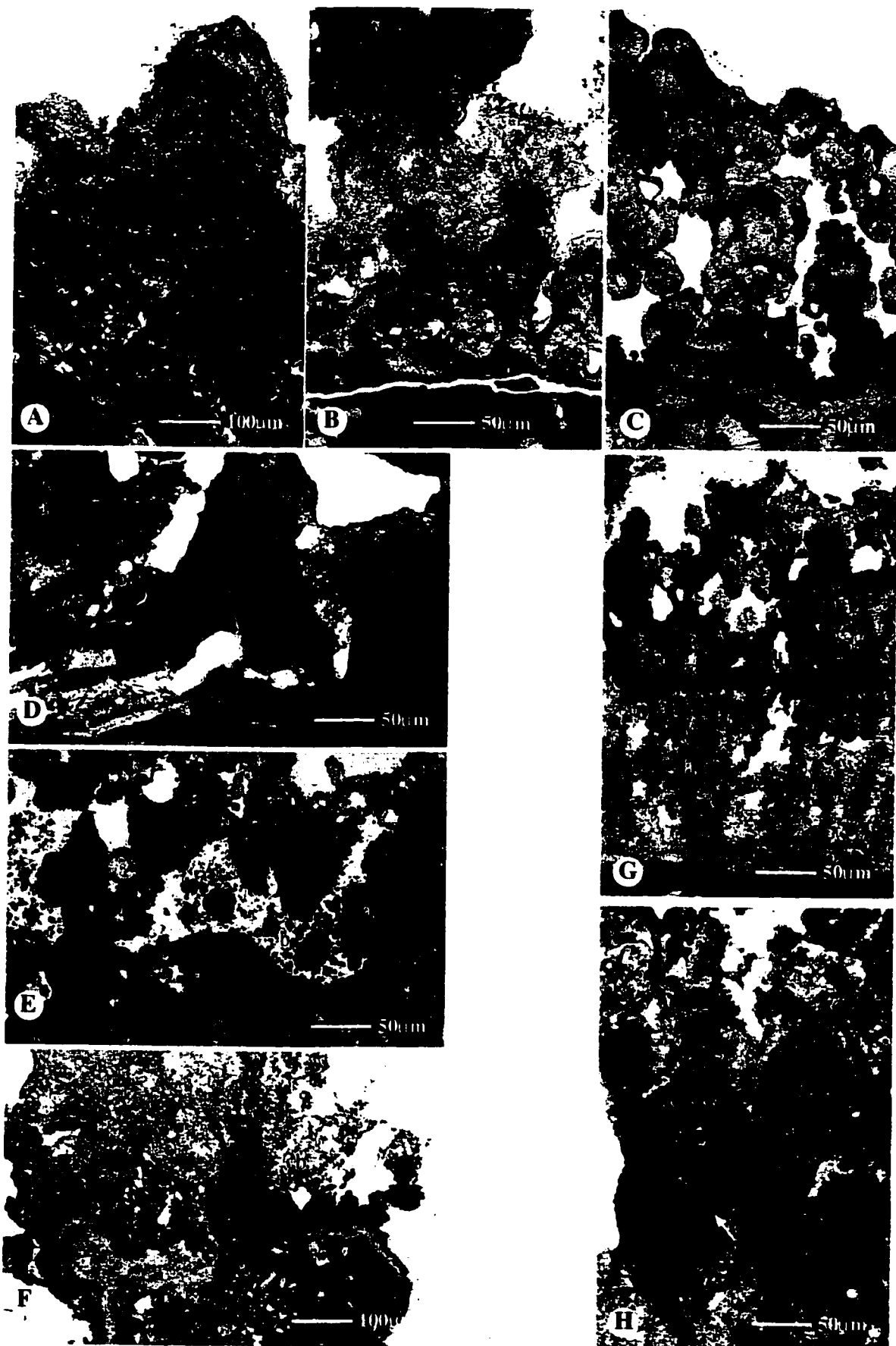


Figure 4.5

Figure 4.5 : Microphotographies prises au microscope pétrographique optique montrant : (A) La texture laminée 1 dont les laminations de micrite noires contournent des cristaux grossiers de sparite pour former des genres de vagues. (B) a) La texture laminée 2. (C) La texture laminée 3, dont les fibres de calcite forment des petits lobes. (D) a) La texture laminée 4 et la présence de b) grains détritiques dans les pores de la calcrète. (E) a) La texture non laminée 7 et le remplissage des pores par des grains détritiques. (F) a) La texture non laminée 8 et un b) ciment d'aiguilles de sparite non organisées. (G) a) La texture non laminée 5. (H) Grandes colonnettes traversées d'un banc d'altération de a) la texture laminée 4, par b) la texture non laminée 7. Le banc d'altération (indiqué par la flèche) vient de la base de la fabrique et évolue vers l'extrémité des structures.

4.3.2 Les textures

Les calcrètes de fissures sont de façon générale composées de cristaux de micrite ($\leq 4 \mu\text{m}$), de cristaux de micro-sparite (entre $4 \mu\text{m}$ et $15 \mu\text{m}$, pouvant parfois atteindre près de $30 \mu\text{m}$), de calcite fibreuse, de sparite ($\geq 15 \mu\text{m}$), ainsi que de grains détritiques de taille très variable. Les types de cristaux et leur organisation à l'intérieur des fabriques, confèrent aux calcrètes des textures distinctes. Deux grandes catégories de textures se distinguent, soit les textures laminées ainsi que les textures non-laminées.

4.3.2.a Les textures laminées

- 1) Alternance de laminations composées de micrite de couleur brun foncé ou noire et de laminations composées de cristaux de micro-sparite de couleur gris clair mêlés à des grains détritiques. Parfois les laminations de micrite contournent des bandes de grains détritiques pour former des genres de vagues (figures 4.4.C, 4.4.D et 4.5.A).
- 2) Taches de micrite noires de forme circulaire ou allongée, alignées les unes à la suite des autres pour former des laminations que l'on distingue parmi des cristaux de micro-sparite (figure 4.5.B).
- 3) Calcites fibro-radiales laminées, qui s'éteignent en lumière polarisante et dont la couleur varie entre le jaune et le brun. Étant donné leur disposition radiale, les fibres de calcite forment parfois des petits lobes (figures 4.4.A et 4.5.C).
- 4) Laminations apparaissant sous une forme diffuse, composée d'une alternance de bandes gris foncé de cristaux de micro-sparite de très petite taille (de 3 ou $4 \mu\text{m}$ et que l'on peut confondre pour des micrites) et de bandes gris clair de micro-sparite de plus grosse taille ($20 \mu\text{m}$ en moyenne) (figures 4.4.E, 4.5.D et 4.5.H).

4.3.2.b Les textures non laminées

- 5) Taches de micrite noires et de forme circulaire, disposées de façon aléatoire dans une matrice de cristaux grossiers de micro-sparite de couleur gris clair (figure 4.5.G).
- 6) Cristaux de sparite subanguleux et grossiers, qui s'éteignent en lumière polarisante, et dont la couleur varie entre des tons de gris à noirs, ou de jaunâtres à bruns (figure 4.4.A).
- 7) Mélange de cristaux de micro-sparite subanguleux de différents tons de gris (figures 4.4.D, 4.4.E, 4.5.E et 4.5.H).
- 8) Mélange très hétérogène de cristaux de micro-sparite de différentes tailles et d'inclusions détritiques, dont la couleur varie entre le jaune et le brun (figure 4.5.F).
- 9) Bâtonnets de sparite blancs à jaunâtres très purs, c'est-à-dire sans inclusions de micrite, disposés côte à côte et de façon perpendiculaire à la surface rocheuse (figure 4.4.D).

Afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble, les résultats de ce travail d'identification des textures sont compilés dans le tableau 4.3. Pour chaque échantillon étudié, nous pouvons y lire la ou les textures associées à chacune des fabriques qui le compose. Chacune des textures est identifiée à l'aide du même chiffre de 1 à 9 utilisé aux deux paragraphes précédents. La compilation de ces données n'a pas été un travail facile. Les calcrètes de fissures sont des dépôts de calcite secondaire assez complexes, dans lesquels on observe souvent plusieurs textures à l'intérieur d'une même fabrique. Il a donc fallu déterminer laquelle ou lesquelles des textures étaient prédominantes dans chacune des fabriques.

Le calcul de la fréquence de chaque texture identifiée dans chacune des fabriques de tous les échantillons, par rapport au nombre total de textures identifiées dans chaque fabrique (tableau 4.4), permet de déterminer l'abondance des textures à l'intérieur de chacune des fabriques. À partir de ces résultats, nous avons d'abord été en mesure d'indiquer, dans le tableau 4.2, lesquelles de ces neuf textures sont le plus souvent associées à chacune des fabriques. De plus, on remarque que la couche de calcite basale (I) et les dômes (VI) sont majoritairement composées de textures laminées, avec des taux respectifs de textures laminées de 83,63% et 66,67%. Tandis que les nodules (II), les larges colonnettes (III), les fines colonnettes (IV) et la fabrique digitée (V), démontrent des écarts d'abondance entre les deux types de textures de moins de 13,04%. Parmi ces dernières, les fines colonnettes sont les seules à être composées d'un taux légèrement plus élevé de textures non laminées. On remarque aussi que la distribution de l'abondance des textures est plus homogène dans le cas des nodules et des deux types de colonnettes, que dans le cas de la fabrique digitée. Enfin, la texture 2 n'est observée qu'à l'intérieur de la base laminée et des nodules à de faibles taux

LOCALIS.	SITES	ÉCHANT.	Textures des fabriques des échantillons provenant de la montagne de Bear Cave, du Dempster Highway et de Joe Creek					
			(i) Basale	(ii) Nodules	(iii) Larges colon.	(iv) Fines colon.	(v) Digitée	(vi) Dômes
Tors de sommet de montagne	T.S.T 95	T.S.T.B-1						
	S.V.B 95	S.V.B-1						
	S.V.C 95	S.V.D-1						
		S.V.D-2						
Base de crêtes et de grandes falaises	S.V.A 95	S.V.A-1						
		S.V.A-3						
		S.V.A-11						
	S.V. 96	S.V.-1						
	G.F.S. 95	G.F.S.A-1						
		G.F.S.A-3						
Surfaces inférieures de dalles exposées	C. 1996	C.-6						
		C.-8						
		C.-9 (p)						
		C.-9 (g)						
Surf. Inf. roches enf.		C.-10						
		C.-11						
		C.-19						
		C.-20						
Entrée de cavernes ou porches de cavernes	B.C. 1994	B.C.2-D						
		B.C.3-F						
		B.C.2-G						
		B.C.3-I						
	B.C.1995	B.C.4-C						
		B.C.C-1						
	S. 1996	B.C.D-1						
		S.-3						
Tors de versant	TOR#1 95	S.-4						
		C.A.-2						
	F.M. 1995	C.A.-3						
		T.1 C1A-3						
		T.1 C2B-3						
	F.M. 1996	F.M.A-1						
		F.M.B-1						
		F.M.B3-A						
Dempster Highway	D.H.1	F.M.-1						
		F.M.-2						
	D.H.2	F.M.-4						
		B.E. 1995						
	D.H.3	B.E.A-1C						
		B.E.A-5						
		T.P.M. 95						
		T.P.M.1						
Joe Creek	J.C. 1994	D.H.1						
		D.H.2						
		1.-7						
		2.-15						
		2.-16						
		3.-25						
		4.-A						
		4.-D						
		4.-E						
		4.-G						
		4.-K						
		J.C.3-1						
		J.C.3-2g						
		J.C.3-2p						

Tableau 4.3 : Résultats d'identification au microscope pétrographique optique de la ou des textures(s) associée(s) à chacune des fabriques qui compose chacun des 52 échantillons de calcrètes de fissures. Les cases orangées représentent les séquences temporelles de fabriques de type colonnette et les cases bleues représentent les séquences de type dôme et/ou digité

d'abondance respectifs de 1,82% et 2,08%, alors que les textures 5 et 9 ne sont observées qu'à l'intérieur d'une seule fabrique, soit dans les larges colonnettes à 1,49% pour la première et dans la base laminée à 5,45% pour la seconde.

TEXTURES	Abondance (%) des textures dans chaque fabrique						Total (%)
	I	II	III	IV	V	VI	
1	45,45	22,92	14,93	17,39	9,09	26,67	25,11
2	1,82	2,08	0	0	0	0	0,91
3	27,27	20,83	17,91	4,35	9,09	20,00	19,18
4	9,09	10,42	17,91	21,74	36,36	20,00	15,53
5	0	0	1,49	0	0	0	0,46
6	5,45	22,92	13,43	8,70	0	13,33	12,33
7	1,82	6,25	13,43	13,04	45,45	13,33	10,50
8	3,64	14,58	20,90	34,78	0	6,67	14,61
9	5,45	0	0	0	0	0	1,37
Laminées	83,63	56,25	50,75	43,48	54,54	66,67	
Non laminées	16,37	43,75	49,25	56,52	45,46	33,33	
Lamin. – non lamin.	67,26	12,50	1,50	-13,04	9,08	33,34	

Tableau 4.4 : Fréquence de chaque texture identifiée dans chacune des fabriques de tous les échantillons, par rapport au nombre total de textures identifiées dans chaque fabrique.

Le tableau 4.5 montre l'abondance de chacune des textures par rapport au nombre total de textures identifiées dans les échantillons provenant des différentes situations de versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek. De façon générale, les textures laminées sont plus abondantes que les textures non laminées d'au moins 17% dans la plupart des échantillons, sauf pour les échantillons qui proviennent de tors localisés au sommet de la montagne de Bear Cave (écart de 6,67%), ainsi que de roches enfouies sous la terre (écart de 0%). L'analyse un peu plus fine des données d'abondance des textures pour chacune des localisations permet de constater quelques points importants. Nous remarquons d'abord que lorsque le taux d'abondance de la texture 3 est le plus important parmi les textures laminées et que celui de la texture 1 est faible, comme c'est le cas pour les échantillons provenant de tors localisés au sommet de la montagne de Bear Cave, de surfaces inférieures de dalles exposées et de roches enfouies sous la terre, on obtient un maximum d'abondance de la texture 6 parmi les textures non laminées. On observe au contraire des abondances maximales de textures 7 et/ou 8 parmi les textures non laminées des échantillons provenant de la base de crêtes ou de falaises, d'entrées ou porches de cavernes et de tors de versant, lorsque c'est la texture laminée 1 qui est la plus abondante et que le

LOCALISATION	Abondance (%) des textures										
	LAMINÉES						NON LAMINÉES				
	1	2	3	4	Total	5	6	7	8	9	Total
Tors sommet montagne	6,67	0	40	6,67	53,34	0	40	6,67	0	0	46,67
Crêtes ou falaises	47,83	0	13,04	8,70	69,57	0	4,35	13,04	13,04	0	30,43
Surf. inf. de dalles	7,41	0	33,33	18,52	59,26	0	29,63	0	11,11	0	40,74
Surf. inf. roches enfouies	0	0	50	0	50	0	33,33	16,67	0	0	50
Entrées cavernes/porches	25	4,55	6,82	25	61,37	0	4,55	9,09	25	0	38,64
Tors de versant	31,75	0	11,11	15,87	58,73	0	6,35	12,70	19,05	3,18	41,28
Dempster Highway	24,14	0	24,14	13,79	62,07	3,45	13,79	10,34	10,34	0	37,92
Joe Creek	25	0	33,33	8,33	66,66	0	0	25	0	8,33	33,33
Total (%)	25,11	0,91	19,18	15,53	60,73	3,45	12,33	10,50	14,61	1,37	39,27

Tableau 4.5 : Abondance de chacune des textures par rapport au total de textures identifiées dans les échantillons provenant des différentes situations de versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek.

taux de texture 3 est faible. Parallèlement à ceci, les taux d'abondance des textures laminées 1 et 3 des échantillons du Dempster Highway sont égaux à 24,14%, tout comme ceux des textures non laminées 6, 7 et 8, presque égaux eux aussi à 13,79% pour la première et 10,34% pour les deux dernières. Les échantillons qui proviennent de la région de Joe Creek ne suivent pas cette dernière tendance, puisque les taux maximal de textures laminées appartiennent aux textures 1 et 3, tandis que parmi les textures 6, 7 et 8 non laminées, seule la texture 7 a été observée.

LOCALISATION	Abondance (%) des							
	FABRIQUES						SUCCESSIONS DE TYPE	
	I	II	III	IV	V	VI	Colonnnette	Digit./Dôme
Tors sommet montagne	44,44	22,22	22,22	0	0	11,11	75	25
Crêtes ou falaises	31,25	25	18,75	18,75	6,25	0	80	20
Surf. inf. de dalles	29,41	29,41	29,41	5,88	0	5,88	83,33	16,67
Surf. inf. roches enfouies	40	20	40	0	0	0	100	0
Entrées cavernes/porches	32,14	21,43	28,57	7,14	0	10,71	70	30
Tors de versant	30,56	25	19,44	13,89	8,33	2,78	72,73	27,27
Dempster Highway	36,84	21,05	26,32	5,26	0	10,53	75	25
Joe Creek	37,50	25	12,50	0	25	0	33,33	66,67
Total (%)	33,33	23,91	23,91	8,70	4,35	5,80	73,47	26,53

Tableau 4.6 : Abondance des six fabriques et des successions temporelles de fabriques de type colonnette et de type digité et/ou dôme, par rapport au total de chacune d'entre elles identifiées dans les échantillons provenant des différentes situations du versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek.

Le calcul d'abondance a aussi été appliqué aux six fabriques qui composent les calcrètes de fissures, par rapport au nombre total de chacune d'entre elles identifiée dans les échantillons provenant des différentes situations du versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek. Les résultats compilés dans le tableau 4.6 indiquent que la fabrique basale (I) est généralement la plus abondante avec un taux total de 33,33% et que la fabrique digitée (V) et les dômes (VI) sont les moins abondants avec des taux respectifs de 4,35% et 5,80%. Si l'abondance totale des fabriques a tendance à diminuer de la fabrique I à la fabrique VI (sauf une légère augmentation de 1,45% de la fabriques V à la fabriques VI), ce n'est pas le cas de toutes les catégories de localisation. Il semble cependant ne pas exister de relation entre les différences de distribution que l'on observe d'une localisation à l'autre.

4.3.3 Les successions temporelles de fabriques

Les six fabriques énumérées dans la section 4.3.1. sont rarement toutes présentes à l'intérieur des calcrètes. Chacune des cases vides du tableau 4.3 représente d'ailleurs l'absence de l'une ou l'autre de ces fabriques dans l'échantillon. Seule la base horizontale (I) fait presque toujours partie de tous les échantillons de calcrètes de fissures analysés. Deux successions temporelles de fabriques communes ont pu être identifiées à partir de ce tableau 4.3. La plus commune des deux est celle dont les cases sont colorées en orangé que nous appelons la succession de type COLONNETTES (voir le tableau 4.7) et la seconde, un peu moins commune, est la succession de type DIGITÉ et/ou DÔME, représentée par la couleur bleue.

SUCCESSION DE TYPE COLONNETTES	SUCCESSION DE TYPE DIGITÉ et/ou DÔME
- Couche de calcite basale (I)	- Couche de calcite basale (I)
- Série de nodules (II)	- Série de nodules (II)
- Grandes colonnettes (III)	- Grandes colonnettes (III)
- Fines colonnettes (IV)	- Fabrique digitée (V)
	- Grandes dômes laminés (VI)

Tableau 4.7 : Les fabriques qui caractérisent les deux principaux types de successions temporelles, soit les successions temporelles de type colonnette et de type digité et/ou dôme.

La succession temporelle de type colonnettes est d'abord composée de la base horizontale (I) et des nodules (II), surmontés des larges colonnettes (III), puis des fines colonnettes (IV). Dans cette première succession, il arrive souvent que les fines colonnettes sont absentes.

La seconde succession, soit la succession de type digité et/ou dôme, est un peu moins commune mais assez présente parmi les échantillons observés. Elle est composée de la base horizontale (I), souvent surmontée d'une série de nodules (II), de larges colonnettes (III), puis de la fabrique digitée (V) et/ou des dômes laminés (VI). Les dômes et la fabrique digitée sont rarement présents dans le même échantillon, ils n'ont d'ailleurs été observés de façon simultanée que dans un seul échantillon (tableau 4.3).

Les résultats du tableau 4.6 indiquent que parmi les deux types de successions temporelles, la succession de type colonnette est la plus abondante dans les échantillons de la montagne de Bear Cave et du Dempster Highway avec un taux total de près de 80%, tandis que dans la région de Joe Creek, c'est la succession de type digité et/ou dôme qui est la plus abondante à 66,67%. Les deux types de successions sont généralement observés dans toutes les situations du versant sud de la montagne de Bear Cave (sauf pour les échantillons provenant de surfaces inférieures de roches enfouies sous la terre), ainsi que dans les échantillons du Dempster Highway avec des taux d'abondance relativement homogènes d'une localisation à l'autre. Si on se réfère au tableau 4.3, il est facile de percevoir dès le premier coup d'œil, que la distribution des deux types de successions temporelles de fabriques ne semble suivre aucune tendance relative aux différentes situations du versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi qu'à la région du Dempster Highway.

4.3.4 Autres caractéristiques pétrographiques

4.3.4.a La porosité

Les pores se forment la plupart du temps, entre les structures des fabriques lors d'un nouveau stade de développement des calcrètes : soit lors de la genèse d'une nouvelle fabrique, ou lors de la genèse d'une nouvelle génération à l'intérieur d'une même fabrique. De façon générale, ils apparaissent immédiatement au cours du développement des nodules. Ainsi, une précipitation préférentielle se concentre en des zones spécifiques sur la surface de la base laminée et des nodules commencent à se développer. Des vides concaves s'ouvrent entre ces nodules et ce n'est que lorsqu'une nouvelle fabrique (les larges colonnettes par exemple) commence à se développer, que ces vides sont

refermés en pores d'apparence circulaire en coupe. Le développement des pores n'est donc pas attribuable à des processus qui agissent lorsque la sédimentation est complétée, comme c'est le cas pour la dissolution chimique par exemple, mais plutôt à un phénomène synchrone à la sédimentation. Leur taille est par conséquent fonction de la densité des structures entre elles. Les rares pores ayant été observés au cœur des structures de certains échantillons, sont probablement attribuables à des bris causés par la coupe des échantillons en lames minces.

4.3.4.b Fabriques de remplissage des pores

Le remplissage des pores par des grains détritiques (figures 4.5.D et 4.5.E) ou par des ciments tardifs semble être un phénomène survenu une fois la sédimentation complétée en partie ou entièrement. En effet, on observe souvent le même type de ciment localisé à l'intérieur des pores d'une séquence de plusieurs fabriques à l'intérieur d'un même échantillon.

Les ciments qui se développent à l'intérieur des pores (figures 4.5.F et 4.6) forment en générale des botrioides composées d'aiguilles de sparite plus ou moins organisées, de bâtonnets de sparite disposés de façon radiale ou de cristaux de sparite subanguleux et non organisés. Les cristaux qui composent les ciments ont des taux d'inclusion de micrite variables d'un échantillon à l'autre.

4.4 Microscopie électronique

L'observation de 19 échantillons de calcrètes de fissures au microscope à balayage électronique permet de constater la présence de micro-organismes emprisonnés dans la calcite. Ces micro-organismes sont cependant calcifiés et par conséquent, il est impossible de faire une identification spécifique des colonies microbiennes observées. Comme il a été expliqué dans la section 3.2.3.a, les manipulations en laboratoire permettant l'identification de micro-organismes à un tel niveau de précision, nécessite de travailler avec des colonies vivantes. Ainsi, les micro-organismes observés dans les calcrètes de fissures n'ont pu qu'être classifiées selon les caractéristiques morphologiques suivantes : la forme des cellules et l'arrangement des colonies.

Comme le montre la figure 4.7, nous notons la présence de colonies de staphylococs, de colonies de cocci parasites de ce qui semble être des hyphes de champignons microscopiques, de colonies de bacilles non organisées, de colonies de bacilles parasites de plus gros organismes unicellulaires (que

nous ne pouvons identifier), de streptobacillis et de filaments de champignons microscopiques emprisonnés dans la calcite.

4.5 Cathodoluminescence

L'observation d'un échantillon de calcrète de fissures en cathodoluminescence ne démontre pas de luminescence. Le même résultat a été obtenu par Sabourin (1997) du département de géologie de l'Université d'Ottawa, lorsqu'elle a tenté la même expérience sur un échantillon provenant de la caverne de Bear Cave.

Comme il a déjà été expliqué dans la section 3.2.4.a, deux interprétations peuvent découler de ces résultats : les calcrètes de fissures 1) ne produisent pas de luminescence ou 2) elles produisent une luminescence noire. L'absence de luminescence signifierait que les calcrètes de fissures auraient évolué dans un environnement oxydant, c'est-à-dire dans lequel les ions Mn^{2+} et Fe^{2+} , comme ions de substitution du Ca^{2+} , ne sont pas présents. Tandis que la luminescence noire signifierait qu'elles auraient évolué en présence d'une très grande quantité d'ion Fe^{2+} , comme ion de substitution du Ca^{2+} , soit dans un environnement très réducteur, ayant complètement inhibé la luminescence produite par le Mn^{2+} .

Figure 4.6 : Microphotographies prises au microscope pétrographique optique montrant : (A) Un ciment de bâtonnets de sparite qui se sont développés de façon radiale par rapport à la surface. On retrouve les mêmes bâtonnets de sparite dans les pores de plus d'une génération de fabrique. (B) a) Une couche de calcite basale, surmontée b) d'une série de nodules et c) de larges colonnettes. Un d) ciment de bâtonnets de calcite qui s'est développé dans les pores. (C) Un ciment de cristaux de sparite subanguleux dans les pores d'une fabrique de plus d'une générations de larges colonnettes.

Figure 4.7 : Microphotographies prises au microscope à balayage électronique montrant les différents types de colonies de micro-organismes emprisonnées dans la calcite des calcrètes de fissures. Nous avons d'abord des colonies (A) de staphylococs, (B) de coccis parasites de ce qui semble être des hyphes de champignons microscopiques, (C) de bacilles, (D et E) de bacilles parasites de plus gros organismes unicellulaires non identifiés, (F) de streptobacillis, ainsi que (G et H) des filaments de champignons microscopiques.

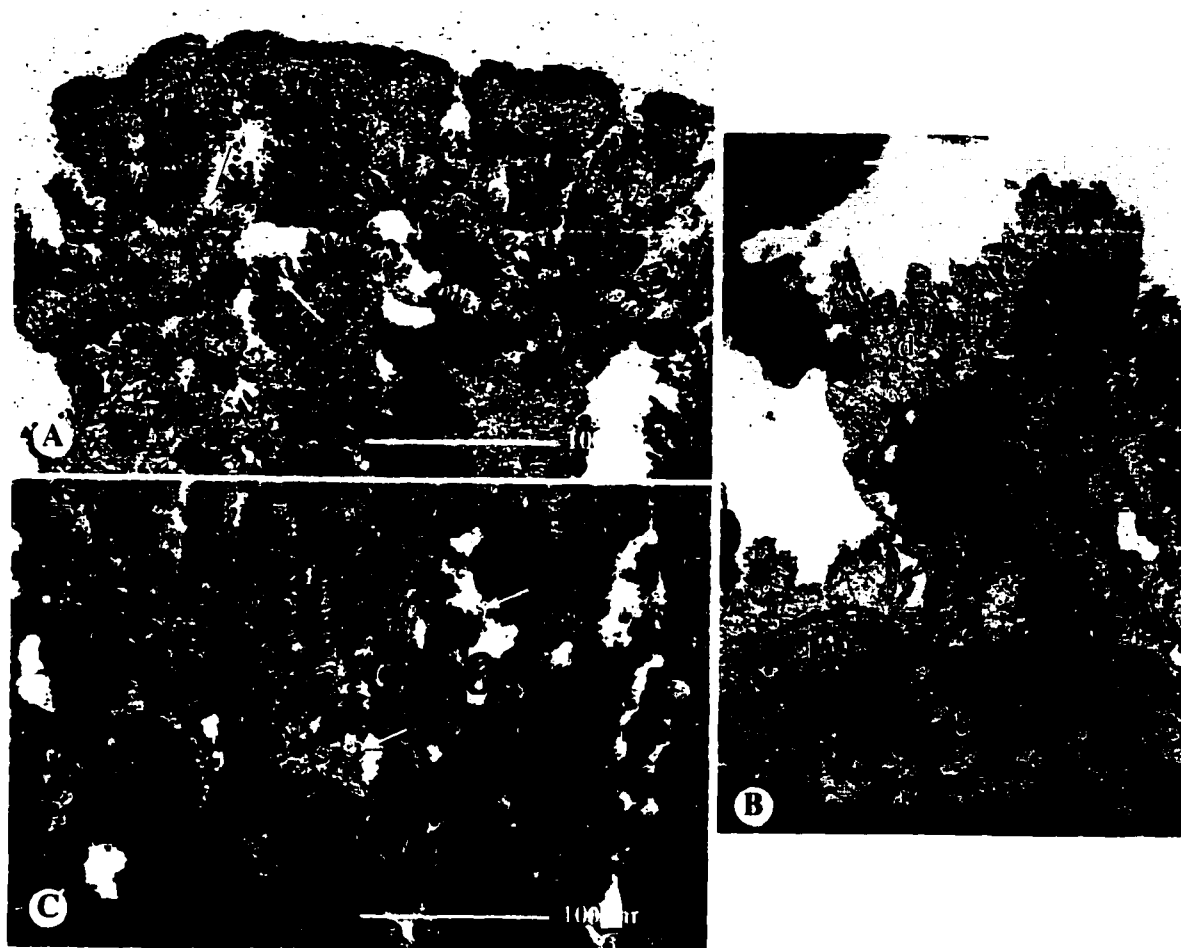


Figure 4.6

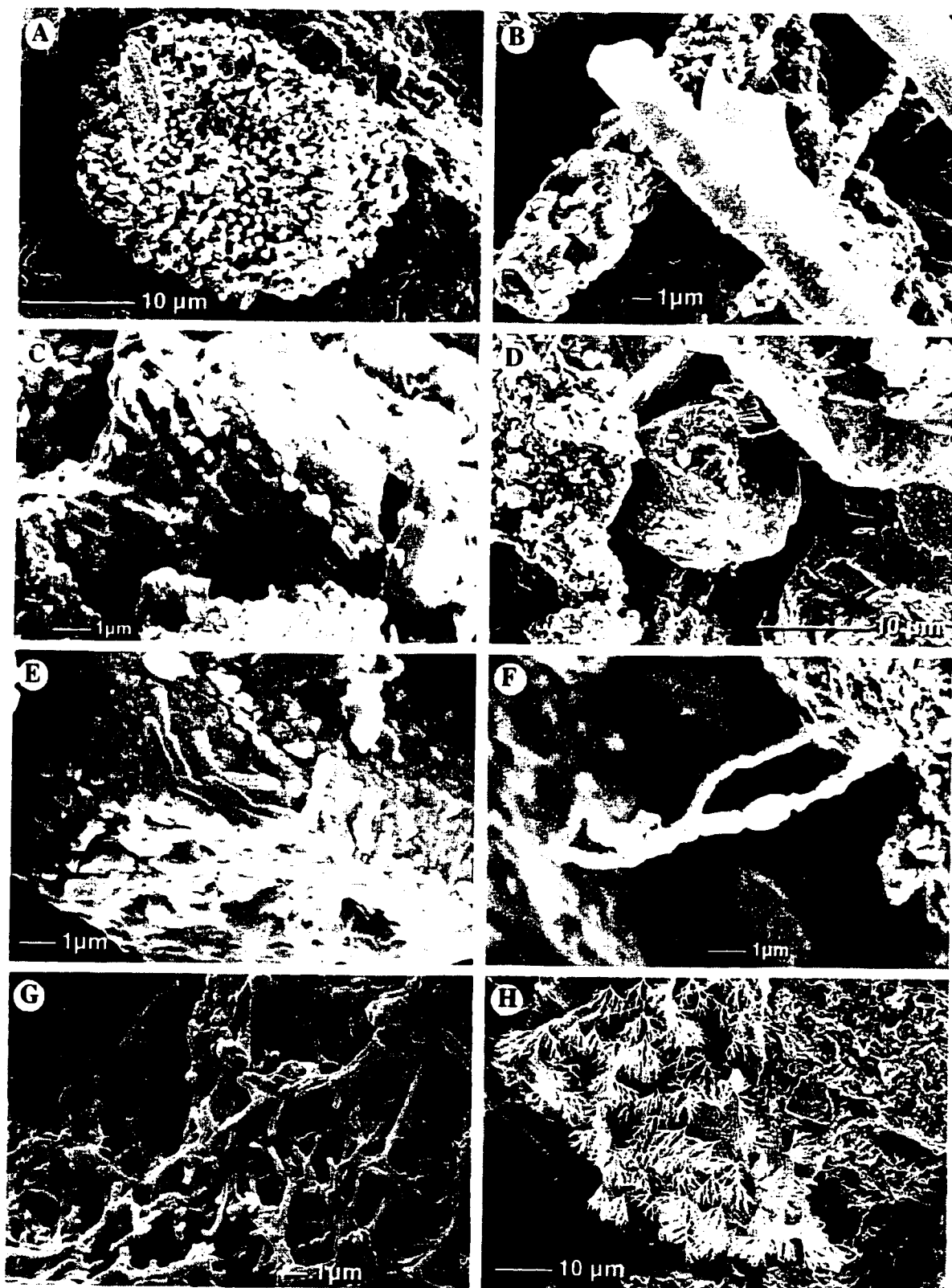


Figure 4.7

Conclusion

Les travaux d'échantillonnage ont d'abord permis d'observer que les calcrètes de fissures sont généralement abondantes dans tous les sites de la montagne de Bear Cave, ainsi qu'au site D.H.4 du Dempster Highway, comparativement aux autres sites visités le long du Dempster Highway et dans les Monts British. Elles sont toujours présentes dans la roche de versants d'orientation sud et dans les zones où la végétation prolifère, tandis que la roche des versants nord en sont complètement dépourvue. Habituellement, elles sont localisées dans les fissures des tors et des falaises, mais nous en avons aussi observées jusqu'à 8 m de l'entrée de la caverne de Bear Cave, ainsi que sur la face inférieure de dalles et dans les fissures de parois rocheuses enfouies sous une couche de sol d'environ 30 cm. De plus, la roche dans laquelle on retrouve ces dépôts de calcite secondaire, est de façon générale très fissurée, au point de nous permettre d'en retirer facilement des blocs à l'aide d'un pied de biche. Cependant, dans les zones où l'érosion est très active, comme c'est le cas des Monts British et de la partie haute du site D.H.4 du Dempster Highway, les calcrètes sont rares. Nos observations ont aussi permis de constater que dans les conditions actuelles, elles semblent dans certains cas toujours actives, tandis que dans d'autres, elles sont inactives. Ainsi, les calcrètes de fissures sont toujours dans un meilleur état de conservation lorsque les fissures sont fermées et humides. Dans ces conditions, certaines d'entre elles sont recouvertes d'une mousse verte ou rose. Si la roche est sèche et que les fissures sont ouvertes, elles sont généralement abimées et dissoutes en surface.

Les analyses macroscopique et pétrographique nous apprennent que les calcrètes de fissures sont composées de six fabriques principales et qu'il existe une chronologie relative au développement de chacune d'entre elles. Dans l'ordre chronologique de genèse, ces fabriques sont d'abord une couche de calcite basale horizontale, une série de nodules, de larges colonnettes ramifiées, de fines colonnettes simples ou ramifiées, une fabrique digitée, ainsi que des dômes laminés. Chacune des fabriques n'est pas toujours présente à l'intérieur des croûtes, mais il existe tout de même deux types de successions temporelles, soit la succession de type colonnettes plus fréquente, ainsi que la succession de type digité et/ou dôme un peu moins fréquente, mais tout de même distincte. De plus, il semble ne pas exister de tendance entre l'abondance de chacune des fabriques, ainsi que de chacun des deux types de succession temporelle, par rapport à la provenance des échantillons. Les observations au microscope pétrographique optique ont de plus permis d'identifier 9 différentes textures qui caractérisent les fabriques, ainsi que de faire la description de certaines autres composantes pétrographiques, telles que la porosité et les fabriques de remplissage des pores.

L'analyse d'abondance des textures identifiées dans les échantillons par rapport aux différentes situations du versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek est intéressante. Elle nous apprend qu'il existe une relation entre l'abondance des textures laminée 3 et non laminée 6, lorsque la fréquence de la texture laminée 1 est faible, ainsi qu'une relation entre l'abondance des textures laminée 1 et non laminée 7 et/ou 8, lorsque c'est la texture laminée 3 qui démontre une faible fréquence.

Au microscope à balayage électronique, nous avons constaté la présence de micro-organismes fossiles emprisonnés dans la calcite des calcrêtes de fissures. Puisqu'ils sont non vivants, nous avons dû limiter l'identification à une classification des colonies selon la forme des cellules et leur organisation.

Enfin, l'analyse d'un échantillon en cathodoluminescence et les résultats obtenus par Madame Sabourin (1997) à partir d'un échantillon provenant de la caverne de Bear Cave, indiquent que les calcrêtes de fissures ne produisent pas de luminescence ou qu'elles produisent une luminescence noire. Dans le premier cas, les calcrêtes de fissures auraient évolué dans un milieu oxydant, tandis que dans le second, elles auraient évolué dans un milieu réducteur.

Chapitre 5

DISCUSSION

Les calcrètes de fissures sont un outil important dans l'étude et la reconstitution des paléoenvironnements des régions nordiques. Les composantes et les structures dont elles sont faites, sont le résultat des pressions exercées par l'environnement sur les formations calcaires de ces régions à travers le temps. Nous verrons dans ce dernier chapitre de la thèse, que l'analyse des résultats obtenus en laboratoire permettent maintenant de dresser un portrait assez complet des conditions initiales qui ont favorisé la genèse des calcrètes de fissures, ainsi que de la signature du temps dans leurs structures. L'analyse des observations relevées lors des travaux d'échantillonnage effectués dans les trois régions calcaires étudiées, permettent aussi de mieux comprendre quelles sont les conditions actuelles toujours favorables à leur développement.

5.1 Les conditions initiales favorables à la genèse des calcrètes de fissures

5.1.1 L'âge des calcrètes de fissures

Les résultats de datation effectués sur six échantillons de calcrètes de fissures par l'analyse des mesures du rapport d'activité $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$, indiquent que ces dépôts se seraient développés lors du maximum climatique des régions nordiques, il y a de cela 82 000 ans (Ghaleb, et *al.* 1997). Les observations relevées au cours des travaux sur le terrain, n'ont par conséquent qu'une utilité limitée dans notre compréhension des conditions initiales favorables au développement des calcrètes de fissures. En effet, une longue période de temps nous sépare du début de leur genèse et même si les régions nordiques subissent actuellement un réchauffement semblable à celui qu'elles ont connu durant le dernier interglaciaire, les conditions environnementales auxquelles elles sont actuellement soumises, ne sont plus tout à fait les mêmes.

5.1.2 Processus de genèse

Deux informations relevées sur le terrain sont cependant très importantes. La couleur des calcrètes de fissures est habituellement la même ou voisine de celle de la roche sur laquelle elles se développent, et la paroi opposée aux calcrètes dans la fissure est généralement imprégnée de l'empreinte du relief de surface des calcrètes. Ces observations suggèrent que leur genèse implique les processus de dissolution et reprécipitation des carbonates provenant en partie, au moins, de la paroi opposée à la croûte dans la fissure.



Figure 5.1 : Microphotographie du début de genèse d'une (C) calcrète de fissures à l'intérieur d'une mince fissure de (R) la roche. On observe aussi quatre (P) pores creusés, vraisemblablement, dans la roche qui fait face à la calcrète à l'intérieur de la fissure (1 cm = 25µm).

5.1.2.a Le début de genèse d'une calcrète de fissures dans une mince fissure de la roche

L'observation du début de la genèse des calcrètes à l'intérieur de minces fissures a d'ailleurs permis de faire quelques constatations intéressantes à ce sujet. Comme le montre la figure 5.1, la genèse des calcrètes de fissures semble débiter, lorsque les conditions le permettent, à l'intérieur de fissures très fines et déjà présentes dans la roche. Si l'on observe la plus fine extrémité de la croûte dans une fissure, on se rend compte qu'elle devient de plus en plus mince, jusqu'à disparaître

complètement dans la fissure. Dès les premières étapes du développement des calcrètes, on aperçoit la couche de calcite basale, surmontée des petits nodules, séparés les uns des autres par des pores circulaires. Des cavités concaves apparaissent souvent sur les parties de la surface rocheuse qui sont opposées aux pores, tandis que celles qui font face aux nodules sont généralement accolées à l'extrémité supérieure de ces derniers. Dans certains cas, il est difficile de distinguer le contact entre la croûte et la roche, comme si les nodules en étaient un prolongement. Les petites cavités concaves sont de toute évidence le résultat de la dissolution des carbonates provenant de la paroi opposée à la calcrète et les nodules sont le résultat d'une précipitation secondaire de ces carbonates en solution.

5.1.2.b Les composantes détritiques

Les composantes détritiques originales de la surface rocheuse opposée à la croûte sont complètement ou en partie dissoutes, puis intégrées à la calcrète sans qu'il n'y ait de dissolution préférentielle. En effet, celle-ci semble s'attaquer autant aux grains silicoclastiques de la taille des argiles et des silts qui composent la matrice de la roche calcaire, qu'aux grains de plus grosse taille qui forment le treillis. Elle ne semble pas non plus faire de discrimination entre les grains d'origine inorganique et les bioclastes. Le rapport surface/volume des grains de petite taille étant plus important que celui des grains de plus grosse taille, la dissolution des premiers devrait être plus facile et plus rapide que lorsqu'il s'agit de grains de plus grosse taille. Ceci expliquerait la présence de particules partiellement dissoutes dans la croûte.

Ce phénomène d'intégration à la croûte des composantes détritiques appartenant à la surface rocheuse opposée s'observe aussi dans le cas de calcrètes plus matures et donc plus épaisses. Si par exemple la roche hôte est traversée perpendiculairement à la fissure par une veine de calcite ou une zone, dont les composantes cristallines sont de différente nature ou présentent une texture différente de celles du reste de la roche, il est souvent possible de distinguer le prolongement de cette veine ou zone à l'intérieur de la calcite secondaire. Car même si ces composantes perdent leur forme et leur taille originales lorsqu'elles sont dissoutes et intégrées à la croûte, les plus grosses ne perdent pas leur couleur et leur texture (figure 5.2.A). Ce phénomène est facilement visible lorsque l'on observe des grains de grosse taille dans la zone différenciée du reste de la roche, et encore plus visible s'il s'agit d'une veine de calcite (figure 5.2.B) par rapport aux composantes de la roche calcaire. Nous croyons par conséquent, que la surface rocheuse faisant face à la calcrète à l'intérieur de la fissure serait la surface d'alimentation, par opposition à celle que nous appelons la surface de croissance localisée sous la calcrète (2^e paragraphe, section 4.1).

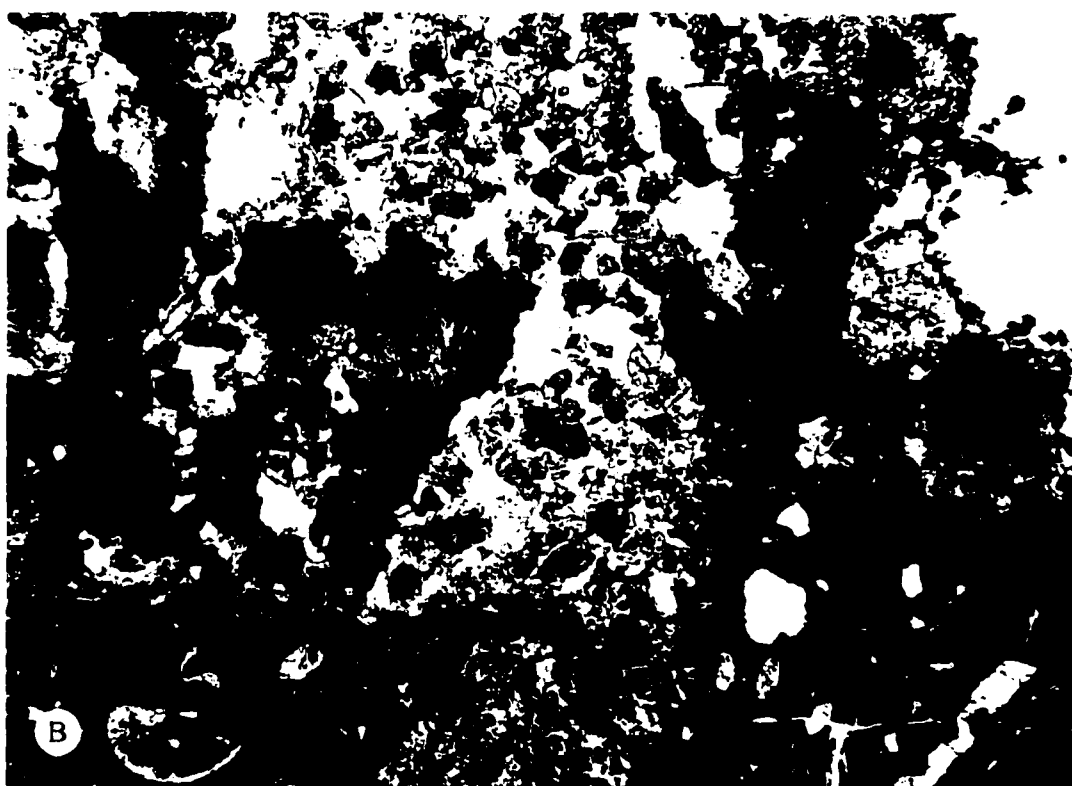


Figure 5.2 : Microphotographies au microscope pétrographique optique montrant : (A) L'intégration de grains de calcaire appartenant (R) à la roche hôte, dans (C) la calcrète de fissures en développement ($1\text{cm} = 31,15\mu\text{m}$). (B) Le prolongement d'une (Z) zone différenciée de (R) la roche hôte à l'intérieur d'une (C) calcrète de fissures en développement ($1\text{cm} = 50\mu\text{m}$).

Cependant, les composantes détritiques cristallines et bioclastiques présentes à l'intérieur des structures demeurent en générale, très difficiles à identifier au microscope pétrographique optique. Car, comme mentionné au 1^{er} paragraphe de cette section, l'altération qu'elles ont subie au cours des processus de dissolution et reprécipitation leur ont fait perdre leur taille et leur forme originales. Il est possible à la limite de procéder par déduction, en comparant leur couleur et leur texture à celles que l'on observe dans la roche sur laquelle la croûte s'est développée, mais si tous les grains ont des couleurs semblables ou sont de trop petite taille, comme c'est le cas généralement, les textures sont particulièrement difficiles à distinguer. L'observation des calcrètes de fissures en cathodoluminescence aurait été bien utile pour faire la preuve de la provenance des composantes détritiques, par leur identification. Mais, comme nous l'avons expliqué dans la section 4.5, les calcrètes de fissures ne démontrent pas de luminescence brillante.

5.1.2.c Les micro-organismes

Depuis un peu plus d'une centaine d'années, de nombreux chercheurs ont suggéré et/ou démontré que des bactéries provenant d'environnements variés avaient la capacité d'induire la précipitation des carbonates de calcium. Chafetz et Buczynski (1992) ont fait une revue des principaux travaux qui ont marqué l'évolution des connaissances sur ce sujet, à partir des années 1897 jusqu'à 1990. Parmi la communauté de chercheurs intéressés par les processus de cristallisation des carbonates de calcium, certains d'entre eux mettent en doute l'implication des micro-organismes. L'un des principaux arguments, soulevés notamment par Walter (1996) lorsqu'il fait référence aux travaux de Grotzinger et Rothman (1996), est que théoriquement les processus abiotiques peuvent générer des structures stromatolitiques et qu'en l'absence de micro-fossiles dans ces dernières, il est impossible de faire la preuve d'une origine biogénique.

Dans le cas des calcrètes de fissures, les textures laminées que l'on observe en abondance dans leurs structures, ne sont pas sans rappeler celles des stromatolites. De plus, nous avons fait l'observation de micro-organismes dans une série d'échantillons, qui ressemblent beaucoup à ceux que l'on croit responsables du processus de biominéralisation dans une série des plus récentes études (Jones, Renaut and Rosen, 1997 ; Ferris and Lowson, 1997 ; Folk, 1993 ; Chafetz and Buczynski, 1992 ; Adolphe et al, 1991 ; Jones, 1990 ; Jones and Motyka, 1987 ; Adolphe et al, 1989 ; Klappa, 1979). Cependant, la présence de micro-organismes calcifiés dans les calcrètes de fissures, ne peut que suggérer la possibilité d'une implication microbienne dans leur genèse, puisque nous ne sommes pas en mesure d'en faire la preuve irréfutable. D'abord, ces micro-organismes sont calcifiés et donc non vivants. Par conséquent, il est impossible de provoquer de façon expérimentale, le

développement de nouveaux voiles bactériens calcifiés par leur mise en culture. Et puisqu'ils sont non vivants, il n'est pas non plus possible d'en faire une identification spécifique (section 4.2.3.a), afin de voir si ces micro-organismes sont généralement associés à la minéralisation des carbonates, dans la documentation disponible sur ce sujet aujourd'hui.

5.1.3 L'environnement de genèse

Les travaux d'analyse des isotopes stables effectués sur une série d'échantillons par Lauriol et Clark (1998) et Sabourin (1997), indiquent que les calcrètes de fissures sont enrichies en $\delta^{13}\text{C}$ (valeurs variant entre 0 et +8,4‰), par rapport à la roche calcaire hôte (~0‰). Ces résultats suggèrent fortement que la reprécipitation des calcrètes de fissures aurait eu lieu sous les conditions anaérobies d'un environnement riche en matière organique et saturé en eau. Cette interprétation corrobore celle formulée au sujet de l'absence de luminescence, notée lors de l'observation des calcrètes de fissures en cathodoluminescence (section 4.5). Elles produiraient, en fait, une luminescence noire, puisqu'elles auraient évolué en présence d'une très grande quantité d'ions de substitution Fe^{2+} , soit dans un environnement très réducteur ou anaérobie. Les environnements très réducteurs sont généralement associés aux zones phréatiques, c'est-à-dire localisés sous la nappe phréatique, là où tous les pores de la roche sont complètement saturés en eau. Des conditions de réduction peuvent aussi être créées dans des zones localisées près de la surface, dans des zones vadoses, par la dégradation de la matière organique (McLane, 1995).

Les résultats obtenus lors des analyses isotopiques et de l'observation d'un échantillon de calcrète en cathodoluminescence, concordent aussi avec les observations faites sur le terrain. La roche des sites d'échantillonnage caractérisés par une abondance en calcrètes de fissures n'ayant pas subi d'altération apparente, est toujours humide. Le début de la genèse d'une calcrète de fissures se produit toujours à l'intérieur de fissures si fines (< 0.5 mm), que cette humidité doit suffire pour les saturer complètement en eau.

5.2 La croissance des calcrètes de fissures dans les pores de la roche

Les débuts de la genèse des calcrètes de fissures, à l'intérieur des pores de la roche, sont logiquement suivis d'une longue période de croissance discontinue, pouvant s'étendre, comme

l'indiquent les résultats de datation U/Th, sur plus de 82 000 ans. Les variations de pressions environnementales exercées par le milieu sur les calcrètes, auraient donc eu le temps nécessaire pour agir sur leur développement et être enregistrées dans leurs structures. Les résultats d'observations au microscope pétrographique optique, permettent de dresser un schéma général sur la forme des calcrètes de fissures, ainsi que les différents types de textures et de grains qui les composent. Bien que chaque composante, telle que les structures, les textures et la nature des grains de tous les échantillons de calcrètes étudiés, s'intègre à ce schéma général, nous notons que ces différentes composantes ne sont pas toutes systématiquement présentes dans chaque échantillon. Les calcrètes de fissures ne sont en effet pas toutes composées de six fabriques, dans lesquelles on observe 4 textures laminées et 5 textures non laminées. Il existe au contraire des variantes, dans la combinaison de ces différentes composantes d'un échantillon à l'autre, qui résultent probablement de variations des conditions environnementales, imposées par la localisation et par le temps. Est-il possible cependant de déterminer, à partir des données dont on dispose actuellement, quelles sont ces différents facteurs de l'environnement à l'origine des variantes que l'on observe dans les structures de nos échantillons? Voyons d'abord comment s'expriment ces variantes à l'intérieur des échantillons de calcrètes de fissures.

5.2.1 Les six fabriques

5.2.1.a La chronologie relative à la genèse de chacune des fabriques

Il a déjà été établi dans la section 4.3.1, que les six fabriques apparaissent toujours les unes après les autres dans l'ordre chronologique indiquée dans le tableau 4.3, et que chacune d'entre elles n'est pas toujours présente à l'intérieur d'un même échantillon.

L'analyse de l'abondance de chacune de ces fabriques par rapport aux différentes situations du versant sud de la montagne de Bear Cave, ainsi que des régions du Dempster Highway et de Joe Creek (tableau 4.6), ne révèle aucune tendance d'une localisation à l'autre. Deux successions temporelles de fabriques ont aussi été identifiées, mais un rapide coup d'œil au tableau 4.3, indique que toutes les fabriques associées à chacune des deux successions, ne sont encore une fois, pas toujours présentes. De plus, le calcul d'abondance de chacune des deux successions temporelles de fabriques, par rapport aux différentes localisations, ne révèle aucune tendance significative. Il semble donc que le développement de l'une ou l'autre des fabriques ou de l'une des deux

successions temporelles de fabriques, n'est pas relatif aux trois régions calcaires étudiées et n'est pas non plus relatif à la localisation sur le versant de la paroi rocheuse d'où provient l'échantillon.

Si l'on observe les cinq premières fabriques dans l'ordre chronologique de genèse (de la fabrique basale horizontale (I) jusqu'à la fabrique digitée (V)), on se rend compte que la surface disponible pour la précipitation d'une nouvelle couche de calcite aux extrémités supérieures de chacune d'entre elles, est de plus en plus étroite. C'est probablement ce facteur qui explique l'existence de la chronologie relative au développement de chacune des fabriques. La surface disponible étant de plus en plus étroite, les zones de précipitations préférentielles qui se forment sur ces surfaces, sont de plus en plus étroites elles aussi. Nous ne verrons jamais apparaître, par exemple, une série de nodules (II) aux extrémités d'une génération de fines colonnettes (IV).

5.2.1.b La vitesse de précipitation de la calcite

Nous croyons aussi que la superficie de la zone de précipitation préférentielle est liée à la vitesse de précipitation de la calcite. Ainsi, plus le processus de précipitation de la calcite se fait rapidement, moins la superficie de la zone de sédimentation préférentielle a le temps de prendre de l'expansion. Par exemple, si dans un échantillon on observe une série de nodules (II) surmontée immédiatement par une série de fines colonnettes (IV), cela signifierait que la vitesse de précipitation de la calcite aurait été plus rapide que dans le cas d'un échantillon, dont la série de nodules (II) serait surmontée par une série de larges colonnettes (III).

L'apparition des larges dômes (VI) sur l'extrémité supérieure d'une série de fines colonnettes (IV) ou de la fabrique digitée (V) serait, d'autre part, liée à un soudain ralentissement de la vitesse de précipitation. Les fines colonnettes et les tiges qui composent la fabrique digitée sont si nombreuses, et parfois si densément accolées les unes aux autres, que lorsque la vitesse de précipitation diminue, les zones de sédimentation préférentielle ont tout le temps nécessaire d'occuper complètement la surface disponible à l'extrémité des structures, pour éventuellement se joindre et se souder les unes aux autres.

5.2.1.c Succession de générations à l'intérieur d'une même fabrique

Il arrive parfois qu'une fabrique soit composée de plus d'une génération de structures (deux à quatre au maximum). Ce phénomène s'observe surtout à l'intérieur des colonnettes et des structures digitées. La fin d'une génération est reconnaissable lorsque les structures qui la composent se rejoignent par leurs extrémités et forment une couche de calcite horizontale plus ou

moins épaisse. Très souvent, cette couche de calcite est marquée par une phase d'altération ou de dissolution, avec une perte de la texture laminée par exemple et une nouvelle génération de la même fabrique s'installe par la suite sur la surface d'altération. Soulignons toutefois que la texture des structures change parfois d'une génération à l'autre. Cette transition entre deux générations peut aussi s'interpréter comme étant une phase de ralentissement ou d'arrêt de croissance de la calcrète, entre deux phases de croissance plus rapide.

5.2.2 Le néomorphisme dans les structures

Des évidences de néomorphisme, c'est-à-dire de transformation et de recristallisation des cristaux originaux à la précipitation primaire, sont abondantes à l'intérieur des fabriques des calcrètes de fissures. Mais avant de pousser l'explication plus loin, définissons d'abord ce qui distingue une texture altérée, d'une texture intacte ou originale. Comme nous l'avons déjà expliqué dans la section 4.3.2, neuf textures ont été identifiées dans les structures des calcrètes de fissures, dans lesquelles on observe des cristaux de micrite, de micro-sparite, de calcite fibreuse, de sparite et de grains détritiques, que l'on reconnaît par leur taille, leur forme et leur couleur distinctes. Chacune des textures se distingue par la nature et l'arrangement de ses composantes cristallines. McLane (1995) explique que les micrites sont des dérivés de débris organiques ayant subi une altération primaire et légère. Les cristaux de plus grosse taille, tels que les micro-sparites, la calcite fibreuse et les sparites, sont soit le produit de la précipitation chimique à l'intérieur des pores ou le produit de la recristallisation des grains de carbonates de plus petite taille (Folk, 1965). Suivant la logique de ces définitions, une texture est donc intacte ou primaire, si elle est composée d'une forte proportion de cristaux originaux à la précipitation primaire, et d'une proportion égale ou un peu plus faible, de cristaux résultant d'une recristallisation ou d'une transformation secondaire. Et, par opposition, une texture est altérée ou secondaire si elle est principalement composée de cristaux dérivant du phénomène de remplacement néomorphique des cristaux originaux à la précipitation primaire.

5.2.2.a. Origine et migration du néomorphisme dans les structures

Le néomorphisme à l'intérieur des calcrètes de fissures, se manifeste de diverses façons, tout dépendant de son origine. Le plus souvent, des bancs de remplacement néomorphique s'attaquent à la périphérie des structures, pour migrer vers l'intérieur (figure 4.4.D). Ce processus est facilement remarquable dans les fabriques à textures laminées, lorsque seul le cœur des structures qui compose

ces fabriques est toujours laminé, tandis que les couches périphériques sont composées de cristaux sub-anguleux et de couleur claire. La source du phénomène de remplacement néomorphique se trouve probablement dans l'espace qui existe à l'intérieur de la fissure.

On observe aussi des bancs de remplacement néomorphique qui avancent généralement vers la surface des calcrètes, à partir de la base. La limite qui sépare la zone intacte de la zone laminée est habituellement très bien définie (figures 4.4.A et 4.5.H), c'est-à-dire qu'il n'y a pas de gradation entre les deux zones. Ce phénomène est bien visible dans certains échantillons, alors que la base horizontale et le cœur des nodules sont complètement recristallisé, tandis que leur périphérie demeure intacte. Nous croyons, dans ce cas-ci, que la source du néomorphisme provient de la surface de croissance de la roche hôte.

5.2.2.b Les textures primaires

L'observation de la progression du néomorphisme à l'intérieur des fabriques, ainsi que des textures qui en résultent, permet aussi de classer chacune de ces textures selon qu'elles sont en phase primaire, secondaire ou au milieu d'un processus transitoire entre une texture primaire et une texture secondaire. Ainsi, les textures composées de laminations bien définies, telles que les textures 1, 2 et 3 décrites dans la section 4.3.2, sont habituellement observées dans les parties des fabriques qui ne sont pas en contact avec l'extérieur ou avec la roche. Elles sont donc localisées au cœur des plus jeunes fabriques ou dans la partie périphérique des plus anciennes et demeurent, pour une plus longue période de temps, à l'abri des influences chimiques provenant de l'extérieur et de la roche calcaire sur laquelle la calcrète s'est développée. Par conséquent, nous croyons que les textures laminées sont primaires.

5.2.2.c Les textures secondaires

Les textures 7, 8 et 9 sont non laminées. Les deux premières se ressemblent beaucoup et, par opposition aux textures laminées, elles sont généralement présentes dans la périphérie des plus jeunes fabriques, ainsi que dans la partie centrale des plus anciennes. On les observe aussi dans les zones horizontales d'arrêt de croissance entre deux générations et moins souvent dans les zones qui séparent deux différentes fabriques. Ces textures sont donc localisées dans les parties des fabriques les plus exposées à l'air ou étant le plus près du contact avec la roche calcaire. Elles ont, en toute logique, été les plus susceptibles de subir les influences chimiques provenant de l'extérieur ou de la roche. Les textures 7 et 8 seraient donc secondaires.

La texture 9 est toujours localisée dans la couche de calcite basale (I) et forme habituellement toute la couche ou une partie de la couche, soit celle qui est en contact avec la roche. Cette texture bien différente de toutes les autres, n'est probablement pas une texture appartenant aux calcrètes de fissures. Elle serait plutôt une veine de calcite qui se serait formée bien avant la calcrète dans la roche calcaire. À un moment donné, son contact avec la roche aurait été rompu, ce qui aurait laissé place à une fissure entre la veine de calcite et la roche. Avec le temps et si les conditions l'ont permis, une calcrète de fissures se serait développée sur la veine de calcite à l'intérieur de cette fissure. Nous avons d'ailleurs fait l'observation de ce phénomène dans certains échantillons de calcrète développés en partie sur une veine de calcite qui entre dans la roche (figure 5.3). Cette texture ne serait donc pas une fabrique de la calcrète, mais plutôt une fabrique secondaire de la roche calcaire.



Figure 5.3 : (C) Calcrète de fissure développée en partie sur une (V) veine de calcite qui entre dans (R) la roche hôte. La veine de calcite était sans aucun doute présente avant le développement de la calcrète de fissure (1 cm = 25µm).

5.2.2.d Les textures en phase transitoire

La texture 4 présente des laminations composées de micrite qui ressemblent à celles de la texture 1, mais qui apparaissent sous forme diffuse. Comme la texture 1, on l'observe généralement au cœur

des plus jeunes fabriques et moins souvent dans la périphérie des fabriques plus anciennes. Cette texture semble être une forme légèrement altérée de la texture 1, qui sera éventuellement transformée en texture 7 ou 8, selon le taux des inclusions détritiques de départ. Elle serait par conséquent une texture en phase transitoire entre la texture 1 en phase primaire et les textures 7 et 8 en phase secondaire.

La texture 6 non laminée serait, elle aussi, une texture en phase transitoire. Elle est généralement observée dans les extrémités supérieures des colonnettes, lorsque celles-ci forment la plus jeune fabrique. Dans ce cas, on remarque souvent des zones composées de la texture 3 au cœur de ces colonnettes. Elle est aussi présente dans les fabriques plus anciennes sous forme de bancs de recristallisation, qui avancent vraisemblablement du bas vers le haut dans la texture 3. Nous croyons que la texture 6 est une forme légèrement altérée de la texture 3, puisqu'elle est toujours accompagnée de la texture 3 et toujours localisée dans les parties des fabriques les plus en contact avec l'extérieur ou la roche. De plus, même si les laminations fibro-radiées de la texture 3 sont disparues, la texture 6 démontre, comme la texture 3, une extinction ondulante en lumière polarisante au microscope pétrographique optique.

L'observation de la migration des phénomènes de remplacement néomorphique des textures à l'intérieur des fabriques, nous permettant de croire que les textures 4 et 7 et/ou 8 seraient en fait des formes altérées de la texture originale 1, et que la texture 6 serait celle de la texture originale 3, coïncide avec les tendances remarquées au tableau 4.5. En effet, les maxima d'abondance de la texture laminée 1, lorsque l'abondance de la texture 3 est faible, sont toujours liés à des maxima d'abondance de textures non laminées 7 et/ou 8 dans les échantillons provenant des localisations « Crêtes ou falaise », « Entrées de cavernes ou porches » et « Tors de versant ». Tout comme les maxima d'abondance de textures laminées 3, lorsque l'abondance de la texture 1 est faible, sont dans ce cas toujours liés à des maxima d'abondance de texture non laminée 6 dans les échantillons provenant des localisations « Tors de sommet de montagne », « Surfaces inférieures de dalles exposées » et « Surfaces inférieures de roches enfouies ». De plus, si l'on observe les données brutes, c'est-à-dire les données compilées dans le tableau 4.3, on se rend compte que lorsque l'on a attribué plus d'une texture à une fabrique, les textures 1, 4 et 7 et/ou 8 se retrouvent très souvent à l'intérieur d'une même fabrique. Prenons, par exemple, l'échantillon B.E.A-1C, dont les nodules (II) sont composés des textures 1 et 8, et les larges colonnettes (III) des textures 1, 4 et 8. Ceci s'applique aussi aux textures 3 et 6, qui se retrouvent par exemple jumelées dans les dômes de

l'échantillon T.S.T.B-1 ou dans les nodules et les larges colonnettes des échantillons S.V.C.95 et C.-8.

Les résultats d'abondance des textures identifiées dans les échantillons provenant des sites du Dempster Highway et de Joe Creek, sont à première vue différents de ceux des catégories de sites du versant sud de la montagne de Bear Cave. Prenons d'abord le cas du Dempster Highway. On y observe des taux maximaux et de même valeur pour les textures laminées 1 et 3 et des taux presque égaux de textures non laminées 6, 7 et 8. Maintenant, si on revient aux données du tableau 4.3, on se rend compte que les fabriques des échantillons provenant des sites D.H.1 et D.H.2 sont composées majoritairement des textures 3 et 6, tandis que celles des échantillons provenant des sites D.H.3 et D.H.4, sont surtout composées des textures 1, 4 et 7 et/ou 8. En d'autres mots, si lors de nos calculs d'abondance nous avons divisé les sites du Dempster Highway en deux catégories, soit l'une comprenant les sites D.H.1 et D.H.2 et l'autre, les sites D.H.3 et D.H.4, nous aurions observé des tendances semblables à celles des différentes catégories de sites du versant sud de la montagne Bear Cave.

Tout comme pour les échantillons du Dempster Highway, on observe une abondance maximale des textures 1 et 3, parmi les textures laminées des échantillons de Joe Creek. Suivant le raisonnement du paragraphe précédent, en toute logique, nous aurions espéré comme pour les échantillons du Dempster Highway, faire l'observation des maxima d'abondance des textures non laminées 6 et 7 et/ou 8. Mais mis à part le 8,33% de la texture 9, seule la texture non laminée 7 a été observée. Si l'on se rapporte encore une fois aux données brutes du tableau 4.3, nous aurions, là aussi, espéré voir la texture laminée 1 jumelée à la texture non laminée 7, dans au moins une des 4 fabriques pour lesquelles on a noté plus d'une textures. Par conséquent, les données d'abondance des textures en plus des données brutes pour les échantillons de Joe Creek, ne suivent pas la tendance reconnue dans toutes les autres catégories de localisation de la montagne de Bear Cave et du Dempster Highway. Deux explications peuvent être à l'origine de ce problème. Nous n'avons d'abord analysé que trois échantillons de la région de Joe Creek, mais surtout, comme les textures notées dans le tableau 4.3 sont les textures considérées comme dominantes dans chacune des fabriques, il se peut que les textures 1 et 3 n'aient pratiquement pas subi d'altération, tandis que la texture 7 peut être le dérivé complètement altéré de la texture 1 originale.

Il est un peu plus difficile de déterminer à laquelle des phases primaire, transitoire ou secondaire, appartient la texture 5. Cette difficulté découle principalement de sa faible fréquence parmi les

données brutes. Cependant, nous croyons que la texture 5 est une phase transitoire entre une texture primaire et une texture secondaire, à cause de la présence de cristaux de micro-sparite grossiers comme composante dominante, par opposition à des zones concentrées en micrite. Il est encore plus difficile de déterminer de quelle forme primaire découle la texture 5 et vers quelle forme secondaire elle est destinée. N'ayant été noté que dans un seul échantillon, nous ne pouvons le déterminer par l'analyse des tendances du tableau 4.5, comme nous l'avons fait pour les textures 1, 3, 6, 7 et 8.

Il n'y a pas que la fabrique 5 qui est de faible fréquence parmi les données brutes. C'est aussi le cas des textures 2 et 9. Revenons, encore une fois, à l'argument mentionné au 4^e paragraphe de la section 4.3.2, dans lequel nous avouons la difficulté de faire l'exercice de la compilation de telles données et dans lequel nous soulignons que la ou les texture(s) notée(s) dans le tableau 4.3, est ou sont dominante(s) dans la fabrique observée. Ainsi, la faible fréquence des textures 2, 5 et 9 dans le tableau 4.3, ne signifie pas qu'elles aient été observées que dans un ou deux échantillons, mais qu'elles étaient rarement dominantes dans les fabriques des échantillons analysés.

5.3 Les conditions actuelles

Les observations notées lors des travaux d'échantillonnage dans la région de Joe Creek, sur la montagne de Bear Cave et le long du Dempster Highway, ne peuvent nous aider à comprendre quels sont les facteurs environnementaux responsables des variantes dans les structures, les textures et la nature des grains d'un échantillon à l'autre. Il semble que les facteurs responsables de ces variations dans les différentes composantes des calcrètes de fissures, ne sont pas liés à la localisation dans l'une ou l'autre de ces trois régions, pas plus qu'ils ne sont liés aux différentes catégories de situations sur le versant sud de la montagne de Bear Cave, que nous nous étions appliqués à faire au cours de l'été 1995.

Les échantillons qui proviennent des trois régions étudiées, devaient être soumis à des analyses isotopiques et être datés selon la méthode d'analyse $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$. Lors de notre échantillonnage, nous avons donc le souci de ramener des calcrètes de fissures bien développées et présentant le moins possible de traces de détérioration subséquente à leur développement. Ainsi, les 52 échantillons qui font l'objet de cette recherche, sont les plus beaux spécimens de chacun des sites échantillonnés et ne sont pas complètement représentatifs de ce que l'on a observé sur le terrain, au niveau de

l'abondance des calcrètes en bon état de conservation apparente, par rapport à celle des calcrètes en état de détérioration. Sur ce point, nous ne pouvons que nous fier à nos observations de terrain.

Les observations de terrain permettent surtout de définir quelles sont les conditions actuelles qui favorisent toujours leur développement, par rapport à celles qui ne le permettent plus. Dans cette dernière section du chapitre, nous ferons la description des différentes caractéristiques environnementales que l'on observe dans les sites qui favorisent toujours le développement des calcrètes de fissures, par rapport à celles des sites qui favorisent, au contraire, leur dégradation (tableau 4.1).

5.3.1 Le facteur thermique

L'exposition des surfaces rocheuses aux radiations solaires semble jouer un rôle primordial dans le développement des calcrètes de fissures. Dans les trois régions visitées, elles sont, sans exception, toujours localisées dans les fissures de la roche des versants d'exposition sud. L'échantillonnage des tors émergeant des versants sud des quatre sites du Dempster Highway, ainsi que celui de la montagne de Bear Cave, a aussi confirmé qu'elles sont pratiquement inexistantes dans les fissures des parois rocheuses de ces tors exposées au nord, tandis qu'elles sont très abondantes dans les parois exposées au sud. Enfin, les calcrètes de fissures se développent toujours sur la roche qui est la plus susceptible de subir le réchauffement des radiations solaires, non seulement par rapport à l'exposition, mais aussi par rapport à l'épaisseur de la roche sur laquelle elles se développent. On les retrouve donc toujours localisées sur les blocs de calcaire qui se détachent facilement du socle rocheux.

5.3.2 Caractéristiques de la roche hôte

Les travaux de terrain sur les versants d'exposition sud des trois régions étudiées, ont permis de noter des différences remarquables d'un site d'échantillonnage à l'autre, au niveau de l'abondance des calcrètes de fissures et de leur état de conservation ou de détérioration apparente.

Les calcrètes sont généralement très abondantes et ne démontrent pas de traces de dissolution apparentes, lorsque les fissures dans lesquelles elles se sont développées, sont fermées et humides.

Une fissure est dite « fermée », lorsque l'extrémité des structures de la plus jeune génération de fabrique, est en contact avec la paroi rocheuse (ou la surface d'alimentation) qui lui fait face à l'intérieur de la fissure. Une fissure est au contraire dite « ouverte », lorsqu'un espace de plus de 3 mm et dans lequel l'air peut circuler, sépare la plus jeune génération de fabriques de la paroi qui lui est opposée dans la fissure. Cette observation sur le terrain concorde avec les résultats d'observations au microscope pétrographique optique et d'analyses isotopiques, selon lesquels le micro-environnement propice à la croissance des calcrètes de fissures, serait un milieu fermé et saturé en eau. La fissure fermée ne laisserait place à aucune circulation d'air. Par conséquent, le micro-environnement de croissance des calcrètes demeurerait saturé en eau, ce qui permettrait aux processus de dissolution et reprécipitation de la surface d'alimentation de la fissure de se poursuivre normalement. D'autre part, les fissures ouvertes favoriseraient la circulation de l'air et donc l'assèchement de la roche du micro-environnement de croissance des calcrètes. Toutes les calcrètes observées dans des fissures ouvertes, se caractérisent par une altération évidente des délicates structures dont elles sont composées et par l'éclaircissement de la couleur d'origine. L'altération découle probablement d'une dissolution superficielle de la calcrète exposée à l'air ainsi qu'aux intempéries.

Puisque les calcrètes se développent à l'intérieur de fissures déjà présentes dans la roche, il est bien évident que le taux d'érosion de la roche est aussi un facteur important dans leur développement et leur conservation. La roche doit être assez fissurée pour permettre la présence de fissures et le développement initial des calcrètes. Mais elle doit aussi être assez solide pour donner le temps nécessaire à leur croissance. Nous avons remarqué que la rareté des calcrètes de fissures dans certaines façades d'exposition sud, est souvent liée à une roche calcaire trop massive et compacte. C'est le cas du site G.F.S 1996 de la montagne de Bear Cave, ainsi que des sites D.H.1 et D.H.2 du Dempster Highway (tableau 4.1). D'autre part, la rareté des calcrètes de fissures dans les parties hautes du site D.H.4 du Dempster Highway et du site J.C.1994 de la région de Joe Creek, est plutôt reliée à l'érosion trop active de la roche. La présence de la végétation autour des tors émergeant des versants sud est souvent l'indication d'un taux d'érosion adéquat au développement des calcrètes. Cette réalité est d'ailleurs frappante aux sites D.H.4 et J.C.1994, alors que contrairement aux parties hautes de ces deux sites dont l'érosion est trop active pour permettre le développement d'une végétation, les calcrètes sont abondantes dans leur partie basse où la végétation prolifère autour des tors échantillonnés.

5.3.3 Le corridor non englacé du Yukon

Comme il a déjà été mentionné, les recherches exercées dans divers environnements karstiques à travers le Yukon, n'ont pas permis de trouver des calcrètes de fissures au-delà des limites du territoire non englacé du Yukon. Si l'on tient compte de l'âge de 82 000 ans des échantillons datés, cette réalité n'est pas surprenante. Les calcrètes de fissures se seraient développées avant la dernière glaciation et ce territoire aurait ensuite été un excellent refuge contre l'action destructrice bien connue dans l'ensemble des régions nordiques, du passage des glaces au Quaternaire. D'autant plus que les calcrètes ne se développent pas à plus de 70 cm à partir de la surface externe de la roche.

Des croûtes de carbonates secondaires, correspondant à la description que nous faisons des calcrètes de fissures dans ce travail de recherche, n'ont été répertoriées ailleurs dans le monde, que dans le nord-est de Groënland (Adolphe et Loubière, 1987 ; Loubière, 1987). Les croûtes de carbonates secondaires se développant à l'intérieur des fissures de la roche-mère, semblent exclusivement associées aux régions nordiques. Pourtant, les environnements karstiques des régions tempérées offrent souvent des conditions d'érosion et d'ensoleillement pendant l'été, semblables à celles notées dans les sites où l'on retrouve les calcrètes de fissures en abondance. La principale différence réside dans la présence du pergélisol continu dans les régions nordiques, qui empêche le drainage de l'eau contenue dans la couche superficielle du sol, et permet en même temps la saturation des pores de la roche.

CONCLUSION

Les résultats de datation U/Th sur des échantillons de calcrètes de fissures suggèrent un âge de 82 000 ans. Elles se seraient donc développées avant l'envahissement par les glaces du Quaternaire de tout l'Amérique du Nord. Confinées à l'intérieur des limites du territoire non englacé du Yukon, elles auraient bénéficié de conditions périglaciaires tout au long de leur croissance.

Leur fort enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$, soutenu par le fait qu'elles démontrent une luminescence noire lorsqu'elles sont observées en cathodoluminescence, indique que leur développement serait favorisé par un milieu anaérobie et saturé en eau. Les observations sur le terrain ont d'ailleurs permis de constater que les spécimens, qui ne démontrent pas de traces de dissolution apparentes et dont le développement semble toujours actif, sont localisés à l'intérieur de fissures fermées et humides. Les calcrètes localisées à l'intérieur de fissures ouvertes présentent au contraire les traces d'une dissolution superficielle, puisqu'elles sont souvent de couleur blanchâtre, et que les délicates structures dont elles sont composées ont perdu leur forme originale.

Les fissures dans lesquelles se développent les calcrètes sont toujours composées d'une surface sur laquelle se développe la calcrète, soit la surface de croissance, ainsi que d'une surface qui fait face à la calcrète, que l'on appelle la surface d'alimentation. Tout porte à croire que la genèse des calcrètes serait le résultat du processus de dissolution du calcaire provenant de la surface d'alimentation, suivi de la reprécipitation des carbonates en solution sur la surface de croissance. Trois phénomènes sont à l'origine de cet hypothèse : 1) la couleur des calcrètes de fissures toujours actives est voisine de celle de la roche sur laquelle elles se développent, 2) on observe toujours l'empreinte du relief de surface des calcrètes sur la paroi opposée (surface d'alimentation) et enfin, 3) l'observation au microscope pétrographique optique du début de genèse de calcrètes à l'intérieur d'une mince fissure montre la dissolution partielle, suivie de l'intégration des plus grosses composantes détritiques (comprises dans la surface d'alimentation) à la calcrète en processus de développement.

Les observations au microscope pétrographique optique ont permis d'établir un schéma général des différentes structures, ainsi que des différents types de textures et de grains qui composent les calcrètes de fissures. Elles sont donc composées de six fabriques qui se développent les unes après

les autres selon un ordre chronologique. Il est aussi possible d'observer dans ces fabriques quatre textures laminées et cinq textures non laminées, dont chacune est caractérisée par la nature et l'agencement de ses cristaux. Chacune de ces composantes n'est cependant pas observée dans tous les échantillons de calcrètes étudiés, puisque d'un échantillon à l'autre, un nombre variable de fabriques et de textures manquent. Les variantes de structures et de composition observées d'un échantillon à l'autre, sont sans doute le résultat de variations à travers le temps, de l'intensité des facteurs environnementaux et de la disponibilité des ressources responsables de la cristallisation des carbonates en solution ou du remplacement néomorphique des cristaux de calcite qui composent les calcrètes de fissures.

Cependant, l'absence d'une ou de plusieurs fabriques et textures d'un échantillon à l'autre, ne semble pas être liée à la localisation dans l'une ou l'autre des trois régions étudiées dans cette thèse, pas plus qu'elle ne semble liée aux différentes catégories de situations sur le versant sud de la montagne de Bear Cave. L'analyse de l'abondance des fabriques et des textures observées dans les échantillons provenant des sites faisant partie de ces trois régions et de ces différentes catégories de localisation, n'a démontré aucune tendance significative. Par conséquent, l'hypothèse de recherche formulée au chapitre premier de cette thèse, selon laquelle :

« Les différences de conditions environnementales observées sur le terrain s'expriment dans les structures des échantillons de calcrètes de fissures prélevées dans trois régions localisées dans le territoire non englacé du Yukon, soit sur la montagne de Bear Cave, le long du Dempster Highway, ainsi que dans la région de Joe Creek. »

n'a pu être vérifiée. Ainsi, les caractéristiques environnementales notées à chacun des sites d'échantillonnage, qui concernent la localisation sur le versant, le degré de fissuration de la roche, l'abondance de la végétation dans l'environnement immédiat, l'abondance des calcrètes selon l'orientation de la face rocheuse, leur état de fraîcheur apparente, leur disposition dans les fissures, leur épaisseur générale, l'ouverture des fissures par rapport à leur épaisseur, ainsi que la présence ou non d'humidité dans les fissures, n'agissent pas sur la forme des micro-structures et les types de textures dont sont composées les calcrètes de fissures. Les facteurs environnementaux, qui agissent sur les micro-structures et le type de textures qui les composent, ne seraient donc pas des facteurs qui agissent à l'échelle régionale ou locale. Ils seraient plutôt des facteurs qui agissent à l'échelle

micro-environnementale et dont l'intensité et la disponibilité peut varier d'une fissure à l'autre à l'intérieur d'un même site d'échantillonnage.

Les données de terrain accumulées dans chacun des sites échantillonnés, nous permettent toutefois de faire la distinction entre les facteurs environnementaux qui favorisent, à l'échelle locale, le maintien d'une croissance active des calcrètes de fissures, par rapport à ceux qui sont responsables de leur dégénérescence. Le facteur thermique est d'abord le plus frappant lorsque l'on explore les environnements de croissance des calcrètes de fissures. Elles se développent effectivement en abondance dans la roche des façades d'exposition sud, tandis qu'elles sont quasi inexistantes ou complètement inexistantes dans les façades d'exposition nord. De plus, on les retrouve, toujours accolées aux blocs qui se détachent facilement du socle rocheux, soit celui qui est le plus susceptible d'être réchauffé. Ces deux observations impliquent qu'elles ont besoin de la chaleur générée par les radiations solaires. Le taux d'érosion de la roche est aussi un facteur important, étant donné que le processus initiateur de la genèse des calcrètes se produit à l'intérieur de fissures déjà présentes dans la roche. La roche doit donc être assez friable et fissurée pour permettre l'établissement des premières structures des calcrètes, mais assez massive aussi pour leur donner le temps nécessaire à leur développement et à l'atteinte d'épaisseurs moyennes aussi importantes que celles de nos échantillons. Les calcrètes de fissures sont, de plus, toujours actives si elles sont localisées à l'intérieur de fissures fermées et humides (probablement saturées en eau).

Cette dernière observation nous amène à discuter d'un facteur régional tout aussi important que les deux facteurs locaux mentionnés au paragraphe précédent, soit la présence du pergélisol. Le pergélisol empêche la percolation de l'eau vers les profondeurs du sous-sol, favorise la saturation des pores de la roche et, donc, la précipitation de la calcite à l'intérieur de ces pores. Ceci expliquerait l'absence des calcrètes de fissures telles que nous les décrivons dans cette thèse, dans les régions tempérées.

Modèle de genèse des calcrètes de fissures

Nous terminons cette thèse par la présentation d'un modèle de genèse des calcrètes de fissures, basé sur notre compréhension de la contribution des facteurs environnementaux au processus de croissance des calcrètes de fissures, et de la progression des composantes microscopiques à travers les différentes étapes de leur développement.

L'initiation de la genèse d'une calcrète de fissure nécessite au préalable, la combinaison d'un certain nombre de conditions de base. Ces conditions sont d'abord l'existence d'une mince fissure située dans les 70 premiers cm à partir de la surface externe d'une paroi de roche calcaire d'exposition sud. Cette paroi calcaire doit être localisée dans une zone de pergélisol continu et on doit pouvoir observer autour d'elle, une végétation relativement bien développée. Les deux surfaces internes de la mince fissure (surface de croissance et surface d'alimentation) sont généralement faites de la roche calcaire hôte. Mais il arrive parfois que la surface de croissance soit recouverte d'une veine de calcite déjà présente avant le début de la genèse de la calcrète. Son contact avec la roche calcaire aurait été rompu pour laisser place à une fissure entre elle et la roche.

Une fois toutes ces conditions rassemblées, la genèse de calcrètes de fissures devrait débiter de la façon suivante : La présence du pergélisol bloquerait d'abord la percolation de l'eau dans le sous-sol et serait responsable de la saturation en eau de la mince fissure. Étant donné la proximité du pergélisol, la surface d'alimentation et par conséquent l'eau comprise dans la fissure, demeurerait froides. Le contact de l'eau froide et de la surface d'alimentation serait ensuite responsable de la mise en solution des carbonates (de la surface d'alimentation). Durant la belle saison, la paroi rocheuse directement exposée aux intenses radiations solaires journalières, subirait un réchauffement qui serait transmis à la surface de croissance dans la fissure. Le contact de l'eau avec cette paroi chaude favoriserait ensuite la saturation de la solution, et finalement la reprécipitation des carbonates sous la forme d'une croûte de calcite secondaire horizontale.

Au fil du temps, les couches de calcite horizontales continuent de s'accumuler les unes sur les autres et des laminations brunes ou noires, selon le taux d'inclusion de matière organique, apparaissent. La première fabrique de la séquence des six fabriques identifiées dans ce travail, la couche de calcite horizontale (I), vient donc de se développer. À un certain moment, la couche de calcite basale se déforme en une série de renflements dans sa partie supérieure, pour donner naissance à la seconde fabrique, soit les nodules (II). Des pores circulaires se forment entre les petits nodules, alors que leur extrémité supérieure demeure en contact avec la surface d'alimentation dans la fissure. Ce contact est si étroit, qu'il est parfois difficile de distinguer la calcite secondaire de la roche hôte. Des zones de précipitation préférentielles plus étroites se forment ensuite sur le sommet des nodules et l'accumulation de la calcite sur ces étroites zones, provoque la genèse de tiges de calcite, que nous appelons les larges colonnettes (III), les fines colonnettes (IV) et la fabrique digitée (V). Une ramification des tiges peut se produire, lorsque les

zones de précipitation préférentielles se différencient en deux ou plusieurs zones. À mesure que le processus de reprécipitation se poursuit, des composantes détritiques appartenant à la surface d'alimentation sont complètement ou en partie dissoutes, puis intégrées aux structures de la calcrète.

Le diamètre des nouvelles structures qui se développent, est probablement fonction de la superficie de la surface disponible pour la création de nouvelles zones de précipitation préférentielle. Cette réalité serait à l'origine de la chronologie relative au développement de chacune des six fabriques identifiées dans les calcrètes de fissures. À partir de la fabrique de base horizontale (I), jusqu'à la fabrique digitée (V), les structures se caractérisent effectivement, par des diamètres de plus en plus étroits. La vitesse de précipitation de la calcite est aussi un facteur important et serait responsable de l'absence de certaines fabriques dans la séquence de l'ensemble des fabriques qui composent les calcrètes. Lorsque la précipitation se produit dans une courte période de temps, la superficie des zones de précipitation préférentielle a peu de temps pour prendre de l'expansion. Les tiges de la fabrique digitée peuvent, par exemple, se développer au sommet des nodules avant même l'apparition des larges colonnettes et des fines colonnettes. Lorsque la précipitation se déroule au contraire à une faible vitesse, les zones de précipitation ont alors tout le temps nécessaire pour augmenter leur superficie et les structures qui en résultent ont des diamètres plus importants. Si la vitesse de précipitation devient brusquement très lente et que les extrémités des structures sont rapprochées (souvent à cause des multiples ramifications des structures), les zones de précipitation localisées aux extrémités de chacune de ces structures, peuvent s'élargir au point de se joindre, puis se souder entre elles. Cette phase moins active peut être suivie d'une reprise de vitesse. Dépendant de la vitesse de précipitation de la calcite dans cette nouvelle phase de croissance, on voit alors apparaître soit une nouvelle génération de la fabrique qui précède cette phase moins active ou une nouvelle fabrique. La combinaison de deux facteurs explique l'apparition des dômes (VI) à la suite de la fabrique digitée dans la séquence temporelle. Les fines tiges, qui composent cette fabrique, sont généralement très ramifiées et leurs extrémités sont par conséquent très rapprochées les unes des autres. Lorsque la croissance de la calcrète subit une phase de ralentissement, les zones de cristallisation, dont le diamètre est déjà très étroit, n'ont à prendre que peu d'expansion pour se joindre entre elles et former les premières couches horizontales de la partie inférieure d'un dôme.

Les pores se forment entre les structures des différentes fabriques, lorsqu'un ralentissement de la croissance des calcrètes cause la fusion de l'extrémité des structures. Les pores peuvent ensuite se remplir, dans leur partie inférieure surtout, de grains détritiques ou de ciments. Ce phénomène

semble se produire une fois le développement de la calcrète complété, puisque l'on observe souvent le même type de ciment localisé à l'intérieur des pores d'une séquence de plusieurs fabriques d'un même échantillon.

BIBLIOGRAPHIE

- Adolphe, J.-P., Hourimèche, A., Loubière, J.-F., Paradas, J. and Soleilhavoup, F. (1991) Microorganisms and carbonated sediments (Continental formations in North Africa). *Journal of African Earth Sciences*, vol. 12, no. 1/2, p. 397-407.
- Adolphe, J.-P., Hourimèche, A., Loubière, J.-F., Paradas, J. et Soleilhavoup, F. (1989) Les formations carbonatées d'origine bactérienne. Formations continentales d'Afrique du Nord. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, vol. 8, no. 1, p. 55-62.
- Adolphe, J.-P. et Loubière, J.-F. (1987) Études préliminaire des calcins du nord-est Groenland. In : *Loess and Periglacial Phenomena*, Pesci, M. et French, H.M. (eds.). Akademia Kiado, Budapest, p. 275-283.
- Adolphe, J.-P. (1987) Les formations carbonatées continentales. In : *Géologie de la préhistoire : méthodes, techniques, applications*. Sous la direction de J.-C. Miskovsky, Géoprè, Paris, p. 197-224.
- André, M.F. (1991) *Dynamique actuelle et évolution Holocène des versants du Spitsberg*. Thèse, Université de Paris, Paris, 1.2 volumes, 653 p.
- Bamber, E.W., Henderson, B.C., Richards, B.C. et McGugan, A. (1991) Permien. (Stratigraphie carbonifère et permienne du Domaine de l'avant-pays). In : *Géologie de l'Orogénèse de la Cordillère au Canada*. Chap. 8, sous la direction de H. Gabrielse et C.J. Yorath, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 4, p. 283.
- Bunting, B.T. et Christensen, L. (1978) Micromorphology of calcareous crusts from the Canadian High Arctic. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, vol. 100, p. 361-367.
- Burn, C.R. (1994) Permafrost, tectonics and past and future regional climate change, Yukon and adjacent Northwest Territories. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 31, p. 182-191.
- Chafetz, H. and Buczynski, C. (1992) Bacterially Induced Lithification of Microbial Mats. *Palaos*, vol. 7, p. 277-293.
- Dijkmans, J.W.A., Koster, E.A., Galloway J.P. et Mook, W.G. (1986) Characteristics and origin of calcretes in a subarctic environment, Great Kobuk Sand Dunes, northwestern Alaska, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, vol. 18, no. 4, p. 377-387.
- Environnement Canada (1982) *Climatic Norms in Canada, 1951-1980. Temperature and Precipitation. Northern Yukon and Northwestern Territories*. Publication of Canadian Climatology Program, Ottawa, 55 p.
- Ferris, F.G. and Lowson, E.A. (1997) Ultrastructure and geochemistry of endolithic microorganisms in limestone of the Niagara Escarpment. *Canadian Journal of Microbiology*, vol. 43, p. 211-219.

- Folk, R.L. (1993) SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 63, no. 5, p. 990-999.
- Folk, R.L. (1965) Some aspects of recrystallization in ancient limestones. p. 14-48. *In* : Pray, L.C. and Murray, R.C. (eds), *Dolomitization and Limestone Diagenesis, a Symposium*, SEPM spec. Publ. 13, 180 p.
- Forman, S.L. et Miller, G.H. (1984) Time-dependent soil morphologies and pedogenetic processes on raised beaches, Bröggerhalvöya, Spitsbergen, Svalbard Archipelago. *Arctic and Alpine Research*, vol. 16, no. 4, p. 381-394.
- Gabrielse, M. (1975) Canadian Cordillera Region, Interior and Western Belts. *In* : *The Encyclopedia of World Regional Geology*, Part 1, Western Kenifts, p. 179-187.
- Gabrielse, H. et Yorath, C.J. (1991) Nord du Yukon. (Partie E. Domaine de l'Avant-Pays). *In* : *Géologie de l'Orogénèse de la Cordillère au Canada*. Chap. 17, sous la direction de H. Gabrielse et C.J. Yorath. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 4, p. 709-713.
- Ghaleb, B., Hillaire-Marcel, C., Deschamps, P., Lauriol, B. and Clark, I.D. (1997) U-Th systematics in high latitude interglacial/interstitial fissure calcretes - Examples from Bear Cave Mountain. *Proceedings, 2nd Arctic Workshop*, University of Ottawa, p. 80-83.
- Green, L.H. et Roddick, J.A. (1972) *Geology of Dawson, Yukon Territory*. Geological Survey of Canada, Carte 1284A, 1 : 250 000.
- Grotzinger, J.P. and Rothman, D.H. (1996) An abiotic model for stromatolite morphogenesis. *Nature*, vol. 383, p. 423-425.
- Hillaire-Marcel, C., Soucy, J.M. et Cailleux, A. (1979) Analyse isotopique de concrétions sous-glaciaires de l'inlandsis Laurentidien et teneur en oxygène 18 de la glace. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol. 16, no.7, p. 1494-1498.
- Hopkins, D.M. (ed.) (1967) *The Bering Land Bridge*. Stanford University Press, Stanford, 495 p.
- Hugues, O.L. (1972) *Surficial Geology of Northern Yukon Territory and Northwestern District of Mackenzie, Northwest Territories*. Geological Survey of Canada, Paper 69-36, 11 p.
- Hugues, O.L., Harington, C.R., Janssens, J.A., Matthews, J.V., Morlan, R.E.Jr., Rutter, N.W. et Schweger, C.E. (1981) Upper Pleistocene Stratigraphy, Paleoecology, and Archaeology of the Northern Yukon Interior, Eastern Beringia : 1. Bonnet Plume Basin. *Arctic*, vol. 34, no. 4, p. 329-365.
- Hugues, O.L., Rutter, N.W., Matthews, J.V.Jr. et Clague, J.J. (1989) Régions non englacées. (Stratigraphie et histoire du Quaternaire. Inlandsis de la Cordillère). *In* : *Le Quaternaire du Canada et du Groënland*. Chap. 1, sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 1, p. 71-73.
- Jones, B., Renault, R.W. and Rosen, M.R. (1997) Vertical zonation of biota in microstromatolites associated with hot springs, North Island, New Zealand. *Palaios*, vol. 12, p. 220-236.

- Jones, B. (1990) Genesis of terrestrial oncoids, Cayman Island, British West Indies. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, p. 382-397.
- Jones, B. and Motyka, A. (1987) Biogenic structures and micrite in stalagmites from Grand Cayman Island, British West Indies. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 24, p. 1402-1411.
- Klappa, C.F. (1979) Calcified filaments in Quaternary calcretes : organo-mineral interactions in the subaerial vadose environment. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 49, no.3, p. 955-968.
- Lauriol, B. and Clark, I.D. (1998) Fissure Calcretes in the Arctic : a Paleohydrologic Indicator. *Applied Geophysical*, sous presse.
- Lauriol, B., Ford, D. and Cinq-Mars, J., (1997) Tertiary and interglacial speleothems from Bear Cave, Ogilvie Mountains, northern Yukon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 34, p. 902-911.
- Lauriol, B., Clark, I.D., Hillaire-Marcel, C. et Ghaleb, B., (1996) Biogenic fissure carbonates from the Yukon. A new material to date climatic optimums and the last interglacial in the north. *Proc. Workshop on Climate History and Dynamics*, Canadian Geophysical Union Annual Meeting, May 5-11, Banff, Alberta.
- Lauriol, B., Duchesne, C. et Clark, I.D. (1995) Systématique du remplissage en eau des fentes de gel : les résultats d'une étude Oxygène-18 et Deutérium. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 6, p. 47-55.
- Loubière, J.-F. (1987) Observations préliminaires sur les cavités de la région du lac Centrum (nord-est Groënland). *Karstologia*, vol. 9, p. 7-16.
- Mackay, J.R. (1967) Permafrost Depth, Lower Mackenzie Valley, Northwest Territories. *Arctic*, Vol. 20, p. 21-60.
- Marlin, C. et Dever, L. (1995) Interactions des eaux-roches en milieux périglaciaires : exemples des carbonates secondaires de la Presqu'île de Brögger (Spitsberg). *Journal canadien des sciences de la terre*.
- Marlin, C., Dever, L. Vachier, P. and Courty, M.-A., (1993) Variations chimiques et isotopiques de l'eau du sol lors de la reprise en gel d'une couche active sur pergélisol continu (Presqu'île de Brögger, Svalbard). *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 30, p. 806-813.
- McLane, M. (1995) *Sedimentology*. Oxford University Press, Oxford, 423 p.
- Miller, J. (1988) Cathodoluminescence Microscopy. In : *Techniques in Sedimentology*. Chap. 6. Tucker, M.E. (eds.). Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 174-190.
- Morrow, D.W. et Geldsetzer, H.H.J. (1991) Séquence de Bear Rock-Stone (Emsien-Eifélien précoce). (Assemblages du Dévonien Inférieur et Moyen). In : *Géologie de l'Orogénèse de la Cordillère au Canada*. Chap. 7, sous la direction de H. Gabrielse et C.J. Yorath. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 4, p. 221-228.

- Norris, A.W. (1996) Devonian. In : *The Geology, Mineral and Hydrocarbon Potential of Northern Yukon Territory and Northwestern District of Mackenzie*, Chap. 7, Norris, D.K. (eds.). Geological Survey of Canada, Bulletin 422, p. 163-200.
- Norris, D.K. (1972) En échelon folding in the northern Cordillera of Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 20, p. 634-642.
- Ortman, B.H. (1981) *Geology of the Blow River and Davidson Mountains, Yukon Territory - District of Mackenzie*. Geological Survey of Canada, Carte 1516A, 1 : 250 000.
- Ortman, B.H. (1981) *Geology of Porcupine River, Yukon Territory*. Geological Survey of Canada, Carte 1522A, 1 : 250 000.
- Ortman, B.H. (1982) *Geology of Ogilvie River*. Geological Survey of Canada, Carte 1526A, 1 : 250 000.
- Pelczar, M.J.Jr., Chan, E.C.S. and Krieg, N.R. (1986) *Microbiology*. Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 918 p.
- Richards, B.C., Bamber, E.W. and Utting, J. (1996) Upper Devonian to Permian. In : *The Geology, Mineral and Hydrocarbon Potential of Northern Yukon Territory and Northwestern District of Mackenzie*, Chap. 8, Norris, D.K. (eds.). Geological Survey of Canada, Bulletin 422, p. 201-251.
- Ritchie, J.C., Cinq-Mars, J. et Cwynar, L.C. (1982) L'environnement tardiglaciaire du Yukon septentrional, Canada. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. XXXVI, no. 2, p. 241-250.
- Ritchie, J.C. (1984) *Past and Present Vegetation of the Far Northwest of Canada*. University of Toronto Press, Toronto, 251 p.
- Ryder, J.M. (1989) Climat (Cordillère canadienne). In : *Le Quaternaire du Canada et du Groënland*, Chap. 1, sous la direction de R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 1, p. 29-32.
- Sabourin, L. (1997) *Climate Change in the northern Yukon Territory : Isotope Analysis of Fissure Calcretes*. Undergraduate Thesis, University of Ottawa, Ottawa, 51 p.
- Swett, K. (1974) Calcrete crusts in an Arctic permafrost environment. *American Journal of Science*, vol. 274, p. 1059-1063.
- Trewin, N. (1988) Use of the Scanning Electron Microscope in Sedimentology. In : *Techniques in Sedimentology*, Chap. 8, Tucker, M.E. (eds.). Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 229-273.
- Walter, M. (1996) Old fossils could be fractal frauds. *Nature*, vol. 383, p. 385-386.
- Wright, V.P. et Tucker, M.E. (1991) *Calcretes*, Blackwell Scientific Publications, Osney Mead, Oxford, p. 1-24.