

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. Each original is also photographed in one exposure and is included in reduced form at the back of the book.

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.

UMI

A Bell & Howell Information Company
300 North Zeeb Road, Ann Arbor MI 48106-1346 USA
313/761-4700 800/521-0600

NOTE TO USERS

The original manuscript received by UMI contains pages with indistinct print. Pages were microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available

UMI



Université d'Ottawa • University of Ottawa

**RELATIONS ENTRE LES DIVERSES CONCRÉTIONS CAVERNICOLES
DANS LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS QUÉBÉCOIS
ET DE LA HAUTE GATINEAU**

**THÈSE DE MAÎTRISE SOUMISE À
L'ÉCOLE DES ÉTUDES SUPÉRIEURES ET DE LA RECHERCHE**

**PAR
SONIA-GABRIELLE VIGNEUX**

**DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE
UNIVERSITÉ D'OTTAWA
JUILLET, 1998**



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.

0-612-36753-3

Canada

RÉSUMÉ

Soixante-douze échantillons de concrétions cavernicoles, prélevés dans 10 cavernes de la région du sud-ouest du Québec, ont été analysés afin de 1) établir s'il y a des liens spatio-temporels entre les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours, et 2) déterminer si les dépôts de lait de lune sont des spéléothèmes ou simplement un état de la calcite. Nos résultats d'analyses démontrent clairement la présence de zones de transitions, se traduisant par une continuité spatio-temporelle entre les caractéristiques sédimentologiques des diverses concrétions. De plus, la présence de couches possédant les particularités des dépôts de lait de lune à l'intérieur des échantillons de botryoïdes et de micro-gours, ainsi que les similitudes morphologiques entre les concrétions de lait de lune et les spéléothèmes communs, proposent que le lait de lune n'est pas un spéléothème en lui-même, mais plutôt une composante occasionnelle des spéléothèmes.

ABSTRACT

Seventy-two samples of cavernous concretions collected in 10 caves from the South-West of Quebec, were analyzed in order to 1) establish if there was spatiotemporal bonds between moonmilk, popcorn and rimstones, and 2) determine if moonmilk is a speleothem or simply a state of calcite. The results of our analyses clearly show the presence of transition zones, which translate in a space-time continuum between the sedimentary characteristics of the divers concretions. The presence of layers showing moonmilk particularities in popcorn and rimstone samples, and the morphological similitude between moonmilk deposits and common speleothems, suggest that moonmilk is not a speleothem by itself, but an occasional component of speleothems.

REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont participé directement ou indirectement à la réalisation de cette thèse. Premièrement, j'aimerais remercier chacun des membres de mon comité de thèse, particulièrement le Dr. Marie-Anne Geurts, pour la confiance qu'elle m'a témoignée dès le début de mes recherches, de l'appui qu'elle m'a apporté tout au long de l'élaboration de ma thèse, et pour ses recommandations qui m'ont permis de bien cerner mon sujet. Je voudrais aussi exprimer ma gratitude au Dr. Bernard Lauriol qui par son expertise sur les phénomènes karstiques et nos multiples discussions sur mon sujet m'ont fait mieux comprendre certains aspects qui m'étaient moins familiers. Je voudrais aussi remercier le Dr. Daniel Lagarec pour ses précieux conseils autant sur le contenu que sur la forme, ce qui m'a permis de bien distinguer la méthodologie versus méthodes et techniques, et qui m'a appris à ne pas avoir peur des mots.

Je voudrais aussi souligner l'aide technique que m'a apporté Georges Mrazek, du département de géologie de l'Université d'Ottawa, pour la préparation des lames minces qui ont servi aux analyses pétrographiques. Ainsi que Ronald Hartree, également du département de géologie de l'Université d'Ottawa, pour la diffraction aux rayons X des échantillons et pour son aide inestimable lors de l'analyse des résultats.

J'aimerais souligner le support moral que m'ont apporté mes collègues du département de géographie de l'Université d'Ottawa, et un gros merci à Éric Deschamps pour son aide sur le terrain, et pour être le meilleur ami dont j'avais besoin.

Je veux aussi remercier ma soeur Suzie, pour le traçage des coupes sur la carte de localisation, et surtout pour m'avoir donné une merveilleuse nièce, Emmanuelle, en cadeau de fin de thèse.

Finalement, je voudrais dédier cette thèse à mes parents en reconnaissance pour leur support financier, les multiples phrases d'encouragement et leur patience que j'ai mise à grandes épreuves.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
CHAPITRE I: INTRODUCTION	1
CHAPITRE II: RÉGION À L'ÉTUDE	3
2.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE	3
2.2 GÉOLOGIE DE LA RÉGION	3
2.3 CLIMAT ET VÉGÉTATION DE LA RÉGION	4
2.4 PHÉNOMÈNES KARSTIQUES	6
CHAPITRE III: PROBLÉMATIQUE	7
CHAPITRE IV: CADRE THÉORIQUE	8
4.1 LAIT DE LUNE	8
4.1.1 HISTORIQUE	8
4.1.2 DU "LAIT DE GNOMES" AU "LAIT DE LUNE"	10
4.1.3 ÉVOLUTION DES HYPOTHÈSES DE GENÈSE	12
4.1.4 DÉFINITION	15
4.2 BOTRYOÏDES	17
4.3 MICRO-GOURS	18
CHAPITRE V: MÉTHODOLOGIE, MÉTHODES ET TECHNIQUES	20
5.1 MÉTHODOLOGIE	20
5.1.1 MÉTHODES SUR LE TERRAIN	20
5.1.2 MÉTHODES EN LABORATOIRE	21
5.2 TECHNIQUES	22
5.2.1 TERRAIN	22
5.2.1.1 PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT	22
5.2.1.2 DESCRIPTION DES DÉPÔTS	23

CHAPITRE VIII: CONCLUSION	86
BIBLIOGRAPHIE	89
ANNEXE A: MATRICES DES DONNÉES CLIMATIQUES POUR LES STATIONS CHELSEA ET MONT LAURIER	96
ANNEXE B: DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES ÉCHANTILLONS ET LEUR LOCALISATION DANS LES SITES	101
ANNEXE C: SPECTRES DE DIFFRACTION AU RAYON-X	111
ANNEXE D: LISTE DES ÉCHANTILLONS POUR LES ANALYSES PÉTROGRAPHIQUES	123

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1:	CLIMATOGRAMMES ISSUES DES NORMALES MENSUELLES CALCULÉES PAR ENVIRONNEMENT CANADA, POUR LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DE CHELSEA ET DE MONT LAURIER	5
FIGURE 2.2:	SUBDIVISION DE LA FORÊT FEUILLUE DANS LA RÉGION À L'ÉTUDE. ADAPTATION DE LA CARTE DU MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1990.	5
FIGURE 5.1:	SCHÉMAS DÉMONTRANT LES DIMENSIONS MESURÉES POUR CHACUN DES TYPES DE CONCRÉTIONS. A: LAIT DE LUNE B: DIVERS BOTRYOÏDES C: MICRO-GOUR	23
FIGURE 6.1:	DIAGRAMME DE CLASSIFICATION DES CONCRÉTIONS SELON LEUR MORPHOLOGIE	36
FIGURE 6.2:	MODELES DE DISPOSITION DE CONCRÉTIONS APPARTENANT À UNE MÊME FAMILLE. A: LAITS DE LUNE B: BOTRYOÏDES C: MICRO-GOURS	46
FIGURE 6.3:	SCHÉMA DÉMONTRANT L'AGENCEMENT SPATIAL DES CONCRÉTIONS LORSQU'IL Y A COEXISTENCE DES TROIS GRANDES FAMILLES DANS UN MÊME SITE ...	46
FIGURE 6.4:	ÉTAT DU LAIT DE LUNE BASÉ SUR LA TENEUR EN EAU.	50
FIGURE 6.5:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 1	59
FIGURE 6.6:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 2	59
FIGURE 6.7:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 3	59
FIGURE 6.8:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 4	60
FIGURE 6.9:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 5	60
FIGURE 6.10:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 6	60
FIGURE 6.11:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 7	61
FIGURE 6.12:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 8	61

FIGURE 6.13:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 9	62
FIGURE 6.14:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 10	62
FIGURE 6.15:	MICRO-FABRIQUE DE TYPE 11	63
FIGURE 6.16:	IMAGES EFFECTUÉES AU MICROSCOPE À BALAYAGE ÉLECTRONIQUE MONTRANT A: DES AIGUILLES DE CALCITE (WSON 3-A) B: DE LA CALCITE PLUMEUSE (MOUL 1-C) ET C: DES CHAÎNES RHOMBOÉDRIQUES (PIER 3-A)	69
FIGURE 6.17:	SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE POUDREUSE (MOUL 1-B). ON PEUT REMARQUER L'ASPECT NUAGEUX DE LA MICRITE GÉLATINEUSE, AINSI QUE PLUSIEURS INCLUSIONS NON CALCITQUES ET QUELQUES DÉBRIS ORGANIQUES (FLÈCHE) ENFOUIS DANS LA MICRITE	70
FIGURE 6.18:	SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE SABLEUSE (FLÈCHE) FORMANT DES POCHES D'INCLUSIONS NON CALCITQUES À L'INTÉRIEUR DU DÉPÔT (PIER 3-A)	70
FIGURE 6.19:	SCHÉMAS DE LA MICRO-STRUCTURE GLOBULEUSE. A: MICRITE GÉLATINEUSE ORGANISÉE EN AMAS RELIÉS PAR DES PONTS MICRITQUES (WSON 4-A). B: MICRITE FILAMENTEUSE TRÈS POREUSE (WSON 3-A)	70
FIGURE 6.20:	SCHÉMAS DE LA MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE. A: SRATIFICATION MICRITIQUE TRÈS DENSE (FLÉ 1-A) B: STRATIFICATION MICRITIQUE FIBREUSE (OUR 6-A)	71
FIGURE 6.21:	SCHÉMAS MONTRANT LA MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE. A: MOSAÏQUE DE CALCITE (CENTRE GAUCHE) ET CALCITE PALISSADIQUE (CENTRE DROIT) (MINE 2-G) B: MÉLANGE DE CALCITE EN PLAQUETTES, AIGUILLES ET CHAÎNES RHOMBOÉDRIQUES BAINANT DANS UNE GANGUE MICRITIQUE TRÈS DENSE (MOUL 1-C)	71
FIGURE 6.22:	SCHÉMA MONTRANT LA MICRO-STRUCTURE VELOUTÉE, COMPOSÉE D'UNE STRATIFICATION MICRITIQUE GÉLATINEUSE CONTENANT DES CRISTAUX SPATHIQUES DE CALCITE PLUMEUSE (MKZI 3-A)	72
FIGURE 6.23:	SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE FIBREUSE COMPOSÉE ENTIÈREMENT D'AIGUILLES DE CALCITE TRÈS DENSES (OUR 6-A)	72

FIGURE 6.24:	SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE FEUILLETÉE MONTRANT LA PÉTRO-STRUCTURE ACICULAIRE POREUSE (WSON 3-A)	73
FIGURE 6.25:	SCHÉMAS MONTRANT DES EXEMPLES DE PÉTRO-STRUCTURES ASSOCIÉES À LA MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE. A: FILAMENTS SPATHIQUES ET SPATH POREUX (WSON 4-A) B: STRATIFICATION POREUSE D'AIGUILLES DE CALCITES EN TREILLIS ET DE PLAQUETTES DE CALCITES (WSON 5-A)	73
FIGURE 6.26:	SCHÉMAS DÉMONTRANT DES ZONES DE TRANSITIONS GRADUELLES. A: PASSAGE GRADUEL DE MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE (MICRITE SITUÉE EN HAUT) À LA MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE (BAS) (WSON 4-A) B: PASSAGE GRADUEL ENTRE LES MICRO-STRUCTURES: VELOUTÉE (PARTIE SUPÉRIEURE), SPONGIEUSE (PLAQUETTES DE CALCITE) ET LISSE TRANSLUCIDE (DU CENTRE EN DESCENDANT) (MOUL 1-C) C: STRATIFICATION MICRITIQUE DE LA MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE (OUR 5-A)	74
FIGURE 6.27:	SCHÉMAS DES ZONES DE CONTACT ENTRE LES MICRO-STRUCTURES COMPOSANT L'ÉCHANTILLON WSON 5-A, A: DÉMONTRANT UNE DISCONTINUITÉ ENTRE LES PÉTRO-STRUCTURES ET B: LES ZONES DE TRANSITION OBSERVÉES DANS UNE AUTRE SECTION DE LA LAME	75
FIGURE 6.28:	SCHÉMAS MONTRANT CERTAINS CARACTÈRES PARTICULIERS DE LA SUBSTANCE VISQUEUSE. A: STRATIFICATION PARALLÈLE B: RÉSEAUX DENDRITIQUES C ET D: FORMES PARTICULIÈRES E: FORMATIONS PALISSADIQUES. (A ET B: PIER 3-A; C ET D: MOKI 2-A; E: OUR 5-A)	76
FIGURE 6.29:	SCHÉMAS MONTRANT DES CARACTÉRISTIQUES DE LA SUBSTANCE INCONNUE. A: GAINÉ ENTOURANT DES CRISTAUX DE LA ROCHE SOUS-JACENTE (MKZI 2-A) B: STRATE AU CONTACT DE LA ROCHE SOUS-JACENTE (ÎLE 2-D) C: STRATE AU CONTACT DE LA ROCHE SOUS-JACENTE ET FORMATIONS FIBREUSES TRÈS COMPACTES (FLÈCHES) (CASC 1-A) D: FORMATIONS DENDRITIQUES (MINE 2-F)	76

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4.1:	HISTORIQUES DU LAIT DE LUNE	9
TABLEAU 4.2:	SYNONYMES DU LAIT DE LUNE ENCORE UTILISÉS AUJOURD'HUI SELON LA LANGUE PARLÉE	11
TABLEAU 4.3:	LES DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES DE GENÈSE POUR LE LAIT DE LUNE	12
TABLEAU 6.1:	DESCRIPTION DES SITES PAR CAVERNE	30
TABLEAU 6.2:	LISTE DES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS	34
TABLEAU 6.3:	COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE LAIT DE LUNE	37
TABLEAU 6.4:	COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE BOTRYOÏDES	40
TABLEAU 6.5:	COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE MICRO-GOURS	42
TABLEAU 6.6:	FRÉQUENCE ABSOLUE DES DIVERS SPÉLÉOTHÈMES SELON LEUR LOCALISATION	43
TABLEAU 6.7:	FRÉQUENCE RELATIVE (%) DES DIVERS SPÉLÉOTHÈMES SELON LEUR LOCALISATION	44
TABLEAU 6.8:	COMPILATION DES PARAMÈTRES DE LOCALISATION	44
TABLEAU 6.9:	TENEUR EN EAU POUR LES ÉCHANTILLONS ET SOUS-ÉCHANTILLONS DE LAIT DE LUNE	49
TABLEAU 6.10:	TENEUR EN EAU DES BOTRYOÏDES	53
TABLEAU 6.11:	TENEUR EN EAU DES MICRO-GOURS	55
TABLEAU 6.12:	COMPILATION DES ÉCHANTILLONS COMPOSÉS D'UN SEUL TYPE DE MICRO-STRUCTURE	58
TABLEAU 6.13:	COMPILATION DES RÉSULTATS DES ANALYSES AUX RAYON X	65

CHAPITRE I: INTRODUCTION

Les milieux souterrains sont des environnements aux richesses infinies, dont plusieurs restent à exploiter. La compréhension de la genèse d'une caverne et de son fonctionnement, peut aider à mieux comprendre certains aspects des phénomènes similaires que l'on trouve à la surface. Les cavernes sont des milieux propices à l'étude de divers phénomènes géomorphologiques dû à la stabilité relative des paramètres environnementaux. Les variations saisonnières climatiques et hydrologiques y sont minimisées. Bien qu'à l'échelle de temps géologique on observe des changements majeurs dans les conditions cavernicoles, ils sont plus lents et moins drastiques qu'à la surface. Les réseaux souterrains sont à l'abri des processus d'érosion telle la météorisation, très actifs à l'extérieur, ce qui permet la préservation des spéléothèmes et autres formations que l'on y retrouve. Il est donc possible de retracer l'historique des processus impliqués dans la spéléogenèse.

Plusieurs études ont été faites sur des spéléothèmes communs traitant principalement de leur mode de formation et leurs caractéristiques minéralogiques. Aujourd'hui, les questions génétiques sur ces formations semblent être élucidées, et on utilise de plus en plus ces spéléothèmes à des fins d'analyses paléoclimatiques. Cependant, les spéléothèmes de type botryoïdes et micro-gours ont été boudés. En fait, les hypothèses de leur genèse, datant du milieu du siècle, semblent largement acceptées et le fait qu'ils soient relativement petits leurs valent une simple mention dans les ouvrages, accompagnée d'une brève description. Par contre, les concrétions de lait de lune posent encore plusieurs énigmes. Bien que les laits de lune aient éveillé la curiosité, les nombreuses recherches sur ce sujet n'apportent aucune réponse précise au caractère mystérieux de cette substance aux multiples facettes.

La nomenclature des concrétions est claire en ce qui concerne les spéléothèmes communs tels les stalagmites, stalactites, draperies, ...etc, ainsi que pour les micro-gours. En ce qui concerne les dépôts de lait de lune, la confusion terminologique est plus ou moins réglée, bien que les auteurs n'ont pas encore fait le point sur la question de la composition minéralogique. Par contre, le vocabulaire des concrétions globuleuses est ambigu. Certains auteurs parlent de champignons, d'autres de boutons, de pop-corns, de globulites ou de coraux, pour désigner l'ensemble des morphologies. Afin de dissiper la confusion, le terme

générique botryoïde¹ est proposé dans le cadre de cette thèse.

Les recherches sur les formations cavernicoles sont concentrées sur un seul type de concrétion à la fois. Aucune étude n'a encore été faite sur les relations possibles entre les diverses concrétions à l'intérieur d'une cavité. Peu d'auteurs se sont arrêtés sur les phénomènes d'associations. Quelques uns ont cité cette éventualité, mais ne l'ont appuyé d'aucune étude appropriée. Pourtant, les concrétionnements monotypiques dans une caverne sont rares. Le but de cette étude est donc de remédier à cette lacune, tout en apportant plus de précisions sur certaines caractéristiques de trois types de concrétions, soit les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours.

Nous avons concentré notre étude aux concrétionnements cavernicoles qui ornent les souterrains de l'ouest du Québec. Dans le prochain chapitre, nous donnons une brève description géographique, géologique et climatique de la région à l'étude, ainsi qu'un résumé des hypothèses de spéléogenèse des cavités qui s'y trouvent. Le chapitre 3 est consacré aux hypothèses de recherches constituant la problématique de cette thèse. Le chapitre 4 constitue un survol des connaissances actuelles concernant chacun des trois types de concrétions communs dans la région. Le chapitre 5 comporte l'approche méthodologique, ainsi que les méthodes et techniques utilisées pour effectuer cette étude. Le chapitre 6 porte sur l'analyse des résultats des diverses observations et mesures effectuées dans le cadre de cette recherche, suivi d'une discussion au chapitre 7 et de la conclusion au chapitre 8.

1: Adjectif signifiant en forme de grappe de raisin (Foucault et Raout, 1995). Utilisé comme nom dans la littérature spéléologique pour désigner des concrétions globuleuses formant parfois des grappes de globulites.

CHAPITRE II: RÉGION À L'ÉTUDE

2.1 SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La région à l'étude couvre une grande partie de l'Outaouais québécois et de la Haute Gatineau. Elle forme un couloir nord-sud, délimité par la route 117 au nord et par la rivière des Outaouais au sud. Les frontières est et ouest sont tracées par le parc Papineau-Labelle et l'axe Maniwaki-Quyon respectivement (voir carte de localisation en pochette). Les cavernes de cette région sont creusées dans les marbres de la province géologique du Grenville. Elles varient en longueur de quelques mètres à près de 500 m et leur dénivellation ne dépasse pas les 30 m. La plupart de celles-ci sont encore actives ou partiellement actives, à quelques exceptions près (Masham, Wilson, la Mine et Lafèche).

2.2 GÉOLOGIE DE LA RÉGION

La province du Grenville est considérée comme une zone mobile polycyclique d'âge Protérozoïque supérieur qui a pris fin il y a environ 950 Ma (Hocq, 1994). Le corridor Ottawa - Mont Laurier se situe dans la subdivision allochtone monocyclique de la province du Grenville (Rivers et al, 1989), plus précisément dans la ceinture centrale des métasédiments d'âge néohélien (Wyne-Edwards, 1972). Dans la région à l'étude, le Supergroupe du Grenville se compose principalement de marbres, de roches calcaire-silicatées, de paragneiss et d'amphibolites (voir carte géologique en pochette). L'association quartz-calcite observable dans les marbres de la séquence métasédimentaire laisse supposer que leur métamorphisme n'a pas dépassé 700-800 °C (Winkler, 1979). Toutes les cavernes qui se trouvent dans cette partie du Bouclier Canadien se sont développées à l'intérieur de ces calcaires cristallins, pauvres en magnésium, à grains moyens, de faible cohésion et rarement purs (Trudel, 1988). La présence des multiples minéraux accessoires dont l'albite (Girault et Ledoux, 1990) et l'apatite (Hogarth et Moors, 1972) en quantités considérables, les quelques pourcentages de graphite, de serpentine et de phlogopite, ainsi que les traces

de diopside, de fostérite, de trémolite, de titanite, de pyrite et de chalcopryrite, suggèrent que ces marbres se sont formés à partir d'une séquence sédimentaire calcaire de milieux de plate-forme continentale (Dupuy, 1992).

Toutes les cavités qui se trouvent dans cette section du Supergroupe de Grenville se sont développées dans des lambeaux de ces calcaires sédimentaires marmorisés. Lors de la visite de ces milieux souterrains, on peut facilement observer plusieurs intrusions résiduelles mises en relief par la spéléogénèse, phénomène qui a été souligné par plusieurs auteurs. Ces injections sont de natures diverses dont notamment des pegmatites, des gneiss à biotite, des pyroxénites (Bourdon, 1976), des filons de micas (phlogopite et biotite), des injections de graphites (Caron et al, 1976), des quartzites (Lamarre, 1976) et des gabbros (Comtois, 1976). En surface elles sont mises en relief par l'altération, et leur taux de déchaussement a été évalué à 1 mm/an (Prévost, 1991).

2.3 CLIMAT ET VÉGÉTATION DE LA RÉGION

Le sud-ouest québécois est caractérisé par un climat tempéré, où règne la forêt feuillue. La région de l'Outaouais québécois et de la Haute-Gatineau se trouve au coeur de la zone Dfb de la classification climatique de Köppen, qui se définit par des températures inférieures à -3°C en hiver et supérieures à 10°C en été, ainsi que des précipitations annuelles variant de 500 à 1000 mm (Ahrens, C. D., 1991).

Selon les données récoltées par Environnement Canada dans les stations météorologiques qui se trouvent le long de l'axe Hull - Mont Laurier, nous pouvons observer une légère baisse des températures ainsi qu'une mince augmentation des précipitations annuelles, du sud vers le nord. Comme le démontrent les climatogrammes (fig.2.1) des stations de Chelsea, situé au sud de la région, et de Mont Laurier au nord (voir carte de localisation), les normales mensuelles de températures² varient de -11.5 à 20.5°C avec une moyenne annuelle de 5.5°C pour Chelsea, et de -13.6 à 18.1°C avec une moyenne annuelle de 3.4°C pour Mont Laurier. Les normales mensuelles de précipitations varient de 67.4 à 92.7 mm pour Chelsea et de 62.2 à 101.4 mm pour Mont Laurier, donnant des précipitations totales annuelles de 955.8 mm et 1001.6

2: Les normales de températures et de précipitations ont été établies sur trente ans, entre 1961 et 1990.

mm respectivement (les matrices des données mensuelles par années se trouvent à l'annexe A).

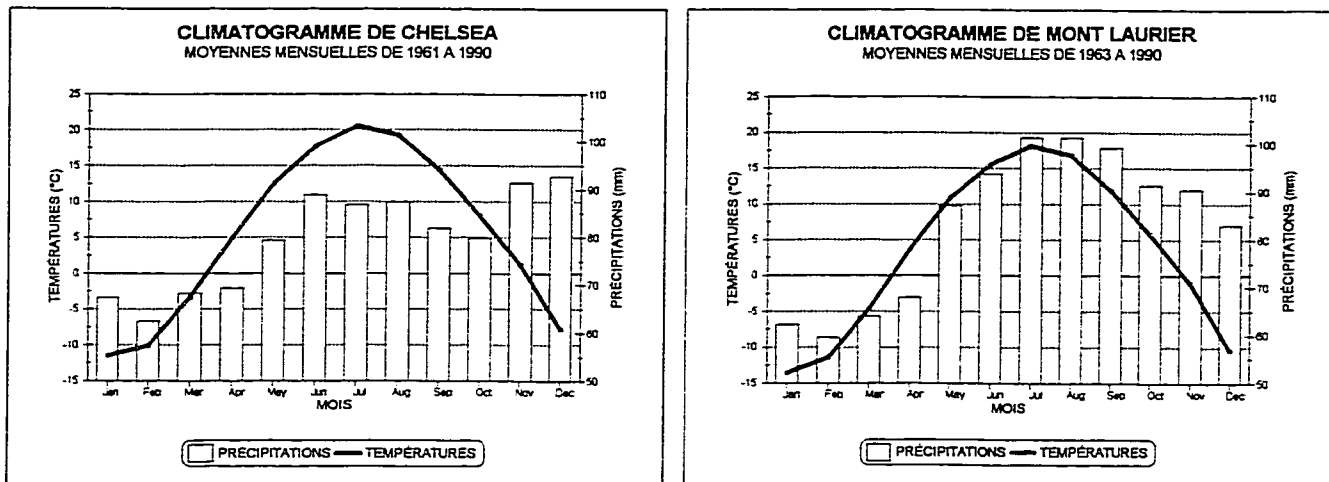


FIGURE 2.1: CLIMATOGRAMMES ISSUES DES NORMALES MENSUELLES CALCULÉES PAR ENVIRONNEMENT CANADA, POUR LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES DE CHELSEA ET DE MONT LAURIER

Bien que ces différences climatologiques semblent minimes, elles ont un impact direct sur la végétation. Le long du transect sud-nord, nous pouvons observer un changement graduel dans la composition des associations arborescentes (fig. 2.2).

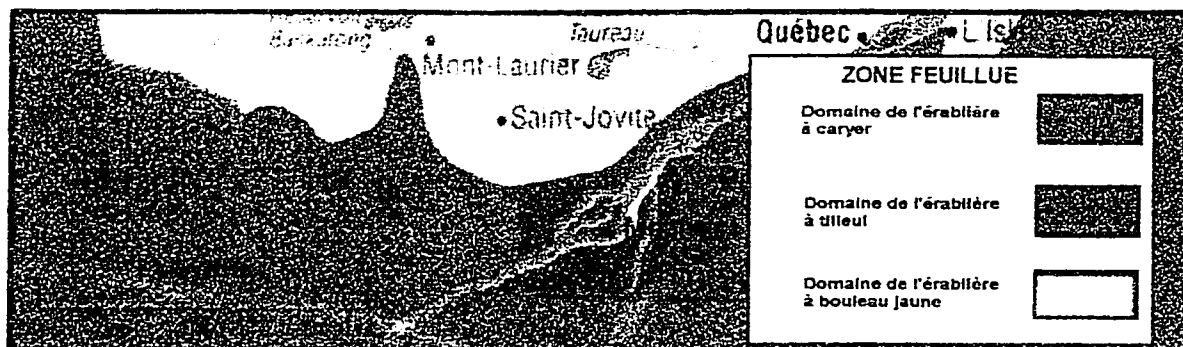


FIGURE 2.2 SUBDIVISION DE LA FORÊT FEUILLUE DANS LA RÉGION À L'ÉTUDE. ADAPTATION DE LA CARTE DU MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1990.

Le sud de la région se trouve dans le domaine de l'érablière à tilleul, composé principalement de l'érable à sucre accompagné du tilleul d'Amérique, de l'ostryer de Virginie et du frêne d'Amérique. Plus au

nord, les essences secondaires se font de plus en plus rares, laissant la place au bouleau jaune du domaine de l'érablière à bouleau jaune (Ministère des Ressources naturelles, 1990).

2.4 PHÉNOMÈNES KARSTIQUES

Le climat a aussi un impact sur les processus de karstification car il joue un rôle dans la formation des sols et de la végétation, qui sont les acteurs principaux qui déterminent la teneur en CO₂ contenue dans les eaux qui façonnent les paysages karstiques. Cependant dans la région à l'étude, le climat ne semble pas être un facteur déterminant. Le développement du karst est plutôt limité par l'accessibilité des roches solubles. Bien que la région repose sur les calcaires cristallins de la série de Grenville, les aires d'affleurement de ces marbres sont souvent discontinues et de faible superficie. On les retrouve généralement dans les vallées ou les dépressions et ils peuvent être recouverts d'une épaisse couverture de drift glaciaire ou de dépôts fluvio-glaciaires (Beaupré et Caron, 1986).

Les formes principales que l'on y trouve sont les lapiez, les dolines, les vallées sèches et aveugles, les pertes et les résurgences, les ponts naturels et les réseaux souterrains. Ces derniers sont souvent encore actifs, et certains sont même ennoyés depuis la construction des barrages le long des rivières Gatineau et de La Lièvre. En général, les ruisseaux qui coulent dans les grottes déchargent un lac, une tourbière, ou sont des infiltrations de rivières coulant en surface. Seulement quelques cavernes sont fossiles et sont associées à des événements antérieurs.

Même si on observe quelques fractures de décollement dans certaines grottes (Trudel, 1988), la dissolution est le principal processus de spéléogénèse. Le taux actuel de creusement des eaux souterraines ne peut justifier la formation des cavernes qui se trouvent dans cette région. Prévost (1991) démontre un taux de creusement de 12 à 25 mm par mille ans, ce qui ne peut expliquer le développement de ces systèmes karstiques depuis la dernière glaciation d'il y a 12 000 ans. L'auteur suggère plutôt l'hypothèse d'une spéléogénèse sous-glaciaire, où les eaux de fontes agressives, abondantes et surchargées de sédiments, ont creusées de façon relativement rapide les cavités qui existent aujourd'hui.

CHAPITRE III: PROBLÉMATIQUE

Les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours sont les principaux types de concrétions dans les cavités québécoises. Dans certains réseaux plus développés, nous trouvons aussi quelques rares stalactites et stalagmites. Des observations préliminaires semblent démontrer que les laits de lune pourraient être associés à la présence de spéléothèmes communs d'une façon quelconque. Souvent, des changements de textures en strates, parfois délimitées par une croûte de calcite très compacte, rigide et très mince, s'observent à l'intérieur d'un même dépôt de lait de lune. De plus, les autres types de concrétions possèdent fréquemment une texture friable et poreuse, semblable à la texture du lait de lune. Couramment ils se trouvent soit en périphérie, entourés ou directement sur les dépôts de lait de lune. Dans plusieurs cas, on observe une mince couche de lait de lune couvrant les autres types de concrétions. Plus rarement, des excroissances apparaissent sur la lèvre avale des bassins de micro-gours, semblable à un bourgeonnement botryoïdal.

On ne peut affirmer que le lait de lune soit préalable à la formation des autres types de concrétions, mais il existe à priori une certaine relation entre sa présence celle des autres formations. Cette association a déjà été soulignée par certains auteurs (White, 1976, 1988; Thrailkill, 1976; Onac et Ghergari, 1993). Ceci pourrait peut-être s'expliquer par des variations dans les conditions physiques, chimiques et/ou biosédimentologiques, dans l'espace et le temps.

Dans un premier temps, nous essayerons de préciser les critères qui déterminent la présence d'un type de concrétion plutôt qu'un autre dans un endroit délimité dans l'espace, à l'aide d'observations et de mesures *in situ*. Puis nous examinerons les caractéristiques morphologiques, structurales et minéralogiques de chacun des dépôts afin d'établir ce qui les distingue les uns des autres, tout en accordant une attention particulière aux zones de contact entre eux.

Par cette étude, nous tenterons de répondre à deux questions. 1) Est-ce qu'il existe des liens spatio-temporels entre les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours? Et 2) Est-ce que les dépôts de lait de lune sont vraiment des spéléothèmes, ou simplement une composante calcitique particulière?

CHAPITRE IV: CADRE THÉORIQUE

Les recherches portant sur les concrétions de type lait de lune sont multiples et traitent de divers sujets, passant de l'origine du nom, jusqu'aux multiples hypothèses de genèse. Cependant, les botryoïdes et les micro-gours ne semblent pas avoir suscité un intérêt très important, et ils font rarement l'objet d'études spécifiques. De façon générale, les descriptions des botryoïdes et des micro-gours restent brèves et vagues.

4.1 LAIT DE LUNE

Le lait de lune est connu depuis longtemps et il a fait l'objet de multiples recherches. Cependant, les opinions sur ses caractéristiques et sa genèse sont très diversifiées et contradictoires. Pour mieux comprendre l'état des connaissances actuelles sur cette concrétion cavernicole, il est bon de retracer l'historique des faits l'entourant (tableau 4.1).

4.1.1 HISTORIQUE

Bien que l'existence du lait de lune est connue depuis le milieu du 15^{ième} siècle, son histoire est plutôt complexe. Selon plusieurs auteurs (Moore et Sullivan, 1980; Fischer, 1993), le lait de lune était utilisé à des fins médicales aux 15^{ième}, 16^{ième} et 17^{ième} siècles, car on lui attribuait des propriétés de coagulant et de déshydratant, et on l'utilisait pour panser les blessures. Cette attribution médicinale a eu l'effet d'accroître l'intérêt de découvrir l'origine de cette substance connue de tous que l'on pouvait encore se procurer au début du 20^{ième} siècle, dans l'une des pharmacies de la Suisse centrale (Fisher, 1988). Selon Bernasconi (1961) Georg Agricola était le premier à mentionner cette substance, qu'il désignait sous le terme de "Stenomarga", en 1546, et ce n'est que quelques années plus tard, en 1555, que Konrad Gessner émit la première hypothèse de genèse (Bernasconi 1961). Depuis, beaucoup d'efforts ont été déployés pour définir et analyser cette substance. On lui a attribué plusieurs noms, plusieurs hypothèses de genèse ont

été apportées et une certaine confusion s'est installée lorsqu'on a essayé de déterminer sa composition. Nous croyons qu'il est important ici de reconstituer l'historique de la terminologie et des différentes hypothèses de genèse, afin d'établir une définition satisfaisante de cette substance qu'est le lait de lune.

DATE	ÉVÉNEMENTS
1546	<ul style="list-style-type: none"> ● Georg Agricola est le premier auteur à mentionner le Lait De Lune qu'il désignait sous le terme "STÉNOMARGA".
1555	<ul style="list-style-type: none"> ● Konrad Gessner émet la première hypothèse de genèse du Lait De Lune. Il croyait que le Lait De Lune était une sorte de champignon qui poussait directement à partir de la roche. ● Première description du Lait De Lune: Gessner décrit le Lait De Lune de la caverne <i>MONDMILCHLOCH</i> (Suisse), qui est maintenant considérée comme la localité type du Lait De Lune.
1655	<ul style="list-style-type: none"> ● Wormius attribue la genèse du Lait De Lune à la sublimation de vapeur métallique venant du centre de la terre, sur les murs froids des cavernes.
1667	<ul style="list-style-type: none"> ● Major est en accord avec la genèse proposée par Wormius, et ajoute qu'il s'agit notamment de vapeur d'argent. ● Proclus et son école alchimiste croyaient plutôt que l'influence astrale de la lune sur la terre produisait l'argent ainsi que le Lait De Lune.
1708	<ul style="list-style-type: none"> ● Le suisse Nicolas Langh propose la première hypothèse plausible pour la genèse du Lait De Lune: "running water which infiltrates beneath the ground, dissolves the stone by a continual action of its vapour and transforms it into the substance moonmilk".
1738	<ul style="list-style-type: none"> ● Brackmann établit une relation génétique entre le Lait De Lune et d'autres formations.
1763	<ul style="list-style-type: none"> ● Bertrand affirme que les stalactites sont formées à partir de Lait De Lune, opinion partagée par Brackmann.
1905	<ul style="list-style-type: none"> ● Iwanoff découvre un nouveau type de carbonate de calcium, en forme de moisissure.
1906	<ul style="list-style-type: none"> ● Iwanoff interprète le nouveau minéral comme étant un hydrocarbonate et Kristafowitsh l'associe au Lait De Lune.
1907	<ul style="list-style-type: none"> ● Morozewicz nomme le nouveau minéral "<i>LUBLINITE</i>" en hommage à son origine (Gouvernement de Lublin) et l'interprète comme étant de la calcite dont les rhomboèdres sont allongés dans le sens des pôles, formant un nid de fines aiguilles et fibres, capable d'absorber de l'eau. Il croyait que le Lait De Lune était identique à la Lublinité.
1914	<ul style="list-style-type: none"> ● Muegge décrit un dépôt de Lait De Lune provenant d'une caverne près de Berno comme étant de la Lublinité. Il ajoute qu'il s'agit d'une pseudomorphose sur des mycéliums de champignons, de filaments d'algues ou de bactéries, ou sur des chaînes de bactéries.
1946	<ul style="list-style-type: none"> ● Hoeg découvre des microorganismes, tel les Cyanophycées, dans le Lait De Lune et attribue la genèse du Lait De Lune à l'activité de ces micro-organismes.
1950	<ul style="list-style-type: none"> ● Des spéléologues français s'opposent ouvertement à l'idée de Bertrand, et disent que le Lait De Lune provient de la corrosion de stalactites et autres formations.
1957/1979	<ul style="list-style-type: none"> ● Plusieurs chercheurs démontrent le rôle possible joué par les micro-organismes dans la formation du Lait De Lune.
1976	<ul style="list-style-type: none"> ● Roda et Rajman proposent le terme "<i>SOFT SINTER</i>" pour le Lait De Lune calcitique.
1981	<ul style="list-style-type: none"> ● Bernasconi propose que le terme "<i>WHITE PLASTIC MASSES</i>" soit utilisé pour tout dépôt souterrain de type Lait De Lune, composé de moins de 90% de calcite (en poids), et propose que le terme Lublinité soit définitivement aboli.

TABLEAU 4.1: HISTORIQUE DU LAIT DE LUNE

4.1.2 DU "LAIT DE GNOMES" AU "LAIT DE LUNE"

L'historique du nom est très tumultueux et commence en Suisse au 15^{ème} siècle. Les habitants de cette région utilisaient le terme "MONDMILCH", qui se traduit par "LAIT DE GNOMES", pour désigner cette substance cavernicole blanche crémeuse, car ils croyaient que les cavernes étaient habitées par des "mon", qui signifie des gnomes. Avec le temps, "MON-" fut transformé par erreur en "MOND-", qui lui signifie lune en allemand (Moore et Sullivan, 1980), et le terme "MONDMILCH" est devenu le terme utilisé couramment. Par contre, en 1546 Agricola utilisait le terme "STENOMARGA" et non "MONDMILCH" (Bernasconi, 1961). Puis il y a eu Gessner qui lui utilisait déjà les termes latins "LAC LUNEA" en 1555 (Bernasconi, 1961; Fischer, 1988).

En 1905, Iwanoff découvre une nouvelle variété de carbonate de calcium en forme de boules de coton dans des joints et fissures de petites cavités. En 1906, Iwanoff l'interprète comme étant un hydrocarbonate, et Kristalowitsh l'associe au lait de lune, idée que partage Morozewicz, qui en 1907 nomma le nouveau minéral "LUBLINITE" (Bernasconi, 1961), en hommage à son origine (gouvernement de Lublin). Le terme "LUBLINITE" a donc été utilisé pour désigner un type particulier de lait de lune pendant près de 75 ans. Ceci malgré que dès 1929, les analyses de diffraction aux rayons X de Mizgier et les expériences de cristallisation effectuées par Thugutt aient démontré que la "LUBLINITE" n'était qu'une variété spéciale de calcite, et non un nouveau minéral (Stoops, 1976).

Dès le moment où l'on a attribué le nom de "LUBLINITE" à quelques laits de lune, un certain désordre a vu le jour. Certains auteurs utilisaient le nouveau terme, tandis que d'autres continuaient d'utiliser le terme "MONDMILCH" ainsi que sa traduction anglaise "MOONMILK" pour désigner tout lait de lune sans se soucier de la composition. N'ayant donc aucune règle bien définie, chacun commença à utiliser différents termes qu'il croyait des plus adéquats. Nous avons donc assisté à une prolifération de synonymes (tableau 4.2); dont quelques noms originaux plus poétiques les uns que les autres dont: "lait de caverne", "lait de montagne", "lait de roche", ainsi que toutes traductions possibles du nom latin "lac lunae" dont "bergmilch", "leche de luna" et "lait de lune" (Fischer, 1988). La confusion devenant totale, plusieurs auteurs ont essayé de "régulariser" les termes justes à utiliser. En 1976, Rajman et Roda proposent le

terme "soft sinter" pour les laits de lune calcitiques (Bernasconi, 1981). Cependant, en 1981, Bernasconi affirme que le terme est trop restrictif et propose plutôt le terme général "masse blanche plastique" pour toutes substances ressemblant à du lait de lune, et que seul les substances composées de plus de 90% de calcite (en poids) soient désignées sous le terme "mondmilch" ou l'une de ces traductions. Il ajoute même que le terme "lublinité" n'a plus sa raison d'être et devrait être définitivement aboli. Finalement, en 1992, Fischer appuie l'idée de Bernasconi en affirmant que nous devrions réserver le terme "mondmilch" aux substances calcitiques de plus de 90% en composition, et ajoute que les dépôts carbonatés de moins de 90% devraient être désignés sous le terme de "mondmilch-like deposit" et que toutes autres substances ne devraient pas être associées au terme "mondmilch" ni à celui de "moonmilk".

LANGUES	NOMS UTILISÉS
ALLEMANDE	Mamlich, Mahmilch, Maamilch, Maanmilch, Mannmilch, Mandmilch, Moonmilch, Monmilch, Monnmilch, Montmilch, Milchstein, Bergmilch, Steinmilch, Steinmergel
ANGLAISE	Moonmilk, Mountain Milk, Mondmilk, Rock Milk, Gnomes Milk
ESPAGNOLE	Leche de Luna, Leche de Roca
FRANÇAISE	Lait de lune, Lait de Roche, Lait de Montagne, Lait de Caverne
GRECQUE	Speleogala
ITALIENNE	Latte di Luna, Latte di Roccia, Latte di Monte, Latte di Montagna, Latte dell'Uomo, Latte dello gnomo
LATINE	Lac Lunae, Lac Montanum, Lithomarga, Stenomarga
RUSSE	Mleko Gornego, Kamennoe Moloko
TCHÈQUE	Nickaminek
TURQUE	Dik Karstik Kalinti
YOUGOSLAVE	Grosko Mlijeko

TABLEAU 4.2: SYNONYMES DU LAIT DE LUNE ENCORE UTILISÉS AUJOURD'HUI SELON LA LANGUE PARLÉE, ADAPTATION DE FISCHER, 1988

Quoi qu'il en soit, lorsque nous sommes sur le terrain, il est très difficile de déterminer la composition exacte d'un dépôt. Il est donc acceptable d'utiliser le terme qui nous est le plus familier jusqu'à ce que des analyses démontrent la nature exacte du dépôt, et de là, nous déciderons du terme qu'il convient d'utiliser. Il est tout de même bon de souligner qu'en Europe le terme commun reste le "mondmilch", aux États-Unis et au Canada anglais on parle plutôt du "moonmilk" et au Canada français le terme "lait de lune"

est largement utilisé et accepté.

4.1.3 ÉVOLUTION DES HYPOTHÈSES DE GENÈSE

Selon Bernasconi (1981), depuis la première hypothèse de genèse émise par Gessner en 1555, plusieurs tentatives d'explications de l'origine de cette substance se sont succédées. Certaines étaient plutôt farfelues. D'autres semblaient parfaitement plausibles, mais plusieurs furent tout de même réfutées. Cependant, quelques hypothèses vieilles de près d'une centaine d'années subsistent encore de nos jours, bien que quelque peu modifiées (tableau 4.3).

TYPES DE GENÈSES	AUTEURS
CRISTALLISATION LENTE	Koenigsberger, 1926; Pobeguïn, 1955; Geze, 1961; Geze et Pobeguïn, 1962; Melon et Bourguignon, 1962; Bernasconi, 1975; Bonzano et al., 1980
CRISTALLISATION PARTICULIÈRE	Gradzinski et Radomski, 1957; Melon et Bourguignon, 1962; Broughton, 1972; Maalev et Philipov, 1975; Armon et Delco, 1976; Kuepper et Niggli, 1976; Stoops, 1976; Urbani, 1977a) et b); Billy et Blanc, 1979; Bonzano et al., 1980
PRÉCIPITATION ISSUE DES PROCESSUS KARSTIQUES:	Gradzinski et Radomski, 1957; Bernasconi, 1961; Melon et Bourguignon, 1962; Mattioli, 1970; Rajman et Roda, 1974; Diaconu, 1976 ; Urbani, 1977b)
PRÉCIPITATION INDUITE PAR DES MICROORGANISMES	Hoeg, 1946; Caumartin, 1957; Caumartin et Renault, 1958; Masson-Williams, 1959, 1961; Pochon et al., 1964; Jaton et al., 1966; Broughton, 1972, 1974; Hill, 1976; White, 1976, 1988; Ohde et Takii, 1978; Billy et al., 1979; Moore et Sullivan, 1980; Ford et Williams, 1989; Cooper, 1993
CORROSION KARSTIQUE	Trimmel, 1962; Diaconu, 1976; Hill, 1976; Beaupré et Caron, 1986; Onac et Ghergari, 1993; Bassillais, 1997
CORROSION BIOCHIMIQUE	Caumartin et Renault, 1958; Moore et Sullivan, 1980; Beaupré et Caron, 1986; Onac et Ghergari, 1993; Bassillais, 1997
PARAMORPHISME	Rose, 1856; Armon et Delco, 1976; Urbani, 1977a)
PSEUDOMORPHISME	Muegge, 1914; Ulrich, 1938; Rogers et Moore, 1976; Moore et Sullivan, 1977; Billy et Blanc, 1979
NÉOMORPHISME	Onac et Ghergari, 1993
ISOMORPHISME PARTIEL	Geze et al., 1956; Novak, 1964; Lis et al, 1967; Broughton, 1974; Billy et Blanc, 1979

TABLEAU 4.3 LES DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES DE GENÈSE POUR LE LAIT DE LUNE. ADAPTATION DE BERNASCONI, 1981.

L'historique de la genèse du lait de lune commence donc avec Gessner en 1555. Il pensait qu'il s'agissait d'une sorte de champignon qui pouvait croître directement à partir de la roche. Il interprétait donc le lait de lune comme un organisme vivant qui possédait son propre métabolisme. Cette hypothèse semble

avoir persistée cent ans, et ce n'est qu'en 1655 qu'apparaît la deuxième hypothèse, celle de Wormius. Celle-ci attribue la genèse à la sublimation de vapeurs métalliques provenant du centre en fusion de la terre, qui se refroidissent sur les murs froids des cavernes. Cette hypothèse semble déjà plus acceptable, car elle démontre l'aspect d'un type de minéral, et non plus d'un spécimen biologique. Suite à cette supposition, Major ajoute en 1667 (Bernasconi, 1961), qu'il s'agit principalement de la sublimation des vapeurs d'argent, tandis que Proclus et ses militants alchimistes, proclament que l'argent et le lait de lune sont les produits de l'influence lunaire sur la Terre.

Ce n'est qu'en 1708, 153 ans après Gessner, que la première hypothèse plausible fit son entrée, avec Langh, qui propose que l'eau qui s'infiltré dans le sol dissout la roche, par l'action continue de sa vapeur, et la transforme en lait de lune (Bernasconi, 1961). On commence donc à établir un lien entre le lait de lune et les processus de karstification, ce qui est appuyé par Brackman en 1738 (Bernasconi, 1961), qui établit une relation génétique entre le lait de lune et d'autres formations cavernicoles, et en 1763, Bertrand pousse cette hypothèse plus loin en affirmant que les stalactites étaient formés à partir de lait de lune (Bernasconi, 1961). L'hypothèse que le lait de lune soit un produit de karstification, semble avoir été assez satisfaisante pendant 250 ans, car ce n'est qu'en 1858 que Rose propose une nouvelle hypothèse, selon laquelle le lait de lune serait le résultat d'une paramorphose de l'aragonite. Suivant cette idée, en 1914 Muegge propose qu'il s'agit plutôt d'une pseudomorphose sur des mycéliums de champignons, sur des filaments d'algues ou de bactéries, ou sur des chaînes de bactéries, idée qui sera reprise par Ulrich en 1938 (Bernasconi, 1961). C'est donc à partir de ce moment que l'on commence à croire que les micro-organismes pourraient jouer un rôle important dans la formation du lait de lune. Par contre, ce concept n'est pas unanime, et en 1926, Koenigsberger propose que le lait de lune n'est qu'un précipité issu de l'évaporation ou du refroidissement d'une solution de bicarbonate de calcium, donnant une cristallisation lente (Bernasconi, 1961).

Depuis 1926, un nombre croissant d'études ont été faites sur le sujet, apportant une multitude d'hypothèses diverses. Plusieurs auteurs proposent des biogenèses associées à certains organismes, qu'ils ont réussi à isoler dans des échantillons de lait de lune. Par exemple, Hoeg qui en 1946 découvre des Cyanophycées qui selon lui produiraient des acides qui déclencherait la corrosion des concrétions et des

roches. Cette idée de corrosion assistée fut reprise à maintes reprises, notamment par Caumartin en 1957, Broughton en 1974 et Bassillais en 1997. En 1959, Williams croit même que les microorganismes briseraient les cristaux de calcite normaux et les redéposeraient sous forme de microfibrilles (Ford & Williams, 1989). En 1977, Urbani propose que le lait de lune est un produit d'altération de la roche en place, dont les processus d'altération seraient intimement liés à l'attaque des acides phosphoriques dérivés du guano (excréments des chauve-souris). Par contre, la corrosion inorganique de type karstique n'a pas perdu de sa popularité et est reprise, entre autres, par Trimmel en 1962 et Diaconu en 1976, (Bernasconi, 1981). Cependant, dès 1961, Bernasconi réfute les diverses hypothèses de corrosion, et apporte plusieurs arguments montrant que le lait de lune possède une genèse de type "direct" et qu'il n'est pas une substance résiduelle. Cette opinion est partagée par Moore et Sullivan en 1980, d'après ces auteurs, le lait de lune serait issu d'un concrétionnement par précipitation à partir d'une solution carbonatée. Ils ajoutent aussi que les processus vitaux de certains microorganismes causent des microvariations dans l'environnement chimique, ce qui expliquerait sa texture non consolidée au lieu d'un spéléothème plus solide (Moore & Sullivan, 1980).

Depuis près de quarante ans, l'histoire se complique de plus en plus, et plusieurs auteurs en viennent à émettre et reprendre plus d'une hypothèse à la fois. Ce qui est le cas de Gèze qui, en 1961, propose 3 différentes hypothèses, dont la première se base sur les processus karstiques classiques, la seconde propose qu'il serait un produit de décomposition, ou de désagrégation biochimique du substratum ou de concrétions préexistantes, et la dernière est d'origine purement physico-chimique, où le lait de lune ne serait qu'une formation secondaire résultant d'une séparation sélective des composantes de la roche ou de concrétions déjà existantes (Gèze, 1961). En 1986, Beaupré et Caron citent 2 hypothèses très différentes, c'est-à-dire l'attaque biochimique anaérobie et la détérioration purement chimique du rocher ou de concrétions (Beaupré & Caron, 1986). Tandis qu'en 1993, Onac et Ghergari proposent eux aussi plusieurs hypothèses, combinant des origines biogéniques, néomorphiques et résiduelles (Onac & Ghergari, 1993), et Bassillais reprend l'idée de corrosion en 1997, en précisant qu'il s'agirait d'un produit d'altération des parois des grottes issu d'une combinaison de mécanismes physiques, chimiques et biochimiques (Bassillais, 1997).

L'énigme concernant la genèse de cette substance ne semble pas encore résolue aujourd'hui, et plusieurs auteurs n'osent pas encore prendre position sur le sujet et restent très évasifs, tout comme Fischer en 1992 qui propose seulement que le lait de lune se formerait soit par une accumulation en couches sur des dépôts de lait de lune anciens, soit par l'une des multiples hypothèses sur le sujet. Il est donc clair qu'il reste encore quelques mystères à résoudre sur cet aspect du lait de lune.

4.1.4 DÉFINITION

Il existe différentes définitions concernant le lait de lune. Plusieurs auteurs le considèrent que sous ses aspects physiques, d'autres y ajoutent la composition minéralogique, tandis que quelques uns ne parlent que de son caractère génétique. Très peu d'auteurs définissent le lait de lune selon les trois aspects à la fois, bien qu'ils soient tous aussi importants les uns que les autres. Par contre, comme il subsiste quelques méconnaissances sur certains de ces éléments, il n'est donc pas facile d'établir une définition complète, exacte et définitive.

Quelques auteurs se contentent de le définir selon l'apparence physique du dépôt, simplement comme étant "une substance tendre et blanche, qui ressemble un peu à l'argile, que l'on retrouve sur les murs de plusieurs cavernes" (Moore & Sullivan, 1980). Cette définition considère le lait de lune que sous sa forme humide et omet qu'il existe aussi sous forme déshydratée. Dans d'autres cas, seule la texture est considérée, et on affirme même que: "les termes rattachées au lait de lune ne servent qu'à désigner la texture et non la composition" (Hill, 1976). Par contre, certains vont un peu plus loin en désignant que le lait de lune est "un dépôt nanno- ou microcristallin blanc, parfois jaunâtre, composé d'agrégats aciculaires, contenant habituellement un pourcentage élevé d'eau" (Onac & Ghergari, 1993).

La majorité des définitions reposent sur la composition minéralogique en plus de l'aspect physique du dépôt. Certaines définitions restent très simples telles que: "le lait de lune est un dépôt blanchâtre non consolidé de minéraux carbonatés" (White, 1988). Tandis que d'autres sont plus développées comme la

définition de Gèze (1961) qui cite que "le lait de lune est une locution utilisée pour désigner l'aspect physique de divers produits naturels micro ou cryptocristallins sous forme de particules très fines". Il ajoute aussi que "le lait de lune est une variété de carbonates de calcium et magnésium, isolés ou en association, ainsi que de phosphates de calcium ou aluminium, et sont principalement accompagnés de diverses impuretés qui sont principalement des argiles, des oxydes de fer, de la silice et quelques matériaux organiques".

Certaines définitions basées sur l'aspect physique et la composition sont même très complexes. Ford et Williams (1989) définissent le lait de lune comme étant "une masse blanche de cristaux amorphes, qui est pâteuse ou spongieuse lorsqu'elle est humide, et poudreuse lorsqu'elle est sèche. Le lait de lune se forme en amas irréguliers variant de quelques centimètres à plusieurs mètres et il est souvent bulbeux, ressemblant à des têtes de chou-fleur". Ils ajoutent aussi que "les cristaux composant le lait de lune ont une épaisseur moyenne de seulement 1µm, sous forme d'aciculaire, de branchiale ou hélicoïdale, et sont composés uniquement, ou majoritairement de calcite ou d'aragonite, parfois accompagnés de carbonates hydratés, de gypses, de hontites, de dolomites, de phosphates ou de silicates".

Dans d'autres cas, les auteurs croient que la définition devrait inclure des caractères génétiques. On retrouve donc des définitions simplifiées telles : "le lait de lune est un système en deux phases (liquide/solide), d'un composé d'eau et de calcite, dont la phase solide est d'origine chimique ou détritique qu'on trouve dans des cavités souterraines" (Bernasconi, 1981). Par contre, cette définition est trop imprécise car plusieurs différents spéléothèmes peuvent être définis de cette façon. Toutefois, lorsque l'on y ajoute les deux autres éléments de définition, soit l'aspect physique et la composition, on obtient une définition beaucoup plus complète qui minimise la confusion, ce que certains auteurs ont fait, définissant le lait de lune comme étant "un spéléothème de calcite microcristalline ou cryptocristalline, ayant une teneur minéralogique en calcite de 90% et plus en poids, spongieux et pâteux à l'état humide, poudreux lorsque déshydraté, ayant souvent une apparence de chou-fleur, qui se forme principalement selon un système en deux phases, liquide/solide" (Fischer, 1993). Considérant le niveau de connaissances actuelles sur le sujet, cette dernière définition semble être la plus satisfaisante jusqu'à présent.

4.2 BOTRYOÏDES

La documentation sur les botryoïdes est beaucoup moins volumineuse que celle sur les laits de lune. Fréquemment, les auteurs ne leur réservent qu'un paragraphe de quelques lignes, traitant des divers noms qu'y leur sont attribués, des diverses morphologies qu'ils peuvent exhiber, de la variabilité de leur dimension ainsi que leur hypothèse de genèse.

Dans la littérature, la nomenclature de ce type de spéléothème est très diversifiée. Les termes utilisés sont généralement associés à l'aspect morphologique des spécimens, dont les plus populaires sont: botryoïde, champignon, "popcorn", corail, "knobs", nodule, globulite, grappe, boule, bouton, chou-fleur, "mammillaries", pamplemousse et nuage. Il ne semble pas y avoir de règle précise, et chacun utilise la terminologie qu'il préfère. Dans certains cas, les auteurs ne peuvent trancher la question, et citent plus d'un terme à la fois (White et Deike, 1962; Hill, 1976; Ford et Williams, 1989).

Les botryoïdes sont des structures communes que l'on trouve dans les cavernes (Sweeting, 1972), et sont des protubérances globulaires situées principalement sur les murs, mais qui peuvent croître aussi sur les plafonds ou sur d'autres spéléothèmes. Leur dimension varie de minuscules globules de quelques millimètres reposant sur un petit pied perpendiculaire à la paroi, à de grandes masses de près d'un mètre (Hill, 1976; White, 1976, 1988). Dans nos régions, ils sont généralement petits, de l'ordre du millimètre, et dépassent rarement le centimètre (Beaupré et Caron, 1986). Ils se présentent soit isolés ou soit groupés, croissant en ligne, en amas uniforme, ou en grands bouquets de grappes (Ford et Williams, 1989).

Ils sont normalement blancs translucides à opaques (Hill, 1976), et leur surface est généralement lisse (Sweeting, 1972; White, 1976, 1988). En coupe, ils présentent une stratification concentrique qui prend naissance au point de contact entre le globule et son support (White et Deike, 1962; Sweeting, 1972; Hill, 1976, White, 1976). Il n'y a habituellement pas de canal central (White et Deike, 1962; Hill, 1976; White, 1976, 1988).

Comme le souligne Thrailkill (1976), peu d'études ont été faites sur la composition minéralogique des botryoïdes. Cependant, certains auteurs croient qu'ils sont constitués entièrement de calcite pure (Ford et Williams, 1989) dont la croissance cristalline est perpendiculaire aux couches (Hill, 1976), d'autres

affirment que dans quelques cas, ils peuvent présenter une alternance de couches de calcite et d'aragonite (Fischbeck et Müller, 1971; White, 1976) ou peuvent être composés de différents minéraux dont l'hydromagnésite et la dolomite, et contiennent fréquemment quelques pourcentages de divers minéraux détritiques tels le quartz et les argiles (Thraillkill, 1976).

Dans la plupart des cas, les botryoïdes sont solides et clairement indépendants de la gravité (Holden, 1940). Ils se forment normalement à l'air libre, mais peuvent aussi se développer en milieu immergés (Hill, 1976; Ford et Williams, 1989). L'explication de leur formation n'est pas unanime, et les hypothèses de genèse se regroupent en cinq différentes catégories: 1) l'eau suinte des micro-fissures de la roche sous-jacente, et se propage par capillarité vers la surface du botryoïde, où il y a dégazage et évaporation, provoquant une précipitation superficielle (Holden, 1940; Halliday, 1950; Moore et Nicholas, 1964; Sweeting, 1972; Hill, 1976; Ford et Williams, 1989). 2) Un mince filet d'eau saturée coule sur les irrégularités des parois, où la précipitation est en équilibre avec l'atmosphère (Thraillkill, 1965; Hill, 1976; White, 1976, 1989). 3) Des éclaboussures provenant d'un égouttement d'une solution saturée recouvrent la surface de projections murales (Thraillkill, 1965; Hill, 1976). 4) L'eau monte des bassins sur les murs par l'action des tensions superficielles (Thraillkill, 1965; Hill, 1976), et finalement, 5) dans plusieurs cas, les botryoïdes sont associés au lait de lune, et pourraient en fait être du lait de lune induré (Thraillkill, 1976, White, 1988).

4.3 MICRO-GOURS

Bien que les gours et les phénomènes qui leur sont associés sont communs dans les cavernes, et qu'ils sont bien connus des spéléologues, ils font rarement l'objet d'étude. Lorsqu'ils sont mentionnés dans la littérature, on trouve généralement qu'une brève description accompagnée de l'hypothèse de formation courante.

Leur morphologie ressemble à de petits bassins hydrologiques qui sont parfois comparés aux grands barrages de travertins (Varnedoe, 1965; Beaupré et Caron, 1986; Ford et Williams, 1989). La partie amont

du faciès est pratiquement verticale, tandis que la face externe possède une légère pente vers l'aval (Warwick, 1962; Sweeting, 1972; Hill, 1976; Beaupré et Caron, 1986). Ils sont rarement isolés. Généralement, plusieurs bassins s'emboîtent pour former des coulées ou des terrasses en escalier (Hill, 1976; Beaupré et Caron, 1986, Ford et Williams, 1986). Ils sont normalement composés de calcite poreuse blanche, contenant parfois des impuretés (Hill, 1976).

Les gours sont de dimension très variable, passant du micro-gour de quelques centimètres qui se développent fréquemment sur d'autres concrétions (stalactite, stalagmite, "flowstone" et draperies), à de grands barrages de plusieurs mètres couvrant les planchers de grands passages (Varnedoe, 1965; Hill, 1976; Ford et Williams, 1989). Dans nos régions, nous trouvons rarement des spécimens dépassant quelques centimètres (Beaupré et Caron, 1986).

Selon Warwick (1962), les dimensions des bassins dépendent fortement de la pente: "lorsque l'inclinaison du substrat sur lequel ils se développent est très élevée, les barrages sont très hauts et le rapport surface versus hauteur est petit. Lorsque la pente est plus douce, les bassins sont généralement très larges et peu profonds".

Tous les auteurs supportent l'hypothèse de genèse de Varnedoe (1962). Il propose que: "les gours prennent naissance sur des irrégularités diverses de la surface, capables de perturber suffisamment l'écoulement de l'eau pour provoquer une perte de CO₂ et engendrer la précipitation de carbonate. Leur croissance est assurée par l'augmentation du volume de l'obstacle, édifiant des barrages perpendiculaires à l'écoulement des eaux".

Le but de cette recherche n'est pas de remettre en question les connaissances actuelles, mais plutôt d'explorer un nouveau champ d'étude, qui pourrait nous aider à répondre à certaines questions qui sont restées sans réponse à la suite d'analyses traditionnelles. Nous pensons qu'à la suite de cette présente étude, l'analyse des caractéristiques qui distinguent les divers types de concrétions nous permettra de préciser quelques aspects des laits de lune, des botryoïdes et des micro-gours. De plus, nous pensons que cette première étude sur les associations entre les formations cavernicoles pourrait aider à mieux comprendre les processus de la mise en place des dépôts.

CHAPITRE V: MÉTHODOLOGIE, MÉTHODES ET TECHNIQUES

5.1 MÉTHODOLOGIE

La problématique de cette recherche comporte deux volets. Le premier porte sur l'existence ou l'inexistence de liens spatiaux et/ou temporels entre diverses concrétions à l'intérieur des cavernes. Le deuxième consiste à définir si les dépôts de type lait de lune sont des spéléothèmes ou non. Afin de répondre à ces deux questions, nous devons premièrement préciser les caractéristiques de chacun des types de concrétions, pour être en mesure de les distinguer les uns des autres. De ce fait, nous pourrions déterminer si le lait de lune est un spéléothème par lui-même, et non un simple dépôt calcitique particulier occasionnel pouvant former des spéléothèmes communs. Nous devons aussi établir s'il existe des zones de transitions ou des discontinuités entre les caractéristiques propres à chacun des 3 types (lait de lune, botryoïde et micro-gour), pour déterminer s'il y a des patrons associatifs ou non.

Nous avons adopté une approche méthodologique en deux étapes, la première sur le terrain et l'autre en laboratoire, comportant chacune plusieurs volets d'analyses portant sur diverses propriétés des concrétions à différentes échelles.

5.1.1 MÉTHODES SUR LE TERRAIN

Les observations et mesures effectuées sur le terrain ont été faites à différentes échelles, soit à l'échelle régionale, locale et ponctuelle.

À l'échelle régionale, nous avons sélectionné les cavernes qui pouvaient être accessibles et possédant des concrétions. Localement, nous avons dans un premier temps déterminé des sites d'échantillonnages où nous avons effectué des mesures des paramètres environnementaux, afin de vérifier si ces derniers avaient une influence sur la présence ou l'absence de l'un ou l'autre des trois types de concrétions qui font l'objet de cette étude. Nous avons aussi noté le positionnement des divers dépôts à l'intérieur des sites, afin d'évaluer si la localisation pouvait expliquer l'agencement spatial des concrétions.

De plus, nous avons pris note de toutes évidences d'associations spatio-temporelles percevables entre les spécimens. Puis à l'échelle ponctuelle, nous avons fait une description complète des concrétions qui se trouvaient en chaque point. Les critères de description portaient sur l'aspect morphologique, la distribution, et les dimensions individuelles, ainsi que la présence ou l'absence de micro-organismes visibles à l'oeil nu.

5.1.2 MÉTHODES EN LABORATOIRE

Les analyses de laboratoire peuvent être classées en deux catégories. La première étant la description des concrétions à deux différentes échelles, soit millimétrique et micrométrique; tandis que la deuxième consiste en la détermination de la teneur en eau et l'analyse des composantes minéralogiques.

Les aspects observés à l'échelle millimétrique sont d'ordre structural. L'agencement des composantes nous permettrons d'établir des comparaisons entre les trois types de concrétions et définir la nature des transitions à cette échelle, pour les échantillons démontrant une association typologique. Suite à cet examen, nous serons en mesure d'évaluer s'il existe des patrons structuraux qui nous permettront de regrouper les dépôts en différentes fabriques.

L'établissement des diverses fabriques nous servira pour effectuer une étude pétrographique, afin de connaître les caractéristiques texturales à l'échelle micrométrique des structures observées à l'échelle millimétrique. Les analyses pétrographiques nous permettront aussi d'observer la nature des transitions entre les diverses structures composant les concrétions, et de déterminer s'il existe des discontinuités ou si les passages de l'une à l'autre s'effectuent de façon graduelle, formant des zones de transitions distinctes.

Afin de compléter la description des échantillons, nous procéderons à l'analyse minéralogique ainsi qu'à la détermination de la teneur en eau.

5.2 TECHNIQUES

5.2.1 TERRAIN

Chacune des cavernes est visitée, pour déterminer s'il y a présence d'au moins un des types de concrétions étudiées; soit le lait de lune, les micro-gours et les botryoïdes. S'il y a absence de ces 3 types de dépôts dans l'une des cavernes, celle-ci est éliminée des analyses. Dans les cavernes restantes, des sites d'échantillonnages sont établis à l'intérieur des différents réseaux. Ensuite une série d'observations et de mesures sur divers paramètres de l'environnement cavernicole sont effectuées, de même qu'une macro-description complète des concrétions in-situ. Par la suite un échantillonnage scrupuleux est fait afin d'éviter l'altération de l'environnement et de conserver le plus possible la structure de l'échantillon intacte.

5.2.1.1 PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT

Pour nous guider sur le terrain lors de nos observations et mesures, nous utilisons un questionnaire à chacun des sites. La première partie contient le nom de la caverne, l'identité du site, la localisation du site, la température, l'humidité relative, la géologie et la présence de micro-champignons ou autres micro-organismes visibles. La température et l'humidité relative ont été mesurée une seule fois, au moment de l'échantillonnage, de façon instantanée.

L'identité du site est attribué selon une notation symbolique tel WSON-1, qui signifie: caverne Wilson site #1, et la localisation du site est indiquée directement sur le plan du réseau cavernicole.

La température de l'air ambiant est mesurée à chacun des sites, avec un thermomètre de pêcheur de marque TAYLOR série 21433, ayant une précision de ± 0.5 °C.

L'humidité relative est mesurée à l'aide d'un psychromètre de type 1330 Sling Psychrometer, distribué par la corporation américaine Taylor[®], nous donnant les températures (sèche et humide) avec une précision de ± 0.25 °C chacune, que nous reportons sur une charte pour obtenir l'humidité relative à 1% près.

La géologie du site est déterminée par observations appuyées d'un test au HCl afin d'estimer la teneur en calcaire, classée selon la réaction entre la roche mère et le HCl. La proportion de calcaire est ainsi qualifiée de nulle, faible, moyenne, forte et très forte.

La présence ou l'absence de micro-champignons et autres organismes est établie par simples observations.

5.2.1.2 DESCRIPTION DES DÉPÔTS

La seconde partie du questionnaire de terrain porte sur la description complète des divers dépôts qui se trouvent sur les sites. Les observations portent principalement sur la localisation et les caractères morphologiques des concrétions ainsi que sur les caractéristiques du matériel sur lesquels elles reposent.

Pour chaque site, on commence par identifier la présence ou l'absence de chacun des trois types de concrétions et leur positionnement selon: leur emplacement (parois, plafond ou plancher), la pente du matériel qui sert de base mesurée avec un clinomètre SUUNTO Co code PM-5360PC, ainsi que la superficie couverte par le dépôt et l'épaisseur de ce dernier, tous deux mesurés au centimètre près (lorsque qu'il nous en est possible) à l'aide d'une règle de 30 cm.

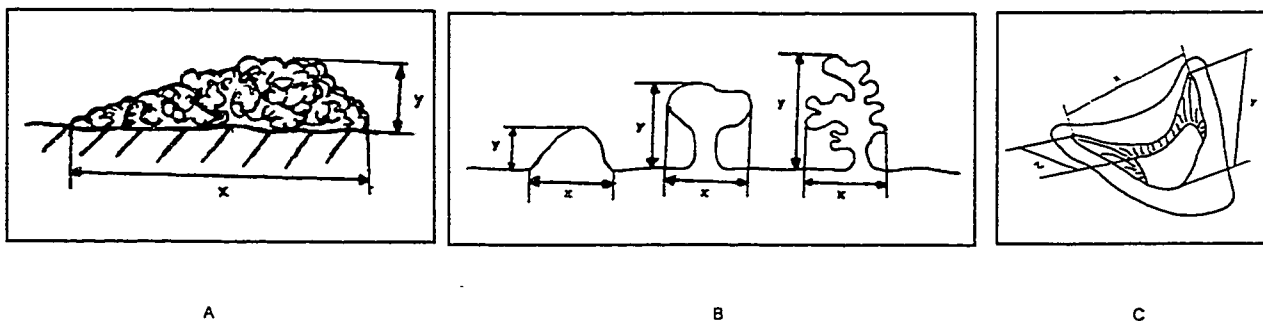


FIGURE 5.1 SCHÉMAS DÉMONTRANT LES DIMENSIONS MESURÉES POUR CHACUN DES TYPES DE CONCRÉTIONS. A: LAIT DE LUNE (x: largeur, y: épaisseur) B: DIVERS BOTRYOÏDES (x: largeur, y: hauteur) C: MICRO-GOUR (x: largeur, y: longueur, z: profondeur)

En ce qui concerne les caractéristiques morphologiques, nous avons premièrement mesuré certains aspects particuliers à chacun des types de concrétions (voir fig. 5.1) soit l'épaisseur pour les laits de lune,

les dimensions des botryoïdes (hauteur et largeur) ainsi que des micro-gours (largeur, longueur et profondeur).

Nous avons ensuite déterminé le type de concrétion suivant la classification que nous avons élaborée (voir fig. 6.1). Nous avons aussi noté l'état des concrétions de lait de lune (humide ou sec) et des micro-gours (actif ou inactif).

Les caractéristiques du matériel qui sert de substrat aux concrétions sont établies par simples observations et portent sur leur nature (remplissage fluvial, éboulis, autre concrétion, substratum rocheux), leur état (altéré ou non) et leur morphologie (non visible ou déterminée telle lisse ou rugueuse, fissure, en creux ou en bosse).

Dans la partie "notes" du questionnaire, nous avons indiqué les remarques supplémentaires telles qu'une association visible entre les divers dépôts, la présence de micro-organismes et toutes autres observations particulières à chacun des sites pouvant servir aux analyses ultérieures.

5.2.1.3 ÉCHANTILLONNAGE

Les techniques d'échantillonnage varient en fonction du spécimen à prélever. Les échantillons assez épais et consolidés sont détachés de leur support à l'aide d'un marteau de géologue utilisé comme levier. Des boîtes enfoncées dans une paroi creusée dans le matériel meuble permettent de prélever des petites coupes stratigraphiques. Les autres dépôts non consolidés sont ramassés à l'aide d'une truelle. Finalement, les échantillons trop minces ou trop durs sont recueillis par grattage à l'aide d'un couteau de poche.

5.2.2 LABORATOIRE

Plusieurs analyses sont effectuées en laboratoire, afin de mieux décrire les différentes caractéristiques des échantillons. Ces analyses traitent principalement des aspects chimiques, physiques, minéralogiques et pétrographiques. Dans un premier temps, nous procédons à la détermination de la teneur en eau de chacun des échantillons. Puis les échantillons sont observés à la loupe binoculaire afin

de décrire leurs composantes micro-structurales pour effectuer des regroupements sous diverses micro-fabriques. Par la suite, les composantes minéralogiques des micro-structures sont identifiées par diffraction au rayon X et l'examen des lames minces au microscope pétrographique permet de mieux décrire les faciès minéralogiques des différentes micro-fabriques, ainsi que de préciser la nature des transitions entre-elles.

5.2.2.1 TENEUR EN EAU

La teneur en eau des échantillons est déterminée par évaporation au four à une température constante de 100 °C. La préparation pour cette étape est simple, après la collecte du spécimen, il est gardé dans des sacs de type "ziplock" et maintenu à une température de l'ordre de la température ambiante du milieu naturel (variant de ≈15 à 20 °C) jusqu'au retour en laboratoire, puis il est entreposé dans un réfrigérateur jusqu'aux analyses, afin de minimiser l'évaporation. Pour l'analyse de la teneur en eau, seules une portion d'environ 2 g est utilisée, que l'on pèse avec précision à l'aide d'une balance électronique de type SARTØRIUS laboratory ayant une précision de ± 0.01 g. Par la suite, on place le spécimen au four à une température de 100°C pour environ 24 h. Finalement, après refroidissement dans un bac à dessiccation, le spécimen est repesé. Le pourcentage d'eau contenu dans l'échantillon est donc calculé selon l'équation:

$$\frac{\text{poids initial} - \text{poids sec}}{\text{poids initial}} \times 100 = \% \text{ d'eau en poids}$$

5.2.2.2 ANALYSE STRUCTURALE

Une première description microscopique des échantillons est effectuée à l'aide d'une loupe binoculaire de type STEREO ZOOM® 4 de BAUSCH & LOMB, à un grossissement de 45X. Lors de cet examen, nous dressons un schéma représentatif pour chacun des échantillons, sur lequel nous décrivons l'aspect des diverses structures observables à cette magnitude. La définition des micro-structures est établie selon l'aspect textural des grains (dimension, disposition et forme), ainsi que la porosité, la compacité et la couleur des zones concernées. La compilation des agencements inter-structuraux nous permet

d'établir des micro-fabriques regroupant des échantillons démontrant des successions structurales spatiales et temporelles semblables.

5.2.2.3 ANALYSE MINÉRALOGIQUE

La diffraction au rayon X est utilisée dans le but d'une identification des diverses composantes minéralogiques des concrétions. La préparation des échantillons pour cette étape consiste à broyer environ un demi gramme de sédiment dans un mortier. Par la suite, on effectue un gommage de la poudre à l'aide d'une substance qui n'affectera pas les résultats, c'est-à-dire qu'on doit s'assurer qu'aucune impureté détectable par diffraction ne sera ajoutée au sédiment. Généralement on utilise une gomme de type Canada Balsam, collodion ou autres. Une fois la préparation terminée, on introduit l'échantillon dans l'appareil pour en effectuer l'analyse. On obtient ainsi un graphe dont les indices sont l'angle de rotation du faisceau incident (en degré) en abscisse et l'intensité d'absorption ($\mu\beta$) en ordonnée. Les différents pics qui figurent sur ce graphe nous indiquent avec précision la nature de chacune des composantes selon leur position en abscisse.

Cette méthode est généralement précise. Par contre, certaines conditions doivent être respectées avant d'envisager l'utilisation de cette méthode. Premièrement, on doit s'assurer que les échantillons se prêtent à ce type d'analyse. C'est-à-dire que les composantes sont assez sensibles au bombardement de rayons X. Il faut aussi s'assurer que les échantillons utilisés sont bel et bien représentatifs du sédiment initial. On doit aussi tenir compte de l'investissement de temps et d'argent que représente une telle analyse et s'assurer qu'elle nous apportera de l'information pertinente, avant d'entreprendre cette démarche.

De façon générale, les analyses de diffraction aux rayons X sont efficaces pour l'analyse des constituants des concrétions cavernicoles, car les carbonates sont des composés relativement réactifs aux rayons X. Afin de minimiser les coûts et les risques de redondance, nous avons décidé d'effectuer cette analyse sur des sous-échantillons représentatifs de chacun des types de micro-structures déterminées à l'aide de la loupe binoculaire, ainsi que certains sous-échantillons de spécimens démontrant des différences notables (couleur, porosité,...).

Cette analyse est effectuée au laboratoire d'analyse optique du département de géologie de l'Université d'Ottawa, par le technicien en chef, Ronald Hartree. Le diffractomètre utilisé est de marque déposée PHILIPS, modèle X'PERT DIFFRACTOR METER. Dans un premier temps, tous les spécimens font l'objet d'une première analyse rapide, dont le temps de passage est de 15 minutes pour des angles de rotation passants de 20 à 45° (analyse typique des concrétions carbonatées). Certains échantillons, dont le diagramme de diffraction semble plus complexe, nécessitent une deuxième analyse plus précise dont le temps de passage est de 60 minutes, pour des angles de rotation variants de 15 à 60°. L'interprétation des résultats s'effectue à l'aide du logiciel de référence des diagrammes de diffraction aux rayons X: Total Access, Diffraction Database, Philips Plus 41.

5.2.2.4 ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE

Une observation au microscope pétrographique de marque OLYMPUS BH-2 est faite dans le but d'observer différentes caractéristiques des échantillons. Pour cette analyse, on doit préalablement effectuer des lames minces pour chacun des échantillons à observer. Dû à la nature et à la texture des échantillons, on doit en un premier temps endurcir les matériaux. Pour ce faire, on enduit les échantillons d'une résine d'époxie liquéfiée par chauffage, puis on laisse refroidir et durcir. Par la suite, on effectue la taille à l'aide d'une scie à diamant, nous donnant des tranches polies d'environ 30 µm d'épaisseur, que l'on monte sur une lame de verre. Cette préparation est effectuée au département de géologie de l'Université d'Ottawa, par le technicien Georges Mrazek.

Toutes les lames sont ensuite observées à une magnitude de 400X, afin de définir leurs caractéristiques pétro-structurales et minéralogiques. Ceci nous permet de préciser les caractéristiques texturales de chacune des micro-structures préalablement déterminées. Ce type d'analyse étant très long, nous avons sélectionné des échantillons types de l'ensemble des spécimens. Pour s'assurer que tous les échantillons étaient bien représentés, nous avons choisi un échantillon type pour chacune des micro-fabriques établies antérieurement. Cette étude permet aussi d'observer les particularités des zones de contacts entre deux micro-structures et de déterminer si le passage de l'une à l'autre se fait de façon

abrupte, ou s'il se fait graduellement via une phase de transition se traduisant par une superposition micro-structurale.

CHAPITRE VI: ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 DONNÉES DE TERRAIN

La visite des cavernes et l'échantillonnage se sont effectués sur une période d'environ 5 mois, soit du 22 mai au 5 décembre 1996³. Sur les 43 cavités potentielles, seulement 10 ont été retenues, soit les cavernes de l'Ours, de la Mine et Lafèche, ainsi que les grottes Wilson, des Moules, Mokidjwinib, du Lac des Îles, de la Maison de Pierre, de MacKenzie King et du Mont-Cascade. L'élimination des autres cavités est issue d'une absence de spéléothème ou d'une inaccessibilité.

Dans chacune des cavités qui font l'objet de cette étude, nous avons déterminé de 1 à 8 sites d'échantillonnage. L'établissement de ces sites a été basé sur la présence de spéléothèmes. À chacun des sites, nous avons mesuré et noté la localisation (voir carte de localisation) et les divers paramètres de l'environnement de ces sites (section 6.1.1). À l'intérieur de ces sites, nous avons choisi de 1 à 7 échantillons⁴ (la section 6.1.2), selon le(s) type(s) de spéléothème(s) (qui sont décrits en détail dans la section 6.1.3) et leur(s) emplacement(s) (section 6.1.4).

6.1.1 PARAMÈTRES DE L'ENVIRONNEMENT

Les divers paramètres de l'environnement observés et mesurés sont la localisation des sites à l'intérieur des réseaux cavernicoles, la température de l'air, l'humidité relative, la réaction du substrat à l'acide chlorhydrique (HCl) ainsi que la présence d'organismes visibles à l'oeil nu (tableau 6.1).

La localisation des sites s'échelonne sur les trois zones thermiques décrites par Beaupré et Caron (1986), soit la zone de fluctuations (entrée), la zone tampon et la zone profonde où la température est constante. Les morphologies des réseaux à ces sites sont très variables, passant des "étroitures" à de

3: L'échantillon provenant de la caverne Lafèche a été prélevé le 5 août 1994. La caverne étant devenue touristique depuis, il était impossible d'obtenir de nouveaux échantillons.

4: Certains échantillons n'ont pu être prélevés pour des raisons de conservation, selon la convention de préservation des milieux cavernicoles (Hill, 1976). Tel a été le cas des échantillons Wson 6,7 et 8.

CAVERNES	SITES	LOCALISATION	T° (°C)	HUMIDITÉ RELATIVE	RÉACTION AU JCI	PRÉSENCE D'ORGANISMES
Caverne de l'Ours	1	près de l'entrée principale	9	94	moyerne	micro-champignons
	2	petite chambre	8	94	faible	micro-champignons
	3	premier corridor secondaire	9	100	moyerne	micro-champignons
	4	près de l'entrée secondaire	6,5	93	moyerne	micro-champignons
	5	deuxième corridor secondaire	6,5	93	moyerne	micro-champignons
	6	petite chambre dans le premier corridor secondaire	7	93	moyerne	micro-champignons
Grotte Wilson	1	près de l'entrée	9	94	moyerne	micro-champignons
	2	corridor principal, avant la grande chambre	9	94	faible	quelques racines
	3	grande chambre	6,5	93	faible	quelques racines
	4	corridor principal, après la grande chambre	7	93	faible	aucun visible
	5	début du corridor secondaire	6,5	93	faible	aucun visible
	6	grande chambre	6,5	93	faible	aucun visible
	7	corridor principal, après la grande chambre	7	93	faible	aucun visible
	8	petite chambre au bout du corridor principal	8	87	faible	aucun visible
Grotte des Nuales	1	première chambre	18	100	très forte	micro-champignons
	2	réseau fossile	18	100	moyerne	aucun visible
	3	derrière chambre du réseau fossile	18	100	moyerne	quelques racines
Grotte Mokidjwinib	1	poche de l'une des entrées du réseau fossile	21,5	68	faible	moiasse verte
	2	corridor commun des réseaux actif et fossile	20,5	75	faible	micro-champignons
Grottes du Lac des Iles	1	section centrale du corridor principal, près de la petite chute	16	100	moyerne	micro-champignons
	2	section centrale du corridor principal	15	100	moyerne	micro-champignons
Grotte de MacKenzie King	1	près de la chute	16,5	90	moyerne	micro-champignons
	2	avant-dernière chambre	15	90	moyerne	micro-champignons
	3	dernière chambre	15	90	moyerne	micro-champignons
Grotte de la Maison de Pierre	1	poche de l'entrée principale	21	64	forte	moiasse verte
	2	début du corridor principal, zone de limon	19	87	forte	beaucoup de racines et micro-champignons
	3	première courbe du corridor principal	19	87	faible	racine et micro-champignons
	4	deuxième courbe du corridor principal	19	91	moyerne	micro-champignons
	5	avant la troisième courbe du corridor principal	19	91	moyerne	micro-champignons
	6	au-dessus de la cascade	19	95	moyerne	micro-champignons
	7	avant le pilon	19	93	moyerne	micro-champignons
Caverne de la Mine	1	porche au-dessus de la caverne (blais sous roche)	-5	72	forte	moiasse verte
	2	porche au-dessus de la caverne (blais sous roche)	-5	72	forte	moiasse verte
	3	porche au-dessus de la caverne (blais sous roche)	-5	72	forte	moiasse verte
Grottes du Mont-Cascade	1	porche de l'entrée du réseau fossile	15	80	forte	micro-champignons
	1	corridor secondaire du réseau supérieur menant au puits

TABLEAU 6.1: DESCRIPTION DES SITES PAR CAVERNE

grandes chambres, de conduits vadoses, phréatiques et composites (Beaupré et Caron, 1986).

La température ambiante dans chacun des sites varie considérablement elle aussi, de -5 à 21.5°C . La température minimale mesurée a été de -5°C à la caverne de la Mine. Ceci s'explique par le fait que les 3 sites sont localisés dans le porche situé au-dessus de la caverne comme-telle, soumis directement aux variations de la température externe, qui de ce fait était de -6°C . La même explication s'applique à la température maximale de 21.5°C , qui a été mesurée au site #1 de la grotte Mokidjiwinib, qui était localisé dans le porche de l'une des entrées du réseau fossile. La température extérieur au même moment était de 23°C . Il est à noter que le site #2 n'était qu'à 5 m du site #1, et on pouvait déjà observer une baisse de température de 1°C . La moyenne des températures est de 11.8°C , ce qui est plus élevé que la température moyenne annuelle de la région, qui varie de 3.4 à 5.5°C (voir section 2.3).

L'humidité relative varie elle aussi de façon notable, passant de 64% pour le site #1 de la grotte de la Maison de Pierre à 100% pour le site #3 de la caverne de l'Ours, les sites #1,2 et 3 de la grotte des Moules et les sites #1 et 2 de la grotte du Lac des Îles. De façon générale, on remarque que les valeurs les plus élevées ont été mesurées dans des réseaux actifs, et que plus on pénètre dans la zone profonde, plus l'humidité relative augmente, à l'exception de la grotte Wilson, où nous avons obtenu la plus petite valeur (87%) au site le plus éloigné de l'entrée. Dans le cas du minimum, ainsi que pour les sites où l'humidité relative est de 80% et moins, ils sont tous limités à la zone de fluctuation. Pour les sites ayant une humidité relative de 95% et plus, ils sont tous localisés dans la zone profonde de réseaux actifs. Il n'y a aucun site qui possède une humidité relative se trouvant dans la classe 81 à 85%. De façon générale, les sites ayant une humidité relative variant de 86 à 90% sont situés dans des réseaux actifs où la température est relativement élevée, variant de 15 à 19°C . Un seul site fait exception à la règle, soit le site #8 de la grotte Wilson, ayant une humidité relative de 87%. Ce site est confiné dans la zone profonde d'un réseau fossile où la température est de 8°C . Ceci pourrait peut-être s'expliquer par le fait que la circulation de l'air à cet endroit est médiocre. Pour les sites dont l'humidité relative se retrouve dans la dernière classe, valeurs variant de 91 à 95%, ils sont principalement localisés dans des réseaux fossiles où la température varie de 6.5 à 9°C . Le zonage thermique ne semble pas jouer un rôle dans ces cas-ci. Il y a cependant des exceptions, soit les sites #4, 5, 6 et 7 de la grotte de la Maison de Pierre, qui sont tous situés dans un

réseau très actif, où la température est de 19°C. Ce phénomène est probablement causé par les particularités physiques de cette cavité. Ce réseau est entièrement actif, et est constitué d'un seul conduit de type composite très aéré, ouvert aux deux extrémités par des ouvertures de dimensions relativement grandes. Le circuit est traversé entièrement par un ruisseau dont la profondeur varie d'environ 30 à 60 cm, qui possède un débit non négligeable. La circulation de l'air y est aussi très notable.

Au point de vue de la géologie des sites, ils se trouvent tous dans des marbres de Grenville, dont le degré de métamorphisme est très variable (Ford et Williams, 1989). Ces calcaires cristallins à grains grossiers, sont de faible cohésion et généralement impurs, contenant plusieurs inclusions de nature diverse, dont les principaux sont des micas, des quartzites, des feldspaths et des variétés de gneiss. Ces caractéristiques peuvent expliquer, en grande partie, les variations très prononcées de la sensibilité du substrat à l'HCl. Nous avons observé que le marbre réagissait à des intensités très variables à l'échelle d'une caverne, passant de faibles à fortes, ce qui est le cas de la grotte de la Maison de Pierre (le site #3 versus les sites #1 et 2), ou de moyennes à très fortes, telle que la grotte des Moules (les sites #2 et 3 versus le site #1). Ceci peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs: la présence d'impuretés insolubles à l'HCl, ou la présence de poudre de calcite très sensible à l'HCl, tapissant le substrat; la porosité et le grain de la roche; l'humidité de la surface analysée; la présence d'organismes;...etc.

À la suite de nos observations, il est clair que les microorganismes, visibles à l'oeil nu, sont omniprésents dans toutes les cavités. Seuls les sites #4, 5, 6, 7 et 8 de la grotte Wilson et le site #2 de la grotte des Moules ne possédaient pas de micro-organismes visibles à l'oeil. Nous retrouvons des micro-champignons dans 21 des 35 sites (la caverne Laflèche étant exclue). Il est à noter que les micro-champignons sont difficilement observables lorsqu'ils ne sont pas humidifiés, étant d'un jaune pâle, ils ne sont pas distinguables sur les calcaires cristallins impurs. Ils sont donc peut-être présents partout. Lorsqu'ils sont humidifiés, on retrouve généralement une gouttelette qui perle sur chacun des micro-champignons, leur donnant un aspect doré très scintillant à la lumière. Outre les micro-champignons, nous avons aussi observé des mousses (ou algues?) vertes dans 5 sites, soit le site #1 de la grotte de Mokidjiwinib, le site #1 de la grotte de la Maison de Pierre, ainsi que dans les trois sites de la caverne de la Mine. Ces sites sont tous situés près d'une entrée, exposés à la lumière extérieure. Nous avons aussi observé la présence de

racines dans 5 sites: sites #2 et 3 de la grotte Wilson, site #3 de la grotte des Moules et sites #2 et 3 de la grotte de la Maison de Pierre. Ces derniers se trouvent tous à une faible profondeur (verticale) de la surface.

6.1.2 ÉCHANTILLONNAGE

Le choix des échantillons qui ont servi à cette étude s'est fait de façon systématique. Ce que nous qualifions d'échantillon est une concrétion ayant une morphologie définie, localisée en un endroit délimité dans l'espace. Chacune des concrétions constituait donc un échantillon, donnant parfois plus d'un échantillon par site. De ce fait, nous avons déterminé de 1 à 8 échantillons par site (tableau 6.2), totalisant 70 échantillons répartis dans les 36 sites préalablement établis. Parmi ces échantillons, nous avons observé 36 concrétions de lait de lune, 22 communautés botryoïdales et 12 assemblages de micro-gours. On trouve généralement au moins un échantillon de chacun des trois types de spéléothèmes principaux dans chacune des cavités, à l'exception des grottes Mokidjiwinib et Mont-Cascade, ainsi qu'à la caverne de la Mine, où il n'y avait pas de micro-gours. Nous devons mentionner que la caverne Lafèche est un cas particulier, car l'exploitation touristique ayant repris son cours, il nous était impossible d'échantillonner. Par contre, l'échantillon Flè 1-A, qui est une coulée complexe de micro-gours, provient de notre collection personnelle, et a été recueilli le 5 août 1994. Par conséquent, nous n'avons aucune information supplémentaire de terrain, tel les paramètres de l'environnement, autre que la localisation du site, ainsi que l'emplacement et les caractéristiques morphologiques de l'échantillon. Pour ces mêmes raisons, nous avons été dans l'impossibilité d'établir la teneur en eau, car l'échantillon s'était asséché depuis un certain temps.

À d'autres endroits, il était impossible de récolter des échantillons, car la stabilité du milieu karstique aurait été trop fortement et irrémédiablement altérée, ce qui a été le cas des échantillons Wson 6, 7 et 8, qui sont eux aussi des coulées complexes de micro-gours. Nous avons donc pris le plus d'information possible sur le terrain, et ces échantillons ne pourront faire l'objet d'analyses en laboratoire.

Il est aussi à noter que les échantillons Pier 2-B et 5-A ne se prêtent pas à cette étude, car il s'agit d'accumulations sableuses, ce qui a été déterminé indubitablement une fois en laboratoire.

CAVERNES	CODE	SITES	ÉCHANTILLONS
Caverne de l'Ours	OUR	1	A: LDL
	OUR	2	A: LDL
	OUR	3	A: LDL
	OUR	4	A: LDL B: LDL C: M-G
	OUR	5	A: Bot. B: Bot.
	OUR	6	A: LDL B: LDL C: LDL D: LDL
Grotte Wilson	WSON	1	A: LDL B: Bot.
	WSON	2	A: LDL
	WSON	3	A: LDL B: M-G
	WSON	4	A: LDL
	WSON	5	A: Bot. B: LDL
	WSON	6	A: M-G
	WSON	7	A: M-G
	WSON	8	A: M-G
Grotte des Moules	MOUL	1	A: LDL B: LDL C: LDL D: M-G
	MOUL	2	A: LDL B: Bot.
	MOUL	3	A: LDL
Grotte Mokidjwinib	MOKI	1	A: LDL B: Bot.
	MOKI	2	B: LDL
Grottes du Lac des Îles	ÎLE	1	A: LDL B: Bot. C: M-G D: LDL
	ÎLE	2	A: LDL B: M-G C: Bot. D: Bot.
Grotte de MacKenzie King	MKZI	1	A: LDL
	MKZI	2	A: LDL B: Bot. C: M-G
	MKZI	3	A: LDL
Grotte de la Maison de Pierre	PIER	1	A: LDL B: LDL C: Bot.
	PIER	2	A: LDL B: Sable
	PIER	3	A: LDL
	PIER	4	A: M-G
	PIER	5	A: Sable B: Bot. C: Bot.
	PIER	6	A: Bot. B: M-G
	PIER	7	A: LDL
Caverne de la Mine	MINE	1	A: LDL B: Bot.
	MINE	2	A-B: Bot. C-D: LDL E-F-G: Bot.
	MINE	3	A: Bot.
Grottes du Mont-Cascade	CASC	1	A: LDL B: Bot.
Caverne Lafèche	FLÉ	1	A: M-G

TABEAU 6.2: LISTE DES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS. LDL: LAIT DE LUNE, Bot.: BOTRYOÏDES ET M-G: MICRO-GOURS

6.1.3 DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS

Une description détaillée de chacun des échantillons se retrouve à la fin de ce document (annexes B). L'observation des concrétions a permis d'établir une classification morphologique (fig. 6.1). La typologie d'un échantillon s'effectue selon la nature de la concrétion (famille) sa morphologie générale (classe) ainsi que ses caractéristiques physionomiques (sous-classes). Selon cette classification, nous avons trois grandes familles de concrétions, soit les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours.

Les laits de lune sont divisés en 7 types, soit les accumulations en chou-fleur (remplissage homogène, ayant une surface rugueuse, accumulé en petits paquets sur une surface plus ou moins lisse, ou dans des fissures, aux creux des balcons ou autres bassins capteurs), les accumulations stratifiées (remplissage stratifié, ayant une surface souvent lisse, accumulé dans un bassin capteur, ou formant une accumulation stratigraphique sur un plancher), les enrobages stratifiés (succession de couches recouvrant un substrat qui peut être une section de mur complète), les pendentifs encroûtés (accumulation stratifiée, dont la couche externe est relativement dure, suspendue à un plafond, ou un mur ayant une pente supérieure à 90°), les coulées simples lisses (accumulation souvent stratifiée à surface lisse, formant une bande étroite linéaire à sinueuse), les coulées simples en chou-fleur (accumulation souvent stratifiée à surface rugueuse, formant une bande étroite linéaire à sinueuse) et les coulées multiples en chou-fleur (minimum de deux coulées simples formant des anastomoses).

Les botryoïdes comptent 8 types, soit les boutons simples (un bulbe croissant directement sur le substrat), les boutons composés (un bouton simple possédant une seule excroissance), les champignons simples (un bulbe surélevé sur un pied), les champignons composés (un champignon simple possédant une seule excroissance), les champignons gobelets (un champignon à bulbe creux), les coraux primitifs (bouton ou champignon possédant deux excroissances), les coraux moyens (champignon possédant trois excroissances) et les coraux matures (champignon possédant plus de trois excroissances).

Les micro-gours sont subdivisés en 3 types, soit les coulées simples (un gour sous l'autre formant un chenal), les coulées multiples (au moins deux coulées simples formant des anastomoses) et les coulées complexes (gours disposés plus ou moins en quinconce).

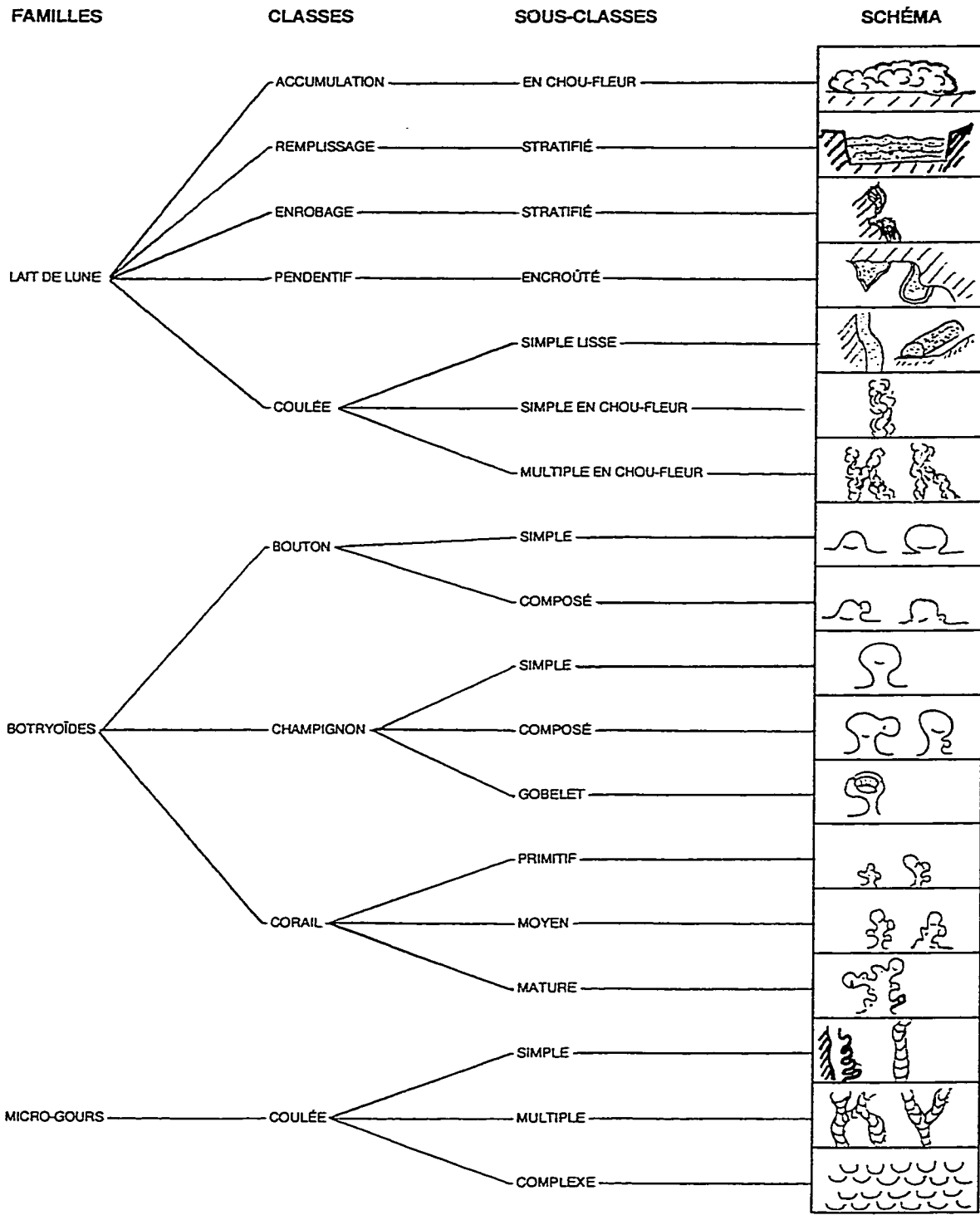


FIGURE 6.1: DIAGRAMME DE CLASSIFICATION DES CONCRÉTIONS SELON LEUR MORPHOLOGIE.

Dans les sections qui suivent, nous traitons de la fréquence relative de chacun des types de concrétions selon leur famille; laits de lune, botryoïdes et micro-gours, en décrivant leurs aspects morphologiques qui les caractérisent.

6.1.3.1 LAIT DE LUNE

Pour les 7 types de lait de lune (tableau 6.3), on remarque que les remplissages stratifiés sont les plus fréquents, comptant pour 25% des échantillons, suivis de près par les accumulations en chou-fleur avec 23% des échantillons, puis 17% pour les pendentifs encroûtés, 11% sous forme de coulées simples en chou-fleur. Les enrobages stratifiés, les coulées simples lisses ainsi que les coulées multiples en chou-fleur comptent chacun pour 8% des échantillons.

TYPE	FRÉQUENCE RELATIVE(%)	AIRE	ÉPAISSEUR	ÉTATS
ACCUMULATION EN CHOU-FLEUR	23	10 cm ² -1.0 m ²	0.5-30 cm	humide: 2 / sec: 6
REPLISSAGE STRATIFIÉ	25	10 cm ² -2.0 m ²	5- >50 cm	humide: 6 / sec: 3
ENROBAGE STRATIFIÉ	8	20 cm ² - >5.0 m ²	0.1-5 cm	humide: 2 / sec: 1
PENDENTIF ENCROÛTÉ	17	25-40 cm ²	5-25 cm	humide: 5 / sec: 1
COULÉE SIMPLE LISSE	8	10-50 cm ²	1-5 cm	humide: 1 / sec: 2
COULÉE SIMPLE EN CHOU-FLEUR	11	10-25 cm ²	1-10 cm	humide: 3 / sec: 1
COULÉE MULTIPLE EN CHOU-FLEUR	8	25 cm ² - >5.0 m ²	5-10 cm	humide: 1 / sec: 2

TABLEAU 6.3: COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE LAIT DE LUNE

La surface couverte par ces divers laits de lune varie de quelques centimètres carrés à plusieurs mètres carrés, dont la valeur minimum de 10 cm² se trouve sous diverses formes dont des accumulations en chou-fleur (Moul 3-A, Pier 1-A), un remplissage stratifié (Our 4-A), une coulée simple lisse (Mkzi 3-A) et une coulée simple en chou-fleur (Mine 2-D). En ce qui concerne la valeur maximum de plus de 5.0 m², on la retrouve principalement sous formes d'enrobages stratifiés (Wson 3-A et Mine 1-A) et une coulée multiple en chou-fleur (Moki 2-A). On remarque aussi que tous les échantillons de types pendentifs stratifiés et coulées simples en chou-fleur couvrent des aires plutôt homogènes dont la différence entre les aires

minimales et maximales est de seulement 15 cm² (25-40 cm² et 10-25 cm² respectivement).

Les épaisseurs varient de quelques millimètres à plus d'un demi-mètre, ayant une épaisseur minimale de 1 mm sous forme d'enrobage stratifié (Mine 1-A), et une épaisseur maximale de plus de 50 cm pour un remplissage stratifié (Wson 4-A). On peut observer que les échantillons de types enrobages stratifiés et coulées simples lisses sont tous de très faibles épaisseurs ne dépassant pas 5 cm, et que les échantillons de types accumulations en chou-fleur, remplissages stratifiés et pendentifs stratifiés atteignent des épaisseurs dépassant les 20 cm.

Pour ce qui est de l'état des échantillons, on voit que l'on a des spécimens humides et secs dans chacune des catégories, mais que la plupart des types ont une majorité plus ou moins grande d'échantillons humides, à l'exception des dépôts de types accumulations en chou-fleur, coulées simples lisses et coulées multiples en chou-fleur qui eux sont généralement plus secs. Il est à noter que l'humidité relative du site ne semble pas avoir d'influence directe sur l'état de la concrétion. Par exemple, on remarque que tous les remplissages stratifiés et les accumulations en chou-fleur que l'on retrouve dans la grotte des Moules, qui est un réseau très actif, sont secs, bien que l'humidité relative est saturée à 100%, par contre, l'échantillon Casc 1-A, qui est lui aussi de type accumulation en chou-fleur, est humide et pâteux, dans un site qui se trouve dans un réseau fossile où l'humidité relative est de 80%. On retrouve aussi un enrobage stratifié humide et pâteux dans la caverne de la Mine (Mine 1-A), dans un site où l'humidité relative n'est que de 72%. Le facteur déterminant pour l'état d'une concrétion de lait de lune semble être relié à un apport aqueux externe, qui humecterait et nourrirait le dépôt par percolation, ce qui selon plusieurs auteurs consisterait à la phase liquide du spéléothème (Bernasconi, 1961, 1981; Gèze, 1961; Moore et Sullivan, 1980; Fisher, 1993). D'autres affirment que les concrétions de lait de lune seraient produites par les eaux d'infiltration, et que cette solution peut aussi bien former d'autres spéléothèmes (Gradzinski et Radomski, 1957; Mélon et Bourguignon, 1962). Lorsque cette source aqueuse est interrompue pour une raison ou une autre, le dépôt commence à se déshydrater par évaporation en faveur de l'air atmosphérique. La perte en eau à ce moment est probablement contrôlée par l'humidité relative de l'air, car moins l'air est saturé plus il y a possibilité d'évaporation.

6.1.3.2 BOTRYOÏDES

Les échantillons de botryoïdes peuvent être morphologiquement homogènes, ce qui est le cas de 14 des 22 échantillons de botryoïdes, dont 6 sont composés de boutons simples, soit les échantillons Our 5-A, Mine 2-E, Mine 3-A, Wson 5-A, Île 2-D et Mkzi 2-B. Seul l'échantillon Mine 2-B est constitué entièrement de boutons composés. Île 1-B comporte que des champignons simples, et Ours 5-B présente que des champignons gobelets. Les échantillons Mine 1-B et Moki 1-B sont formés de coraux primitifs, tandis que Pier 1-C, Mine 2-F de même que Wson 1-B contiennent uniquement des coraux matures. Nous n'avons aucun échantillon pur de champignons composés ou de coraux moyens. Les échantillons peuvent ainsi comporter plus d'un types de botryoïdes à la fois. De ce fait, nous parlons donc de communautés botryoïdales. Ce qui est le cas de plusieurs échantillons. Pier 5-B, Pier 5-C et Mine 2-G sont composés de champignons simples et composés. Île 2-C comprend des boutons et des champignons simples. Casc 1-B et Pier 6-A sont constitués de champignons et de boutons, simples et composés. Moul 2-B est formé d'un ensemble de coraux primitifs et moyens, et Mine 2-A présente une combinaison de coraux moyens et matures ainsi que des boutons simples.

On remarque que les botryoïdes du type bouton simple sont les plus communs avec une fréquence relative de 28% (tableau 6.4), suivis des champignons simples ayant une fréquence de 18%. Non loin derrière on retrouve les champignons et les boutons composés comptant chacun pour 15% et 13%, suivis de près par les coraux matures, primitifs et moyens ayant des fréquences de 10% et 8% et 5% respectivement. Tandis que les champignons gobelets sont les plus rares ayant une fréquence de 3%, qui correspond à un seul échantillon (Our 5-B). De façon générale, les formes plus simples sont plus fréquentes que les formes les plus développées, et lorsque nous observons des morphologies plus complexes, on retrouve communément des analogues élémentaires. Seul les coraux semblent faire exception car les matures sont les plus fréquents, suivis des primitifs, et les coraux moyens sont les plus rares. De plus, nous avons aussi observé 3 échantillons purs de coraux matures.

TYPE	FRÉQUENCE RELATIVE(%)	DISTRIBUTION	AIRE	HAUTEUR	DIAMÈTRE
BOUTON SIMPLE	28	-isolé, rare -homogène variant de 0.2 à 2.0 cm -très dense -bouquets éparses	1-2 cm ² 100 cm ² -2000 cm ² 10 cm ² 25-50 cm ²	0.1-1.0 cm	0.1-2.0 cm
BOUTON COMPOSÉ	13	-homogène variant de 0.1 à 2.0 cm -bouquets éparses	25 cm ² 25-50 cm ²	0.1-1.5 cm	0.1-1.0 cm
CHAMPIGNON SIMPLE	18	-isolé, rare -homogène variant de 1.0 à 5.0 cm -bouquets éparses	1 cm ² 500 cm ² 25-50 cm ²	0.1-2.0 cm	0.1-1.5 cm
CHAMPIGNON COMPOSÉ	15	-homogène variant de 1.0 à 5.0 cm -bouquets éparses	500 cm ² 25-50 cm ²	0.5-2.0 cm	0.5-1.5 cm
CHAMPIGNON GOBELET	3	-bouquets compacts	1000 cm ²	0.5-1.0 cm	0.1-0.3 cm
CORAIL PRIMITIF	8	-homogène variant de 0.1 à 0.5 cm -bouquets éparses -bouquets compacts	1000 cm ² 2-4 cm ² 10 cm ²	0.5-1.0 cm	0.1-1.0 cm
CORAIL MOYEN	5	-isolé, rare -bouquets compacts	1-2 cm ² 10 cm ²	0.5-1.0 cm	0.1-0.5 cm
CORAIL MATURE	10	-isolé, rare -homogène variant de 0.5 à 2.0 cm -bouquets éparses	1-2 cm ² 40-60 cm ² 10 cm ²	0.5-5.0 cm	0.2-3.0 cm

TABLEAU 6.4: COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE BOTRYOÏDES

La distribution de chacun de ces types de botryoïdes est très variable, passant de rare à très dense ainsi que d'individuelle homogène à des bouquets formés de plusieurs spécimens. Il ne semble pas avoir de patron préférentiel pour l'une ou l'autre des catégories, à l'exception des champignons gobelets qui sont disposés en bouquets compacts, mais ceci est vraisemblablement issu du fait que nous avons observé qu'un seul échantillon, soit Our 5-B. On remarque aussi que les boutons composés, les champignons composés ainsi que les coraux primitifs ne sont jamais isolés.

L'aire de dispersion fluctue elle aussi considérablement, variant d'un centimètre carré à plus d'un mètre carré. Les boutons simples figurent parmi les plus inconstants, passant de 1 cm² à 2.0 m², qui est aussi la plus grande surface couverte, et correspond à un échantillon particulier, Our 5-A, composé de boutons simples. Ils sont suivis par les coraux primitifs, dont l'aire varie de 10 cm² à 1.0 m², puis les champignons simples dont la dispersion passe de 25 cm² à 1.0 m². À l'opposé, les communautés botryoïdales composées en partie de coraux moyens ont une distribution beaucoup plus stable, variant de 1 à 10 cm² seulement, ce qui coïncide avec la plus petite gamme, suivis des boutons composés qui varient de 25 à 50 cm², et des coraux matures qui eux couvrent des surfaces de 1 à 60 cm². L'échantillon de champignons gobelets couvre une surface de 1.0 m². On remarque que ce sont les échantillons dont la

distribution est homogène qui couvrent les plus grandes surfaces, et ce pour tous les types de botryoïdes, à l'exception des boutons composés, dont l'aire des échantillons en bouquets éparses est plus vaste. De plus, les échantillons dont la distribution est isolée rare sont ceux dont l'aire de dispersion est la moins grande, ce à quoi nous pouvions nous attendre.

Les hauteurs et les diamètres qui sont indiqués dans le tableau représentent les valeurs minimales et maximales pour chacun des types. Les dimensions individuelles sont généralement proportionnelles à la complexité du type de botryoïde. C'est-à-dire de haut en bas du tableau 6.4. Les boutons ont une hauteur minimale de 0.1 cm et maximale de 1.5 cm, les champignons eux varient de 0.5 à 2.0 cm, et les coraux de 0.5 à 5.0 cm. Tandis que les diamètres varient de 0.1 à 2.0 cm pour les boutons, de 0.1 à 1.5 cm pour les champignons et de 0.1 à 3.0 cm pour les coraux. Comme nous pouvons le constater, les boutons peuvent avoir un diamètre plus grand que celui des champignons. Il faut cependant noter qu'un seul échantillon de boutons atteint cette dimension, soit Our 5-A, mais que tous les autres échantillons possèdent un diamètre ne dépassant pas 1.0 cm.

6.1.3.3 MICRO-GOURS

Contrairement aux autres familles des spéléothèmes, la fréquence des échantillons observés augmente avec la complexité typologique. L'agencement de micro-gours le plus commun est celui des coulées complexes, ayant une fréquence relative de 58% (tableau 6.5), suivi par les coulées composées, qui comptent pour 25%, puis les coulées simples représentant 17%. Ce phénomène s'explique principalement par la nature de la solution originelle de ces dépôts. Si nous reprenons l'hypothèse de genèse des micro-gours, leur édification prend naissance sur des irrégularités diverses de la surface, capable de perturber suffisamment l'écoulement d'un film d'eau pour provoquer un dégazage initiateur de la précipitation des carbonates en solution saturée ou sursaturée. D'après nos résultats, il est clair que les ruissellements uniformes répondant aux critères de formation des micro-gours sont plus communs dans les cavernes que nous avons visitées, et les ruissellements en chenaux diffus ou isolés sont plus rares.

TYPE	FRÉQUENCE RELATIVE(%)	AIRE	LARGEUR	LONGUEUR	PROFONDEUR	ÉTAT
COULÉE SIMPLE	17	0.001m ² - 0.5m ²	0.5 - 1.5 cm	0.5 cm	0.2 cm	1 actif, 1 inactif
COULÉE COMPOSÉE	25	0.05m ² - 1.0m ²	1.5 - 2.0 cm	1.0 cm	0.2 cm	2 actifs, 1 inactif
COULÉE COMPLEXE	58	0.05m ² ->5.0m ²	0.5 - 6.0 cm	0.5 - 4.0 cm	0.2 - 2.0 cm	6 actifs, 1 inactif

TABLEAU 6.5: COMPILATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE MICRO-GOURS

De façon générale, l'aire ainsi que les dimensions des différentes coulées augmentent proportionnellement avec le degré de complexité de la concrétion. Les coulées simples couvrent des surfaces aussi petites que 10 cm² et ne dépassant pas 500 cm², l'aire couverte par les coulées multiples varient de 50 cm² à 1.0 m², tandis que les coulées complexes passent de 50 cm² à plus de 5.0 m². En ce qui concerne les dimensions individuelles pour les coulées simples, elles varient de 0.5 à 1.5 cm de largeur par 0.5 cm de longueur par 0.2 cm de profondeur. Dans le cas des coulées multiples, elles sont de 1.5 à 2.0 cm de largeur, 0.2 cm de longueur et 0.2 cm de profondeur. Les coulées complexes sont un peu plus variables, passant de 0.5 à 6.0 cm de largeur, de 0.5 à 4.0 cm de longueur et de 0.2 à 2.0 cm de profondeur.

L'état des échantillons de micro-gours est basé sur l'humidité des concrétions. Lorsqu'un échantillon est très humide ou qu'on peut y observé un fluide mobile sur le spéléothème, il est dit actif. Lorsque l'alimentation en eau est interrompue, l'accroissement des micro-gours s'arrête, et la concrétion s'assèche peu à peu. À ce moment là les coulées, quelque soit la sous-classe, sont considérées comme inactives. Sur les 12 échantillons que nous avons observés, la grande majorité était active, seulement 3 échantillons étaient inactifs, soit 1 par type de concrétion. Nous avons donc trouvé une coulée simple active (Mkzi 2-C) et une inactive (Wson 3-B), 2 coulées multiples actives (Pier 4-A et Île 1-C) et une inactive (Moul 1-D), ainsi que 6 coulées complexes actives (Our 4-C, Wson 6-A, Wson 7-A, Wson 8-A, Pier 6-B et Île 2-B) et une inactive (Flè 1-A). Tout comme les concrétions de lait de lune, l'état des divers types de micro-gours ne semble pas relié à la température ou à l'humidité relative des sites, mais plutôt à la présence ou non d'une source aqueuse active.

6.1.4 LOCALISATION DES ÉCHANTILLONS À L'INTÉRIEUR DES SITES

Les paramètres de localisation que nous avons observés ou mesurés sont l'emplacement dans le site (plafond, mur, balcon ou plancher), leur hauteur par rapport au sol, la pente et le matériel qui sert de substrat. Selon nos résultats, la localisation des spéléothèmes ne semble pas spécifique pour un type de concrétion défini (tableau 6.6). Nous avons trouvé des échantillons de chacun des types sur des murs (30 échantillons), des plafonds (17 échantillons), des balcons (17 échantillons) ainsi que sur des planchers (5 échantillons). Par contre, on remarque qu'il y a tout de même des tendances préférentielles selon les cas. On note donc que les laits de lune se sont principalement développés sur des plafonds et des murs, les botryoïdes semblent se plaire sur des murs, et les micro-gours se retrouvent le plus souvent sur des murs, planchers et balcons. Il serait bon de signaler que tous les échantillons qui ont été observés sur les planchers, étaient situés à l'abri du va et vient de différents visiteurs. Les dix cavernes affectées à cette étude, sont fréquemment visitées par divers mammifères dont des rats laveurs, des porcs-épics et même des castors (Grotte des Moules). Ces cavités sont aussi très connues des spéléologues sportifs, et sont des lieux privilégiés des grands rassemblements annuels de la Société Québécoise de Spéléologie, sans compter que la Caverne Lafèche a fait l'objet d'une exploitation touristique pendant 50 ans, s'étalant de 1923 à 1973. Ces activités pourraient peut-être expliquer le nombre peu élevé de spéléothèmes sur les planchers. De ce fait, les balcons sont aussi considérés comme des planchers surélevés, protégés d'une altération incontrôlable.

LOCALISATION	MICRO-GOURS	BOTRYOÏDES	LAITS DE LUNE	TOTAL
PLANCHER	3	1	1	5
BALCON	3	6	8	17
MUR	5	11	15	31
PLAFOND	1	4	13	18
TOTAL	12	22	37	71

TABLEAU 6.6: FRÉQUENCE ABSOLUE DES DIVERS SPÉLÉOTHÈMES SELON LEUR LOCALISATION

LOCALISATION	MICRO-GOURS	BOTRYOÏDES	LAITS DE LUNE	TOTAL
PLANCHER	25	5	3	7
BALCON	25	27	22	24
MUR	42	50	40	44
PLAFOND	8	18	35	25
TOTAL	100	100	100	100

TABLEAU 6.7: FRÉQUENCE RELATIVE (%) DES DIVERS SPÉLÉOTHÈMES SELON LEUR LOCALISATION

Les valeurs des fréquences relatives (tableau 6.7) nous démontrent qu'une grande partie des concrétions de lait de lune se trouvent sur les murs avec un pourcentage de 40% des spécimens, principalement sous forme de coulées (simples et multiples). Par contre, elles sont suivies de près par celles que l'on trouve sur des plafonds dont la fréquence est de 35%, et ce sous toutes ses formes (pendentifs, accumulations, remplissages,...). Nous trouvons 25% des échantillons sur des balcons et des planchers, comptant chacun pour 22% et 3% respectivement. Pour les botryoïdes de tous types, nous avons trouvé la majorité des échantillons, 50%, sur des murs, suivis par des balcons (30%) et planchers (5%) totalisant 35%. Nous n'avons trouvé que 15% des sujets sur des plafonds. En ce qui concerne les micro-gours, nous avons trouvé une majorité de 50% des formations sur des planchers et balcons, comptant chacun pour 25%, sous la forme exclusive de coulées complexes, suivi de près par des coulées simples et composées sur des murs avec une fréquence de 42%. Nous avons observé qu'un seul échantillon (8%) sur un plafond sous la forme d'une coulée simple (Mkzi 2-C).

Le tableau 6.8 résume la compilation des autres paramètres analysés pour la localisation des échantillons. Pour la description de la localisation détaillée par échantillon, se référer à l'annexe B.

	LAIT DE LUNE			BOTRYOÏDES			MICRO-GOURS		
	HAUTEUR	PENTE	SUBSTRAT	HAUTEUR	PENTE	SUBSTRAT	HAUTEUR	PENTE	SUBSTRAT
PLANCHER	0.0 m	10°	REMP.	0.0 m	0°	ÉBOUL	0.0 m	0-90°	REMP. STAL
BALCON	0.5-2.5 m	0-20°	RM	1.0-1.5 m	0-60°	LDL, ÉBOUL, RM	0.0-1.0 m	0-80°	LDL, RM
MUR	0.0-1.5 m	5-135°	REMP, RM	0.05-2.0 m	45-100°	LDL, RM	0.0-4.5 m	45-95°	RM
PLAFOND	0.75-4.0 m	90-180°	RM, INCLU	1.0-2.5 m	115-130°	LDL, RM	1.5 m	135°	RM

TABLEAU 6.8: COMPILATION DES PARAMÈTRES DE LOCALISATION. REM: remplissage; RM: roche-mère; INCLU: inclusion; EBOUL: éboulis; LDL: lait de lune; STAL: stalagmite

Nous remarquons que la hauteur varie de 0.0m à 4.5m dans le cas des laits de lune et des micro-gours, et de 0.0m à 2.5m pour les botryoïdes. Dans tous les cas, la hauteur minimale se trouve au plancher ou à la jonction d'un mur et du plancher pour certains échantillons de laits de lune. Les maximum se trouvent généralement au plafond, à l'exception d'un enrobage de lait de lune (Wson 3-A) et d'une série de coulées simples de micro-gours (Wson 3-B) qui couvrent un mur du plancher jusqu'au plafond (qui se situe à une hauteur de 4.5m), dans une caverne où la hauteur des échantillons sur les plafonds ne dépasse pas 1.5m. Ceci s'explique par une inaccessibilité des échantillons qui se trouvaient sur des plafonds excédant une hauteur de 2.5m. Tout comme la localisation, la hauteur par rapport au plancher ne semble pas influencer la présence ou l'absence de l'un ou l'autre des spéléothèmes. Il nous est aussi impossible de définir des tendances préférentielles. Ceci est vrai aussi pour les valeurs de pentes qui varient de 0° à 180° pour les laits de lune, de 0° à 130° pour les botryoïdes et de 0° à 135° pour les micro-gours.

Les substrats des différents types de concrétion sont eux aussi très variables, passant de la roche-mère (marbre), à des éboulis de natures diverses (roche-mère, inclusions insolubles,...), sur des sédiments de remplissages (vraisemblablement d'origine fluviale), ainsi que sur d'autres concrétions dont des accumulations de lait de lune et même des stalagmites dans le cas des micro-gours. Le matériel qui sert de base ne semble donc pas vraiment déterminant dans le développement des différentes concrétions, si ce n'est que les micro-gours ne semblent pas se développer sur des éboulis ou des inclusions, les botryoïdes ne semblent pas croître sur des inclusions visibles et nous n'avons pas trouvé de dépôt de lait de lune sur des éboulis.

6.1.5 ASSOCIATION SPATIO-TEMPORELLE VISIBLE SUR LE TERRAIN

Dans tous les cas, la disposition des concrétions ne semble pas aléatoire, mais plutôt organisée, car il semble y avoir une gradation entre les divers types. Généralement, on trouve des concrétions plus développées au centre, tandis que celles moins bien définies se trouvent en périphérie. Le passage de l'une à l'autre est graduelle, que ce soit entre divers types d'une même famille (figure 6.2) ou de famille différente (figure 6.3).

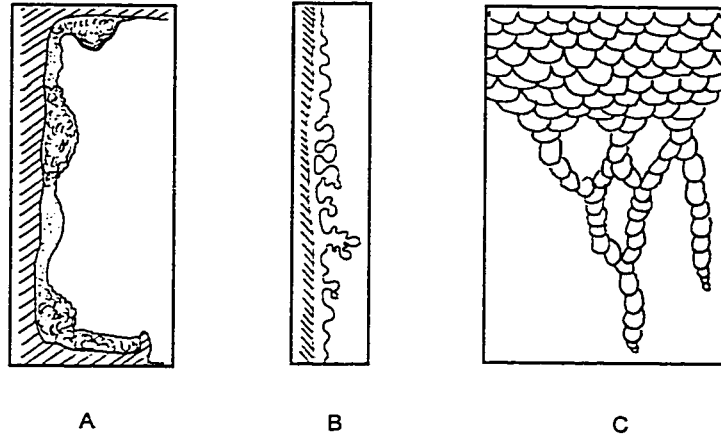


FIGURE 6.2 MODELES DE DISPOSITION DE CONCRÉTIIONS APPARTENANT À UNE MÊME FAMILLE. A: LAITS DE LUNE B: BOTRYOÏDES C: MICRO-GOURS

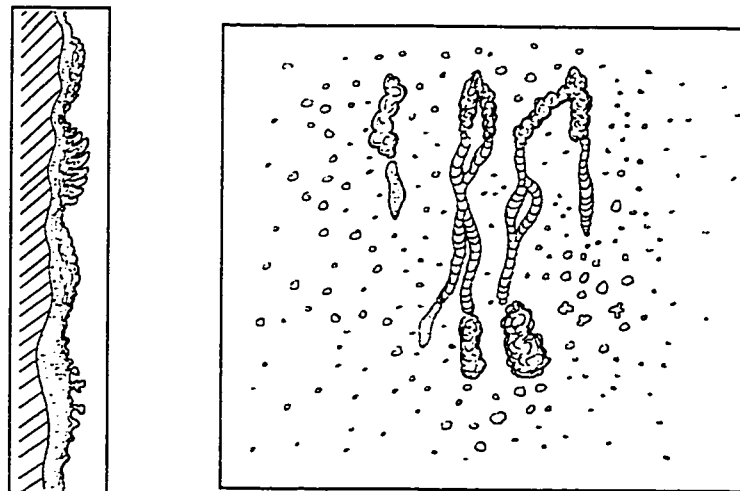


FIGURE 6.3 SCHÉMA DÉMONSTRANT L'AGENCEMENT SPATIAL DES CONCRÉTIIONS LORSQU'IL Y A COEXISTENCE DES TROIS GRANDES FAMILLES DANS UN MÊME SITE

La majorité des sites limités à des concrétions appartenant à la même famille étaient composés de divers types de lait de lune. Dans les sites où l'on trouvait que des botryoïdes ou micro-gours, les concrétions étaient souvent recouvertes d'une mince pellicule de lait de lune de type enrobage. Lorsque qu'il y avait coexistence de plus d'un type de concrétion, nous avons remarqué qu'il y avait toujours des dépôts de lait de lune de type enrobage qui couvraient le substrat dans les espaces inter-concrétions, ainsi

que sur les divers dépôts. De plus, plusieurs botryoïdes (MOUL 2)⁵ et micro-gours (WSON 3) se sont développés directement sur des accumulations de lait de lune. Nous avons aussi observé des excroissances botryoïdales sur certains pendentifs de lait de lune (WSON 5), ainsi que sur des extrémités de micro-gours (PIER 7).

6.2 ANALYSES EN LABORATOIRE

Les échantillons qui ont été prélevés sur le terrain ont fait l'objet de plusieurs analyses en laboratoire. Dans un premier temps, nous avons mesuré la teneur en eau de chacun des échantillons (section 6.2.1). Deuxièmement nous les avons tous observés à la loupe binoculaire (grossissement de 45X) en lumière naturelle (section 6.2.2), afin d'identifier leurs caractéristiques structurales. Nous avons déterminé 10 différentes structures, ce qui nous a permis d'établir des classes regroupant les échantillons en 13 différents faciès. Suite à cette étape, nous avons sélectionné un sous-échantillon représentant chacune des structures différenciées et quelques uns comportant des traits différents, afin d'identifier leur composition minéralogique à l'aide d'une analyse de diffraction aux rayons X (section 6.2.3). Nous avons aussi désigné un échantillon type par faciès distingué, ainsi que quelques échantillons atypiques, sur lesquels nous avons effectué des lames minces, que nous avons observées au microscope pétrographique (grossissement de 400X) en lumière polarisée, afin d'identifier les caractéristiques texturales et minéralogiques pour chacune des structures formant les faciès (section 6.2.4). Nous avons accordé une attention particulière à la nature des transitions qui existaient entre les éléments analysés à chacune des étapes.

5: Les sites énumérés ne sont que des exemples, les phénomènes peuvent être observés dans d'autres sites.

6.2.1 TENEUR EN EAU

Les échantillons qui ont été récoltés sur le terrain⁶ ont fait l'objet d'une analyse de la teneur en eau, i.e. une mesure du pourcentage de poids que constitue la composante H₂O liquide. Cette mesure nous permet de déterminer avec plus de précision l'état des différents types de concrétions. Les trois familles de spéléothèmes à l'étude sont génétiquement reliées à une phase aqueuse d'une façon ou d'une autre. La formation des laits de lune s'effectue selon un système en deux phases, une phase solide minérale et une phase liquide aqueuse. Les botryoïdes sont issus de la précipitation des carbonates à partir d'une solution aqueuse migrant à l'intérieur d'un conduit central par capillarité ou ruisselant à leur surface. Les micro-gours sont des barrages érigés par le dégazage d'une eau courante suite à une perturbation de l'écoulement. Le taux d'hydratation est donc une caractéristique physico-chimique importante dans la description de ces types de spéléothèmes. Les tableaux 6.9, 6.10 et 6.11 contiennent les résultats obtenus pour les échantillons de laits de lune, de botryoïdes et de micro-gours respectivement. Dans certains cas, nous avons divisé des échantillons en plusieurs sous-échantillons car ils présentaient des zones distinctes associées à une stratigraphie temporelle.

La teneur en eau des divers échantillons varie de 0.25% (Île 1B) à 75.66% du poids (Île 2A). La moyenne est de 27.95%. La médiane est de 29.70%. Comme nous pouvons l'observer, les valeurs peuvent varier considérablement à l'intérieur d'une même caverne (min. et max. sont des échantillons provenant de la caverne du Lac des Îles). Selon les mesures effectuées sur le terrain, ce phénomène n'est pas dû aux conditions atmosphériques des différents sites (la température et l'humidité relative des deux sites étaient les mêmes, soit 16°C et 100% respectivement), ni à la localisation du site à l'intérieur de la caverne (les deux sites se trouvaient qu'à quelques mètres l'un de l'autre), mais semble découler de certaines caractéristiques des concrétions; soit le type (le premier étant des botryoïdes et le second du lait de lune), l'état de la concrétion (actif ou inactif) et leur positionnement (Île 1-B était accroché à un mur incliné à 135°, et Île 2-A reposait sur le plancher d'un balcon, dont l'inclinaison était relativement peu élevée à 18°).

6: Seul les échantillons Île 2-D et Flè 1-A n'ont pu se prêter à cette analyse car les marges d'erreurs étaient trop élevées. Le premier était encore encrûs sur une partie de son substrat (roche-mère) et en était difficilement extractible. Le deuxième était déjà déshydraté depuis un certain temps comme nous l'avons expliqué dans la section 6.1.

Suite à ces observations, nous croyons que l'analyse de la teneur en eau doit s'effectuer par famille de spéléothème. Les trois prochaines sections (6.2.1.1; 6.2.1.2 et 6.2.1.3) traitent des résultats obtenus pour les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours individuellement.

6.2.1.1 LAIT DE LUNE

Dans le cas du lait de lune, comme le dicte la définition moderne, il est constitué d'un système en deux phases, une phase solide minérale carbonatée et une phase liquide aqueuse. Si l'alimentation en eau diminue ou cesse, l'accroissement de la concrétion ralentie ou s'arrête entièrement. Si les conditions environnementales sont propices à l'évaporation, le dépôt perd progressivement sa composante H₂O au profit de l'air atmosphérique. La teneur en eau (tableau 6.9) des 56 échantillons et sous-échantillons de lait de lune varie de 0.51% (Mine 1-A) à 75.66% (Île 2-A). La moyenne est de 35.30% et la médiane de 35.61%.

ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%
OUR 1-A	43.79	OUR 6-B-1	65.71	WSON 4-A-1	31.09	ÎLE 1-A	4.99
OUR 2-A	35.38	OUR 6-B-2	50.68	WSON 4-A-2	34.02	ÎLE 1-D	52.60
OUR 3-A	40.00	OUR 6-B-3	46.24	WSON 4-A-3	34.67	ÎLE 2-A	75.66
OUR 4-A	57.95	OUR 6-B-4	62.69	WSON 4-A-4	43.06	MKZI 1-A	25.46
OUR 4-B	59.99	OUR 6-C-1	60.88	WSON 5-B-1	17.88	MKZI 2-A	20.57
OUR 5-B-1	18.65	OUR 6-C-2	42.31	WSON 5-B-2	35.67	MKZI 3-A	23.55
OUR 5-B-2	42.11	OUR 6-C-3	48.08	WSON 5-B-3	49.20	PIER 1-A	8.63
OUR 5-B-3	34.37	OUR 6-D-1	51.16	MOUL 1-A	29.65	PIER 1-B	24.74
OUR 5-B-4	43.88	OUR 6-D-2	47.15	MOUL 1-B	30.15	PIER 2-A	14.26
OUR 5-B-5	53.75	OUR 6-D-3	53.02	MOUL 1-C	50.78	PIER 3-A	23.33
OUR 5-B-6	41.28	WSON 1-A	8.26	MOUL 2-A	0.60	MINE 1-A	0.75
OUR 6-A-1	52.04	WSON 2-A	35.55	MOUL 3-A	29.77	MINE 2-C	0.51
OUR 6-A-2	39.65	WSON 3-A-1	36.52	MOKI 1-A	26.70	MINE 2-D	0.80
OUR 6-A-3	61.47	WSON 3-A-2	38.74	MOKI 2-A	17.21	CASC 1-A	18.99

TABLEAU 6.9 TENEUR EN EAU POUR LES ÉCHANTILLONS ET SOUS-ÉCHANTILLONS DE LAIT DE LUNE

Selon la courbe de viscosité plastique de Bernasconi (1961), des laits de lune possédant une teneur en eau entre 47 et 65% devraient être considérés en construction. Ce pourcentage constitue une moyenne, et peut varier selon la grosseur des particules de la composante solide; i.e. plus les particules sont petites, plus le facteur d'hydratation (capacité de rétention d'eau) peut être élevé. Les variations dans la courbe dues aux différences texturales des dépôts sont considérées minimales, seulement quelques pourcentages. De ce fait, nous utilisons le modèle établi par Bernasconi (Bernasconi, 1961 fig. 5) pour qualifier nos échantillons (fig. 6.4).

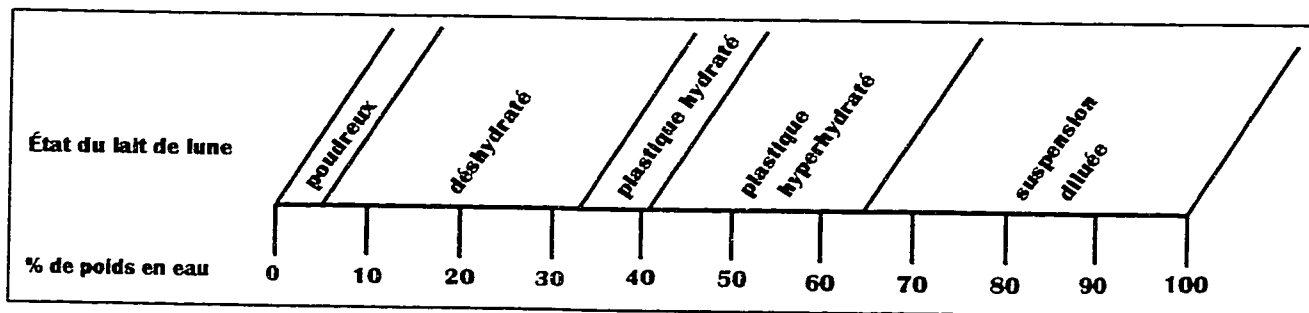


FIGURE 6.4: ÉTAT DU LAIT DE LUNE BASÉ SUR LA TENEUR EN EAU. ADAPTATION DE LA FIGURE 5 DE BERNASCONI (1961).

Suivant ce modèle, les laits de lune sont divisés en 4 classes basées sur la teneur en eau. La première classe regroupe les laits de lune dont la teneur en eau varie de 0 à 5%, ils sont désignés sous le terme poudreux et sont constitués d'une poudre en suspension sèche. Dans cette catégorie, nous n'avons que 5 échantillons, soit Moul 2-A, Île 1-A, Mine 1-A, Mine 2-C et Mine 2-D. La deuxième classe est celle des laits de lune déshydratés qui possèdent des teneurs en eau variant de 5 à ≈33%. Ils sont composés d'une poudre humide ainsi que de quelques agglomérations de plus en plus fréquentes. 17 de nos échantillons et sous-échantillons se trouvent sous cette catégorie, soit Our 5-B-1, Wson 1-A, Wson 4-A-1, Wson 5-B-1, Moul 1-A, Moul 1-B, Moul 3-A, Moki 1-A, Moki 2-A, Mkzi 1-A, Mkzi 2-A, Mkzi 3-A, Pier 1-A, Pier 1-B, Pier 2-A, Pier 3-A et Casc 1-A.

La troisième classe regroupe les dépôts ayant des teneurs en eau variants de ≈33 à ≈41%. Ils sont qualifiés de plastiques et hydratés et possèdent une composition semblable à celle des laits de lune

déshydratés, mais avec beaucoup plus d'agglomérations et ainsi que des traces de suspension concentré formant une pâte. Nous avons 12 échantillons et sous-échantillons qui se classent dans cette catégorie, soit Our 2-A, Our 3-A, Our 5-B-3, Our 5-B-4, Our 5-B-6, Our 6-A-2, Wson 2-A, Wson 3-A-1, Wson 3-A-2, Wson 4-A-2, Wson 4-A-3 et Wson 5-B-2. La dernière classe regroupe les laits de lune dont la teneur en eau varie de ≈41 à 65%. Ils sont plastiques hyperhydratés et sont entièrement pâteux. Nous avons 21 échantillons et sous-échantillons dans cette catégorie, soit Our 1-A, Our 4-A, Our 4-B, Our 5-B-2, Our 5-B-5, Our 6-A-1, Our 6-A-3, Our 6-B1, Our 6-B-2, Our 6-B-3, Our 6-B-4, Our 6-C-1, Our 6-C-2, Our 6-C-3, Our 6-D-1, Our 6-D-2, Our 6-D-3, Wson 4-A-4, Wson 5-B-3, Moul 1-C et Île 1-D.

Nous remarquons que les zones des échantillons composés peuvent se trouver dans différentes classes. L'échantillon Our 5-B comporte une zone déshydratée (Our 5-B-1), 2 zones plastiques hydratées (Our 5-B-3 et Our 5-B-6) et 3 zones plastiques hyperhydratées (Our 5-B-2, Our 5-B-4 et Our 5-B-5), ce qui est principalement issu de différences zonales dans la structure du dépôt (voir section 6.2.2.1). La même explication s'applique aux différences observées pour l'échantillon Our 6-A composé de 2 zones plastiques hyperhydratées (Our 6-A-1 et Our 6-A-3) et une zone plastique hydratée (Our 6-A-2) dont la valeur est très proche de la limite de l'hyperhydratation (39.65%). Les échantillons Our 6-B, Our 6-C et Our 6-D sont composés entièrement de zones plastiques hyperhydratées, dont les différences sont vraisemblablement issues de différences structurales, de même que l'échantillon Wson 3-A, comportant des zones exclusivement plastiques hydratées.

Par contre, les échantillons Wson 4-A et 5-B démontrent un accroissement constant de la teneur en eau de l'intérieur vers l'extérieur, ce qui peut sembler inhabituel. L'échantillon Wson 4-A est un lait de lune de type remplissage stratifié formant le sol, dont l'épaisseur est supérieure à 30 cm. La couche supérieure (Wson 4-A-1) est déshydratée (31.09%), les couches intermédiaires (Wson 4-A-2 et Wson 4-A-3) sont plastiques hydratées (34.02 et 34.67% respectivement) et la couche inférieure (Wson 4-A-4) est plastique hyperhydratée (43.06%). Cette gradation semble s'expliquer par la force gravitationnelle.

L'échantillon Wson 5-B est un pendentif encroûté situé sur une paroi. La croûte extérieure sur laquelle se sont développés des botryoïdes (Wson 5-A-1) est déshydratée (17.88%), la zone intermédiaire (Wson 5-A-2) est plastique hydratée (35.67%) et le coeur (Wson 5-A-3) est plastique hyperhydraté (49.20%). Deux possibilités d'explications existent: la première est que la concrétion est en phase de

déshydratation, et que les couches externes perdent leur humidité plus rapidement que les couches internes, étant en contact avec l'air, favorisant l'évaporation. Cependant, ce phénomène devrait engendrer une migration de l'humidité par capillarité, vers la surface afin de combler le déficit, assisté par une migration répondant aux lois de la pesanteur. La concrétion étant d'une épaisseur de 20 cm, la différence entre l'intérieur et l'extérieur semble grande (31.32%) pour une déshydratation lente. Une déshydratation rapide demanderait des températures élevées ou une humidité relative de l'air très basse. Selon nos observations sur le terrain, ces deux critères ne semblent pas être comblés, la température du site était que de 6.5°C et l'humidité relative était de 93%, ce qui est relativement élevé. La deuxième explication repose sur une alimentation en eau provenant de l'intérieur de la concrétion. Ceci implique que l'alimentation serait issue d'un ruissellement qui s'effectuerait entre la surface du substrat et la concrétion, ou bien que l'eau proviendrait directement de la roche-mère qui sert de substrat au pendentif. Les études faites par Bertouille (1972) viennent appuyer cette dernière hypothèse. Selon l'auteur, des changements climatiques à long terme (à l'échelle géologique tel un cycle de glaciation) peuvent générer un gradient de température à l'intérieur du substrat. Lorsque la roche encaissante est plus froide que l'air, la surface devient plus chaude que l'intérieur créant une thermo-migration de l'humidité vers la surface (froid-chaud). Dans le cadre de notre étude, il nous est impossible de déterminer la teneur en eau du marbre sur lequel s'est développée notre concrétion. Par contre, si l'alimentation s'effectue au point de contact du dépôt et du substrat, que ce soit par ruissellement ou par suintement, la thermo-osmose pourrait expliquer en partie les différences de teneur en eau que nous avons observés dans l'échantillon, assistée par une évaporation lente en surface.

Un seul échantillon semble se démarquer de tous les autres excédant la limite de 65%, soit Île 2-A qui a une teneur en eau de 75.66%. En théorie, lorsque la teneur en eau dépasse la capacité de rétention, 65% et plus, on devrait obtenir une suspension diluée des particules de lait de lune, qui résulterait en un liquide blanchâtre, ce qui n'est pas le cas en pratique. L'explication du phénomène est assez complexe et dépasse le cadre de notre présente étude, mais elle se résume par une précipitation au lieu d'une suspension (Bernasconi 1961) qui résulte en la formation d'une fraction "d'eau libre" (free-water) circulant dans la pâte. Il est donc possible d'avoir des concrétions de lait de lune dont la teneur en eau est plus élevée que la limite de plasticité, ce qui semble être le cas de notre échantillon Île 2-A.

6.2.1.2 BOTRYOÏDES

Bien que l'hypothèse de la formation des botryoïdes suppose une alimentation de l'intérieur vers la surface des concrétions de ce type, impliquant une circulation d'eau à l'intérieur des botryoïdes, aucune étude sur la teneur en eau n'a été effectuée jusqu'à aujourd'hui. Quelques auteurs ont pourtant noté que certaines formations pourraient être issues de la déshydratation de dépôts de lait de lune (Thraillkill, 1971; Hill, 1976), ce qui présume que la teneur en eau a déjà été très élevée. Cependant, ils n'ont pas expliqué sur quoi se basait leur hypothèse.

Selon nos résultats (tableau 6.10), il semble clair que la teneur en eau peut être d'une certaine importance. Les valeurs obtenues varient de 0.25% (ÎLE 1-B) à 35.76% (OUR 5-B-7). La moyenne est de 7.39% et la médiane est de 1.48%.

ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%
OUR 5-A	11.15	ÎLE 2-C	1.01	MINE 2-A	1.25
OUR 5-B-7	35.76	MKZI 2-B	15.79	MINE 2-B	1.34
WSON 1-B	5.42	PIER 1-C	2.98	MINE 2-E	0.55
WSON 5-A	32.70	PIER 5-B	6.35	MINE 2-F	1.41
MOUL 2-B	0.42	PIER 5-C	1.48	MINE 2-G	5.23
MOKI 1-B	0.93	PIER 6-A	23.51	MINE 3-A	0.53
ÎLE 1-B	0.25	MINE 1-B	0.36	CASC 1-B	6.87

TABLEAU 6.10: TENEUR EN EAU DES BOTRYOÏDES

On remarque que sur les 21 échantillons, la majorité, soit 16 (76% des échantillons) possèdent une teneur en eau inférieure à 10%, et seulement 5 (24%) sont composés de plus de 10% en eau. Plus de la moitié des échantillons, 11 (52%), ont une teneur en eau inférieure à 2%. Les taux mesurés ne peuvent être expliqués que par l'état des réseaux souterrains (actifs ou inactifs), car bien qu'on obtient des résultats très bas, moins de 10%, dans tous les réseaux inactifs, on en observe aussi dans des réseaux considérés très actifs, dont la grotte des Moules (MOUL 2-B : 0.42%), les grottes du Lac des Îles (ÎLE 1-B : 0.25% et ÎLE 2-C : 1.01%), ainsi que la grotte de la Maison de Pierre (PIER 5-C : 1.48%; PIER 1-C : 2.98% et PIER

5-B : 6.35%). Le type de botryoïdes ne semble pas jouer un rôle majeur, si ce n'est que tous les échantillons composés de coraux (primitifs, moyens et matures) ont tous une teneur en eau inférieure à 6%. Par contre, les boutons et les champignons de tous types ont un pourcentage en eau variant de moins de 1% à plus de 30%.

Il existe plusieurs hypothèses pour expliquer ces variations. La première suggère que les botryoïdes possédant un taux élevé sont en plein développement, et ceux ayant un taux faible sont en proie à un arrêt de croissance temporaire ou irréversible. Dans le cadre de cette étude, il nous est malheureusement impossible de tester cette possibilité. La seconde hypothèse repose sur certaines caractéristiques minéralogiques des botryoïdes, dont le grain et la porosité qui contrôlent la capacité d'infiltration d'eau. Plus le grain est fin, plus il y a d'interstices où l'eau peut s'accumuler; il en est de même si la porosité est élevée. Cependant, les analyses pétrographiques (section 6.2.4) démontrent que ces aspects ne sont pas déterminants, puisque tous les botryoïdes sont composés d'une stratification micritique à faible porosité. La troisième hypothèse serait une différence dans la composition minéralogique, or les analyses de diffraction aux rayons X effectuées sur différents échantillons (section 6.2.3) confirment qu'ils sont tous calcitiques. La dernière hypothèse propose aussi des différences minéralogiques, mais cette fois basées sur le type de calcite. Ici nous distinguons deux types de calcites, soit la calcite dite "normale", qui est celle que l'on retrouve généralement dans toutes formations calcitiques, et la calcite du mondmilch (anciennement appelé lublinité) composant les dépôts de lait de lune, reconnu pour sa capacité de sursaturation en eau. Certains auteurs semblent appuyer cette hypothèse, dont Thrailkill (1971) qui suggère la possibilité que certains botryoïdes pourraient être issus de la déshydratation de dépôts de lait de lune, et White (1988) qui affirme que les botryoïdes de types coraux contiennent fréquemment du lait de lune. Cependant, aucun explique le fondement de leurs raisonnements. Nous croyons aussi que cette dernière hypothèse est plausible, ce que nous discuterons de façon plus détaillée dans le prochain chapitre.

6.2.1.3 MICRO-GOURS

Les micro-gours sont des micro-bassins hydrologiques poreux et comme tous milieux poreux, ils sont propices à l'infiltration de l'eau. La teneur en eau de ces concrétions peut donc nous être très utile pour

déterminer l'état de ces dépôts. Pourtant, tout comme pour les botryoïdes, aucune étude n'a été effectuée sur ce sujet, et aucun auteur ne mentionne cet aspect important des micro-gours.

Malheureusement, le nombre d'échantillons disponibles pour cette analyse n'est que de 8. Cependant, nous remarquons tout de même une grande variabilité (tableau 6.11), passant d'un taux de 2.35% (PIER 6-B) à 75.55% (ÎLE 1-B), avec une moyenne de 27.9% et une médiane de 26.0%.

ÉCHANT.	%	ÉCHANT.	%
OUR 4-C	35.09	ÎLE 1-B	75.55
WSON 3-B	29.76	MKZI 2-C	21.88
MOUL 1-D	32.83	PIER 4-A	22.25
ÎLE 1-C	3.74	PIER 6-B	2.35

TABLEAU 6.11: TENEUR EN EAU DES MICRO-GOURS

Nous pouvons tirer quelques conclusions malgré la faible quantité d'échantillons. Vraisemblablement, le type de coulée ne semble pas influencer la composition en eau, puisque le minimum (PIER 6-B : 2.35%) et le maximum (ÎLE 1-B : 75.55%) sont tous deux des coulées complexes. On remarque aussi une grande différence entre les résultats des diverses coulées multiples, passant de 3.74% (ÎLE 1-C) à 32.83% (MOUL 1-D). Par contre, nos deux échantillons de coulées simples démontrent un écart moins grand, dont les taux sont de 21.88% (MKZI 2-C) et 29.76% (WSON 3-D). Il est à noter que nous trouvons aussi des résultats très variables à l'intérieur d'une même cavité (PIER 6-B : 2.35% et PIER 4-A : 22.25%), de même qu'à l'échelle du site (ÎLE 1-C : 3.74% et ÎLE 1-B : 75.55%).

Tout comme pour les botryoïdes, plusieurs hypothèses pourraient être avancées afin d'expliquer ces différences. Ces hypothèses sont principalement les mêmes que celles énumérées pour les botryoïdes, soit: 1) L'état de croissance des concrétions: qui est encore une fois impossible de déterminer pour cette étude. 2) Le grain et la porosité des concrétions: qui lors de l'analyse pétrographique (section 6.2.4) démontrent une certaine homogénéité, soit une stratification micritique à porosité moyenne, ce qui ne peut expliquer les différences observées pour la teneur en eau. 3) La composition minéralogique: or les analyses de diffraction au rayons X (section 6.2.3) ont démontré clairement qu'il s'agissait majoritairement de calcite

dans tous les cas. 4) Le type de calcite: les micro-gours pourraient être composés en partie ou en totalité, de calcite de type mondmilch. Plusieurs auteurs croient que la déshydratation de concrétions de lait de lune pourrait conduire à la formation de spéléothèmes communs tel les micro-gours (Gèze, 1961; Hill, 1976; Onac et Ghergari, 1993). Mélon et Bourguignon (1962) ont signalé que le soubassement des micro-gours qu'ils étudiaient, était formé de lait de lune. En ce qui nous concerne, nous croyons aussi que dans certains cas, les micro-gours peuvent être constitués entièrement ou en partie, de lait de lune actif ou inactif, ce qui sera expliqué de façon plus détaillée dans le chapitre suivant.

6.2.2 ANALYSE STRUCTURALE DES ÉCHANTILLONS

Tous les échantillons ramenés en laboratoire ont été observés à la loupe binoculaire à un grossissement de 45X. Ceci nous a permis d'observer que la majorité des échantillons était stratifiée. Grâce à cette analyse, nous avons été en mesure d'identifier 9 structures composant les strates visibles à cette magnitude (section 6.2.2.1) que nous regroupons sous le terme micro-structure. L'agencement des diverses micro-structures nous a permis de déterminer 11 différentes classes de fabriques (section 6.2.2.2).

6.2.2.1 MICRO-STRUCTURES

La description des différentes micro-structures se réfère à leur texture (dimension, disposition et forme des particules), leur porosité, leur compacité, ainsi que leur couleur. Les 9 micro-structures se définissent comme suit:

Poudreuse: constituée d'une poudre très fine compacte, opaque blanche, parfois grisâtre; elle peut être finement poreuse. On la trouve souvent en amas éparses à la surface des dépôts, ou formant une strate mince superficielle. On la trouve aussi parfois en strates internes et rarement formant un dépôt complet.

- Sableuse:** constituée généralement de particules compactes, dont la grosseur, la forme et la couleur sont hétérogènes: les grains sont toujours opaques. Dans certains cas elle peut être entièrement blanche ou jaune, mais toujours à grains anguleux, ce qui la distingue de la micro-structure globuleuse. On la trouve souvent en pochettes à la surface des dépôts, ou en injections internes. Elle forme parfois des strates superficielles, basales ou internes, qui peuvent être poreuses. Elle constitue rarement un dépôt entier.
- Globuleuse:** constituée de particules arrondies, dont la grosseur est généralement homogène, de couleur opaque blanche et dans certains cas jaunâtre ou grisâtre, contenant parfois quelques impuretés éparses. Elle est souvent poreuse à grains peu consolidés et à faible compacité. Elle se trouve en strates superficielles, internes ou basales, et forme rarement un dépôt complet.
- Lisse opaque:** constituée de particules consolidées très compactes, à grains non distinguables, formant des strates homogènes polies, parfois cahoteuses, rarement poreuses. Elle est opaque blanche ou jaunâtre. Elle se trouve toujours en strates internes.
- Lisse translucide:** identique à la micro-structure lisse opaque, mais les strates sont translucides blanches, jaunâtres et parfois noires. Elle se trouve généralement en strates internes, mais peut dans certains cas composer des strates superficielles.
- Veloutée:** ressemble à un velour ras, dont les particules sont difficilement distinguables. Elle est toujours opaque, blanche, compacte et parfois poreuse. Elle forme des strates homogènes superficielles ou internes.
- Fibreuse:** composée de minuscules aiguilles et/ou de bâtonnets, disposés en treillis compact et dont la grosseur est homogène. Les particules sont toujours opaques et blanches pures. Elle est rarement poreuse, par contre elle peut se trouver en amas à l'intérieur des pores des autres micro-structures. Elle peut aussi former des strates superficielles et internes.
- Feuilletée:** composée de feuillets lisses minces à grains indistinguables, opaques, blancs. Elle forme des strates internes interstratifiées comparables à un mille-feuille.

Spongieuse: composée de fibres consolidées, opaques, blanches, formant des réseaux alvéolés. La grosseur des pores est très variable, mais elle est toujours homogène à l'intérieur d'une même couche. Cette micro-structure se trouve généralement en strates internes, mais elle peut aussi constituer un dépôt entier.

En général, les limites entre les diverses micro-structures à l'intérieur d'un même dépôt, ne sont pas discernables, montrant clairement une transition spatio-temporelle entre les micro-structures se traduisant par une zone de chevauchement des textures adjacentes. De plus, les strates formant la morphologie externe des dépôts sont continues dans l'espace. Par exemples, un botryoïde se forme par bourgeonnement des strates et non par addition de nouvelles strates, et les micro-gours se forment par gondolement.

6.2.2.2 MICRO-FABRIQUES

Selon nos résultats, les concrétions formées d'un seul type de micro-structure semblent rares. Nous n'avons observé que 6 échantillons, sur un total de 67 échantillons, possédant une uniformité micro-structurale (tableau 6.12) soit 9% des échantillons.

MICRO-STRUCTURE	NOMBRE	ÉCHANTILLONS
SABLEUSE	2	OUR 4-C (LDL: remplissage) ; ÎLE 2-B (M-G: coulée complexe)
POUDREUSE	1	ÎLE 1-C (M-G: coulée multiple)
GLOBULEUSE	1	PIER 6-B (M-G: coulée complexe)
SPONGIEUSE	2	OUR 3-A (LDL: remplissage) ; MOKI 1-A (LDL: coulée multiple en chou-fleur)

TABLEAU 6.12: COMPILATION DES ÉCHANTILLONS COMPOSÉS D'UN SEUL TYPE DE MICRO-STRUCTURE. LDL: lait de lune, M-G: micro-gours

Généralement, les concrétions se composent d'une stratification micro-structurale plus ou moins complexe. L'ordre de succession des micro-structures composant les dépôts peut sembler aléatoire, mais nous avons remarqué certaines tendances, qui nous ont permis de regrouper 57 échantillons (85%) sous

7 types de micro-fabriques (type 1 à 7). Seulement 4 échantillons (6%) possèdent leur micro-fabrique particulière (type 8 à 11). Les onze types de micro-fabriques sont décrites de l'intérieur (haut du modèle) vers l'extérieur (bas du modèle).

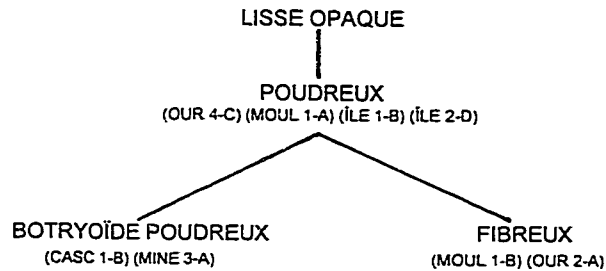


FIGURE 6.5: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 1

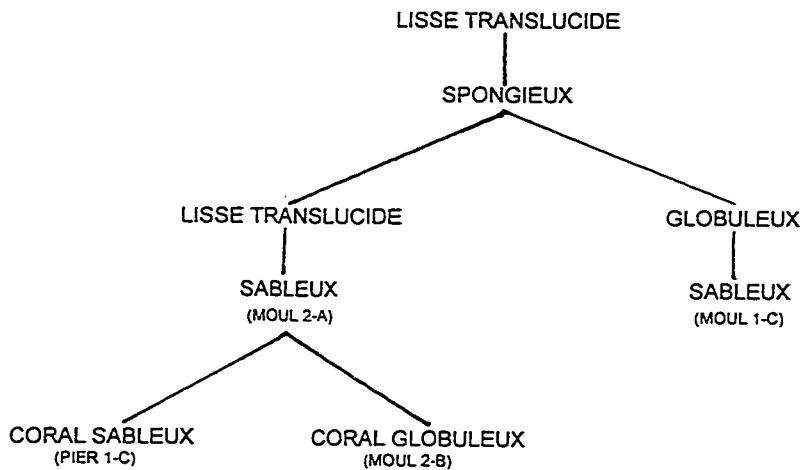


FIGURE 6.6: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 2

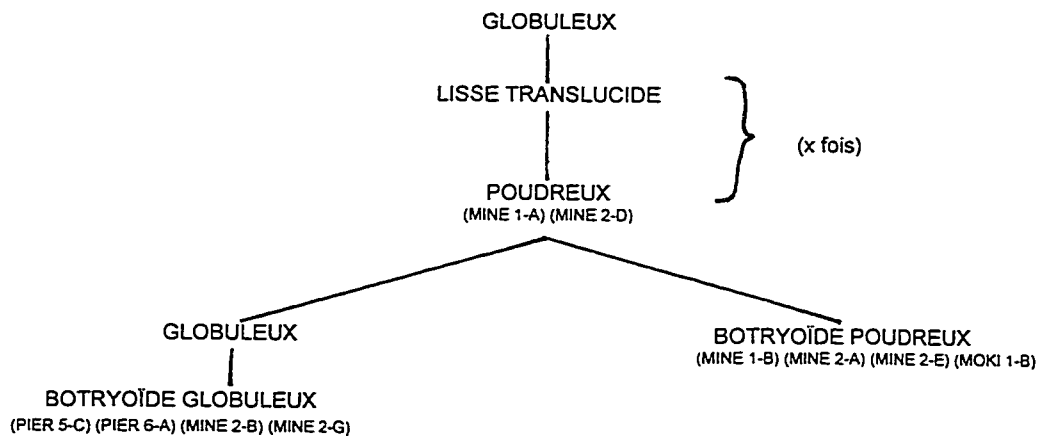


FIGURE 6.7: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 3

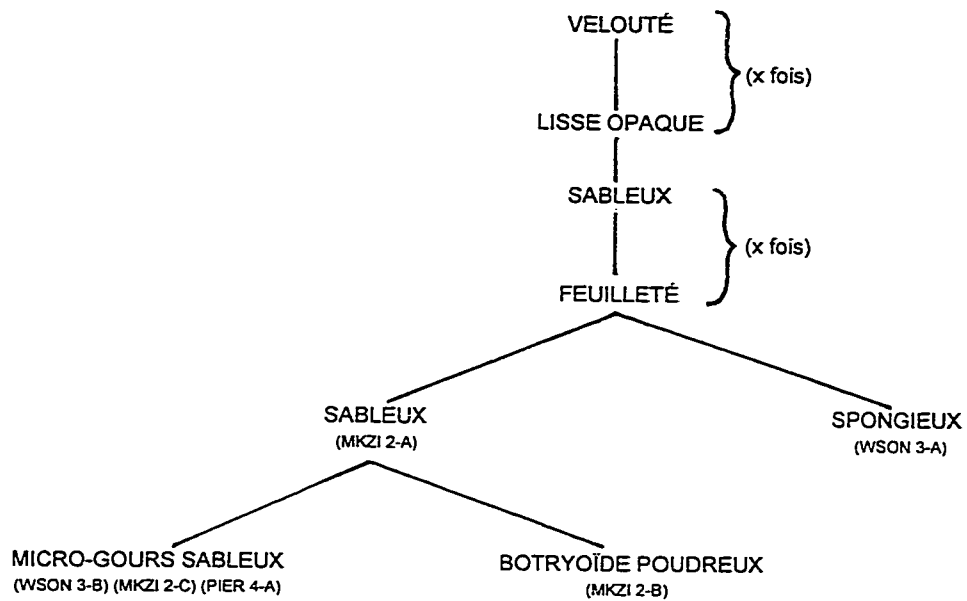


FIGURE 6.8: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 4

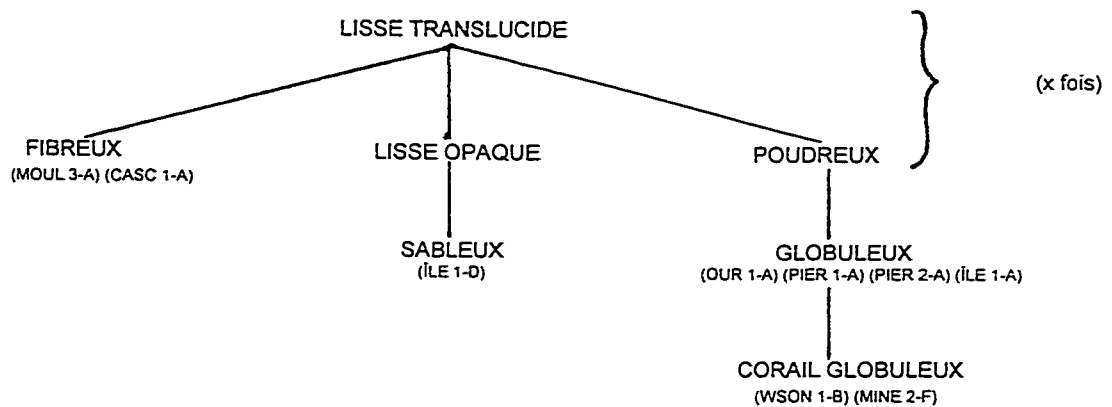


FIGURE 6.9: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 5

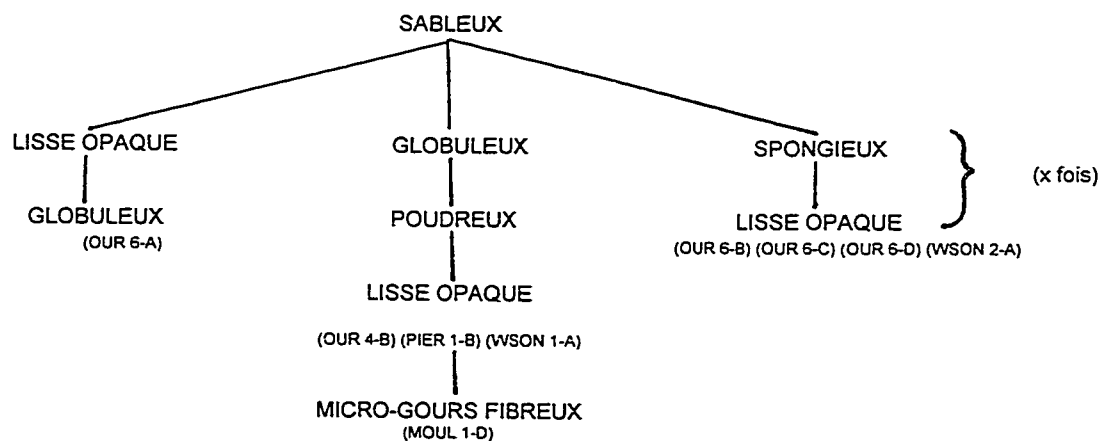


FIGURE 6.10: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 6

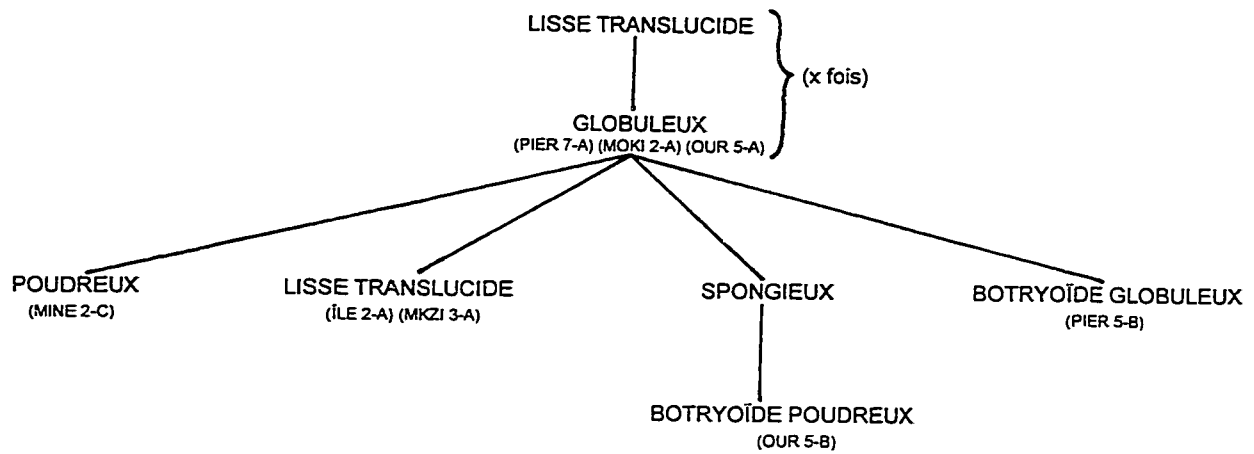


FIGURE 6.11: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 7

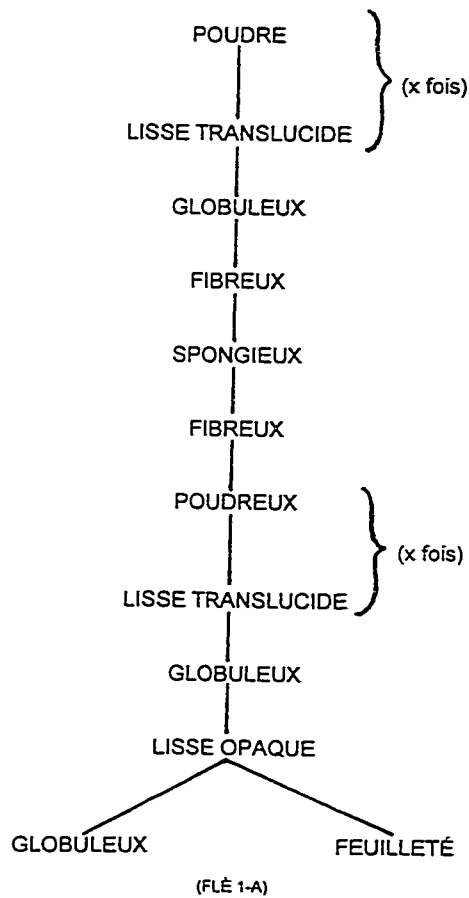


FIGURE 6.12: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 8

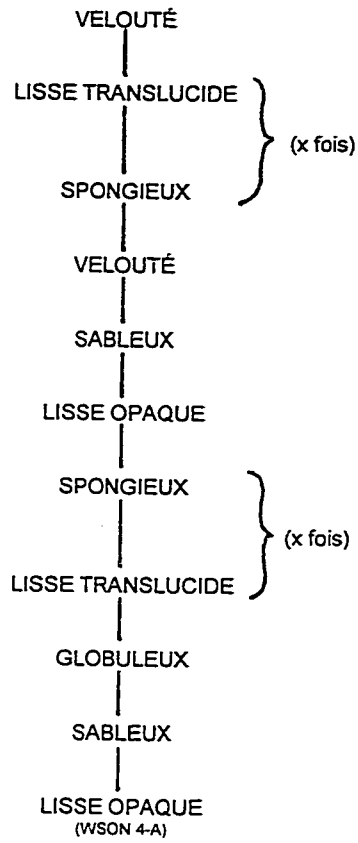


FIGURE 6.13: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 9

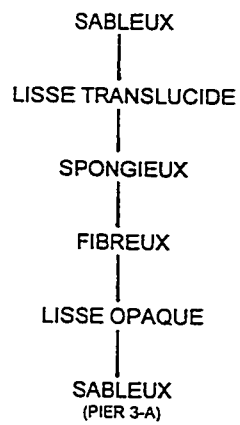


FIGURE 6.14: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 10

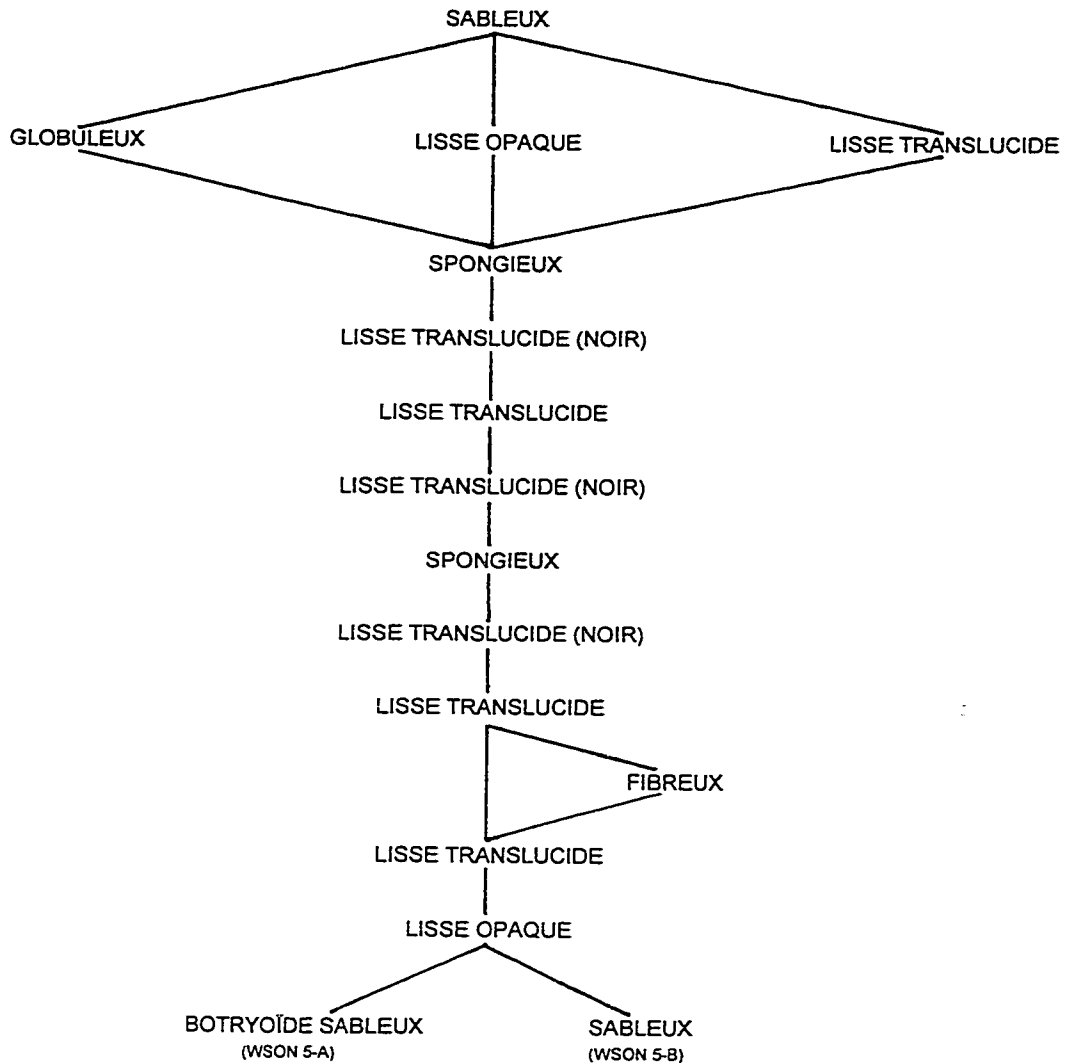


FIGURE 6.15: MICRO-FABRIQUE DE TYPE 11

Toutes ces micro-fabriques sont décrites suivant leur disposition stratigraphique, de la couche la plus ancienne vers la plus récente. Les différences stratigraphiques pour un même niveau démontrent une divergence spatiale, que ce soit pour un même échantillon (ex. WSON 5-A, micro-fabrique de type 11, niveau 2 et 10), ou pour différents échantillons (ex. MOUL 1-A et MOUL 1-B, micro-fabrique de type 1, niveau 2). Nous remarquons que les concrétions stratifiées sont généralement uniformes spatialement, à l'exception des échantillons WSON 5-A et FLÈ 1-A. De plus, nos résultats démontrent que l'agencement temporel des micro-structures peut être le même pour des laits de lune ou des botryoïdes. Cependant, les

concrétions de type micro-gour semblent être les seules à posséder la micro-structure feuilletée dans leurs composantes stratigraphiques.

Généralement, il existe une relation directe entre le nombre de niveaux composant les micro-fabriques et l'épaisseur des dépôts qui s'y rattachent. Par contre, il ne faut pas oublier que certaines micro-structures peuvent être elles-mêmes stratifiées (ex. stratification lisse translucide blanche/lisse translucide jaune), ce qui n'est pas réflété dans la description des micro-fabriques.

Il est à noter que certains échantillons démontrent une zone d'oxydation au niveau de l'interface substrat/sédiment ce qui est le cas de PIER 5-C, ÎLE 1-B, OUR 5-A, qui sont tous des botryoïdes. Toutefois, ce type d'altération n'est pas présent dans le cas des échantillons MINE 1-A (lait de lune), MINE 2-F (botryoïde), MINE 3-A (botryoïde), MOKI 1-A (lait de lune) et ÎLE 1-A (lait de lune). Malheureusement, nous n'avons pas été en mesure d'observer la zone de contact entre le substrat et les dépôts des autres échantillons. De ce fait, il nous est impossible d'en tirer des conclusions.

6.2.3 ANALYSE MINÉRALOGIQUE.

L'analyse structurale a démontré la complexité stratigraphique des échantillons. Ne pouvant effectuer une analyse de diffraction aux rayons x sur chacune des composantes de tous les échantillons, ce qui serait une tâche excessivement longue, coûteuse et redondante, nous avons choisi de déterminer la composition minéralogique des diverses micro-structures que l'on retrouve dans les dépôts. Nous avons donc prélevé des sous-échantillons types pour chacune des micro-structures, ainsi que certaines composantes démontrant des caractéristiques particulières (couleur distincte, porosité différente, etc...). Le tableau 6.13 résume les résultats obtenus pour les différents sous-échantillons. On remarque que la composition chimique des sous-échantillons est rarement pure (pour plus de détails, voir les spectres à l'annexe C). Nous avons généralement 3 types d'éléments: 1) les minéraux primaires, qui sont les composantes majeures dont tous les pics sont présents sur le spectre, avec leur intensité relative; 2) les minéraux secondaires, qui sont les composantes mineures dont on observe aussi tous les pics distinctifs, mais ayant des intensités qui ne leur sont pas caractéristiques; et 3) les minéraux en trace, dont on retrouve que certains pics qui leur sont propres, et sont généralement très mal définis.

MICRO-STRUCTURE	MINÉRAUX PRIMAIRES	MINÉRAUX SECONDAIRES	MINÉRAUX EN TRACES	ÉCHANTILLON SOURCE
POUDREUSE	- CALCITE	---	- KUTNOHORITE - ALBITE	MOUL 1-D
SABLEUSE	- CALCITE	- ALBITE - MICROCLINE - QUARTZ	---	PIER 3-A
SABLEUSE IMPURE	- CALCITE - ALBITE - QUARTZ - ENSTATITE - MICROCLINE	---	---	ÎLE 2-B
GLOBULEUSE	- CALCITE	---	- ALBITE - MICROCLINE	PIER 7-A
LISSE OPAQUE BLANCHE	- CALCITE	---	- KUTNOHORITE - ARAGONITE	OUR 6-D
LISSE OPAQUE JAUNE	- CALCITE	- KUTNOHORITE - ARAGONITE	- ALBITE	MKZI 3-A
LISSE OPAQUE VERTE	- CALCITE	---	- KUTNOHORITE - MICROCLINE - ARAGONITE	MINE 2-A
LISSE TRANSLUCIDE BLANCHE	- CALCITE	- KUTNOHORITE	- ALBITE - MICROCLINE - ARAGONITE	PIER 7-A
LISSE TRANSLUCIDE JAUNE	- CALCITE	- KUTNOHORITE	- ALBITE - MICROCLINE	MINE 2-D
FIBREUSE (AIGUILLES)	- CALCITE	- KUTNOHORITE - ALBITE - MICROCLINE - QUARTZ	- ARAGONITE	OUR 2-A
FIBREUSE (BÂTONNÉTS)	- CALCITE	---	- ALBITE - MICROCLINE - QUARTZ	CASC 1-A
FIBREUSE (FILAMENTS)	- CALCITE	---	- ALBITE	MOKI 2-A
FIBREUSE (MÉLANGE)	- CALCITE	- ARAGONITE	- ALBITE - MICROCLINE	OUR 4-A
FEUILLETÉE	- CALCITE	---	- ALBITE - QUARTZ	WSON 3-A
SPONGIEUSE (GROS PORES)	- CALCITE	- KUTNOHORITE - ARAGONITE	- ALBITE - MICROCLINE	WSON 2-A
SPONGIEUSE (PETITS PORES)	- CALCITE	---	- ALBITE - MICROCLINE	MOKI 1-A
SABLEUSE TRANSLUCIDE	- CALCITE - QUARTZ	- ALBITE - MICROCLINE	---	OUR 4-C
POUDRE TRANSLUCIDE	- CALCITE	- KUTNOHORITE - ALBITE - QUARTZ	- MICROCLINE	MOUL 1-C

TABEAU 6.13: COMPILATION DES RÉSULTATS DES ANALYSES AUX RAYON X

Les combinaisons minéralogiques des diverses micro-structures comprennent la calcite, l'aragonite, la kutnohorite, l'albite, la microcline, le quartz et l'enstatite. La calcite [CaCO₃], l'aragonite [CaCO₃] et la kutnohorite [CaMn(CO₃)₂], sont tous des carbonates. La calcite est un minéral commun largement répandu. Elle se trouve dans diverses roches à des conditions de température et de pression très variables. Elle est considérée comme étant le minéral le plus commun des concrétions cavernicoles (White, 1976), il est donc

normal qu'elle soit la constituante primaire de nos échantillons. L'aragonite est un polymorphe de haute-pression du CaCO_3 . En théorie, elle ne peut être stable dans les cavernes, que si la pression atmosphérique est supérieure à 3000 atm. En pratique, il est fréquent de la retrouver en association avec la calcite dans les spéléothèmes, même qu'elle se situe au troisième rang des minéraux les plus communs retrouvés dans les cavernes, le second étant le gypse (White, 1976). Sa présence dans nos échantillons ne semble donc pas anormale. Par contre, la présence de kutnohorite est difficile à expliquer. Plusieurs auteurs signalent qu'il s'agit d'un minéral rare (Masson et Berry, 1959; Moorhouse, 1959; Ness, 1991; Deer et al., 1992) et ne semble fréquent que dans les météorites provenant de Mars (Lane et Christensen, 1997), pourtant nous le retrouvons en trace et même comme minéral secondaire dans la moitié de nos sous-échantillons. La formation de ce minéral paraît plutôt énigmatique, et les hypothèses de genèse apportées par les divers auteurs sont assez vagues: 1) Le remplacement du magnésium de la dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] par du manganèse pourrait former de la kutnohorite, cependant il est rare que la dolomite contienne plus de 3% de MnO (Deer et al., 1992). 2) La kutnohorite est un manganèse de la série isomorphique intermédiaire entre la dolomite et l'ankérite [$\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$] (Moorhouse, 1959). 3) Des températures élevées permettent la substitution du calcium de la calcite ou de l'aragonite par du manganèse, lorsque ce dernier est disponible en quantité substantielle, donnant un rhodochrosite [MnCO_3] qui peut s'unir à une calcite [$\text{CaCO}_3 + \text{MnCO}_3 - \text{CaCO}_3 - \text{MnCO}_3$] donnant un kutnohorite (Ness, 1991). Cette dernière hypothèse semble plausible, bien que l'auteur n'indique pas les sources potentielles des ions Mn^{2+} . Par contre, il serait peu probable que ce processus soit à l'origine de la kutnohorite se trouvant dans nos concrétions dû au degré de température élevée présumé. De plus, cette hypothèse implique la formation de la rhodochrosite, dont nous n'avons pas observé la présence.

L'albite [$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$] est un feldspath plagioclase triclinique et la microcline [KAlSi_3O_8] est un feldspath potassique triclinique. Ces deux minéraux font partie de la série des feldspaths alcalins, qui est une série continue, passant des produits sodiques, débutant avec l'albite, où le sodium est graduellement substitué par le potassium, donnant des produits potassiques se terminant par la microcline (Hamilton et al., 1974). Il est donc fréquent de les trouver en association. Leur présence dans nos échantillons s'explique par des inclusions stratigraphiques lors de la formation des concrétions. La source de ces deux minéraux semble être la roche-mère. La dissolution du marbre entraîne une dénudation des autres

constituants de la roche, qui peuvent être pris en suspension par les eaux. Lorsque que cette solution s'infiltré dans les concrétions de type lait de lune ou botryoïdale (comme le supposent leurs hypothèses de genèse), les minéraux en suspension peuvent être emprisonnés entre les particules du dépôt hôte. Le même processus peut intervenir dans la formation des micro-gours, qui sont des micro-bassins hydrologiques où il peut se produire une décantation des minéraux en suspension.

La présence de l'enstatite et du quartz peut s'expliquer de la même façon que la présence des feldspaths. Cependant, leur origine est différente. Le quartz [SiO₂] est un silicate et est l'un des minéraux les plus répandus. En plus d'être un minéral associé dans les marbres de Grenville, il est un constituant de plusieurs roches éruptives ou métamorphiques dont notamment les gneiss qui sont présents en intrusion dans les marbres de la région à l'étude (voir section 2.2). L'enstatite [MgSiO₃] est un pyroxène du groupe des orthopyroxènes et est un constituant commun des roches ignées telles les gabbros et les pyroxénites, qui sont tous deux fréquents en injection dans les marbres de la région.

On remarque que la composante majeure des micro-structures est généralement la calcite. Dans seulement deux cas, nous trouvons une composition en minéraux majeurs impurs: 1) la micro-structure sableuse impure composée entièrement de minéraux primaires dont la calcite, l'albite, la microcline, le quartz et l'enstatite; et 2) la micro-structure sableuse translucide, qui est constituée de calcite et de quartz primaires. Il est à noter que ces deux sous-échantillons proviennent de micro-gours, qui sont des concrétions propices à capter des impuretés en quantité importante.

6.2.4 ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE

L'analyse pétrographique a été effectuée sur 21 échantillons (une liste des échantillons ainsi que leur description se trouve à l'annexe X). Le choix des échantillons s'est effectué de façon à couvrir toutes les classes de micro-structures que nous avons déterminées dans la section 6.2.2.2, en plus des échantillons atypiques, ainsi que quelques échantillons supplémentaires afin de s'assurer que les trois grandes familles de concrétions (lait de lune, botryoïde et micro-gour) soient représentées. Les lames minces obtenues à partir de ces échantillons ont été observées en lumière polarisée plane à un grossissement de 400X. Nous avons consacré une attention particulière aux caractéristiques structurales

et texturales observables à cette magnitude, afin d'établir leur relation avec les micro-structures observées à la loupe binoculaire (section 6.2.4.1). Nous avons aussi observé la nature des transitions entre les diverses micro-structures déterminées précédemment (section 6.2.2.1), afin de déterminer s'il existe des continuités spatio-temporelles, ou si le passage de l'une à l'autre est abrupte (section 6.2.4.2). Certains échantillons qui démontraient quelques particularités internes ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée (section 6.2.4.3).

6.2.4.1 ANALOGIE ENTRE LES MICRO-STRUCTURES ET LES PÉTRO-STRUCTURES

Tous les échantillons observés étaient composés en partie de calcite micritique, proposant un développement peu avancé des cristaux. La croissance normale des cristaux de calcite résulte habituellement en la formation de cristaux rhomboédriques ou scalénoédriques (Blackburn et Dennen, 1988; Ness, 1991, Deer et al., 1992). Dans certains cas, la calcite peut présenter une morphologie fibreuse, ce qui est considéré comme une habitude anormale (Deer et al., 1992; Jones et Kahle, 1993).

En général, les concrétions calcaires cavernicoles se composent de calcite rhomboédrique formant des cristaux palissadiques, des mosaïques de calcite ou des plaquettes spathiques (Sweeting, 1972; White, 1976; Ford et Williams, 1989). En effet, nous avons observé quelques échantillons comportant des strates de calcite palissadique (OUR 5-A, MINE 2-G, PIER 2-A et WSON 1-B), des zones formées d'une mosaïque de calcite (MOUL 1-B, MINE 2-F, MINE 2-G, PIER 2-A et WSON 5-A) et plusieurs cristaux de calcite rhomboédriques (MINE 2-F, WSON 4-A et FLÉ 1-A) ou en plaquettes (OUR 6-A, MOUL 1-B, MOUL 1-C, WSON 2-A, WSON 4-A, WSON 5-A, MKZI 3-A, CASC 1-A et FLÉ 1-A). Par contre, nous avons aussi observé de la calcite démontrant des formes plus exotiques dont des cristaux aciculaires de tailles variables (OUR 6-A, MOUL 1-C, PIER 2-A, PIER 3-A, WSON 2-A, WSON 3-A, WSON 4-A, WSON 5-A, MKZI 2-B et FLÉ 1-A), des chaînes rhomboédriques (MOUL 1-C et PEIR 3-A) et de la calcite plumeuse (MKZI 3-A et MOUL 1-C). Selon la littérature, en milieu souterrain ces types de calcite sont toujours associés aux concrétions de lait de lune. Cependant, nous les avons observés dans certains botryoïdes (MKZI 2-B) et micro-gours (FLÉ 1-A).

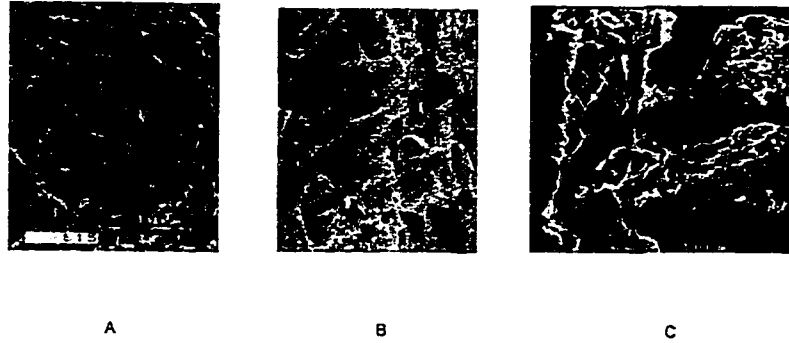


FIGURE 6.16 IMAGES EFFECTUÉES AU MICROSCOPE À BALAYAGE ÉLECTRONIQUE MONTRANT A: DES AIGUILLES DE CALCITE (WSON 3-A) B: DE LA CALCITE PLUMEUSE (MOUL 1-C) ET C: DES CHAÎNES RHOMBOÉDRIQUES (PIER 3-A)

Les descriptions qui suivent sont des généralisations issues de la compilation des observations faites pour chacune des lames minces à notre disposition. De façon plus spécifique, chacune des lames possédait certains éléments qui leurs étaient propres, leurs donnant des particularités distinctives. Il est cependant impossible de les décrire une à une dans ce document. De ce fait, nous nous contenterons de décrire les grands traits caractéristiques observables au microscope polarisant, (en lumière polarisée plane à une magnitude de 45X), correspondant à chacune des micro-structures observées à la loupe binoculaire décrites dans la section 6.2.2.1⁷. Ces comparaisons nous ont permis d'établir des descriptions pétrographiques pour chacune des micro-structures:

La micro-structure poudreuse correspond à une micrite gélatineuse brune, homogène ou en amas très denses reliés par des ponts micritiques et contient quelques inclusions non calcitiques.

La micro-structure sableuse se caractérise par des poches d'inclusions non calcitiques très denses, dont les cristaux peuvent atteindre de grandes dimensions (pouvant atteindre près de 190 μm . Dans la plupart des cas, elle constitue une inclusion par elle-même à l'intérieur des autres micro-structures.

7: Les tableaux de comparaisons entre les observations faites à la loupe binoculaire et celles faites au microscope pétrographique, pour chacune des micro-structures, se trouvent à l'annexe X.



FIGURE 6.17 SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE POUDREUSE (MOUL 1-B). ON PEUT REMARQUER L'ASPECT NUAGEUX DE LA MICRITE GÉLATINEUSE, AINSI QUE PLUSIEURS INCLUSIONS NON CALCITIQUES ET QUELQUES DÉBRIS ORGANIQUES (FLÈCHE) ENFOUIS DANS LA MICRITE

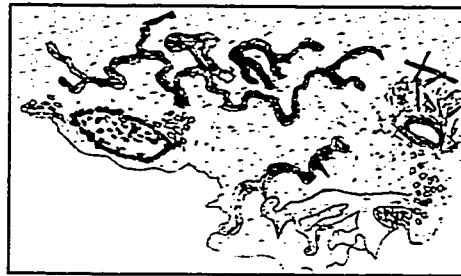


FIGURE 6.18 SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE SABLEUSE (FLÈCHE) FORMANT DES POCHES D'INCLUSIONS NON CALCITIQUES À L'INTÉRIEUR DU DÉPÔT (PIER 3-A)

La micro-structure globuleuse ressemble à la micro-structure poudreuse, étant constituée elle aussi d'une micrite gélatineuse, parfois organisée en amas reliés par des ponts micritiques, et contenant quelques cristaux non calcitiques. Mais elle se distingue par une densité moins importante et par une porosité élevée. Dans certains cas, la micrite se compose de minuscules filaments.

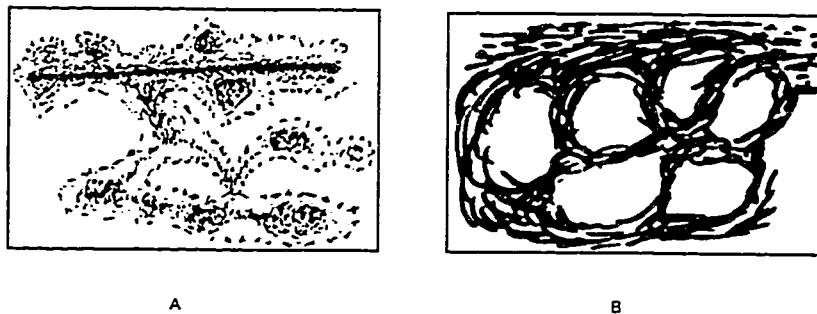


FIGURE 6.19 SCHÉMAS DE LA MICRO-STRUCTURE GLOBULEUSE. A: MICRITE GÉLATINEUSE ORGANISÉE EN AMAS RELIÉS PAR DES PONTS MICRITIQUES (WSON 4-A). B: MICRITE FILAMENTEUSE TRÈS POREUSE (WSON 3-A)

La micro-structure lisse opaque se compose elle aussi d'une micrite gélatineuse très dense. Par contre, elle se distingue par un compactage en couches, donnant une stratification issue de différences de densité. Dans certains cas, elle est constituée d'une stratification micritique fibreuse.

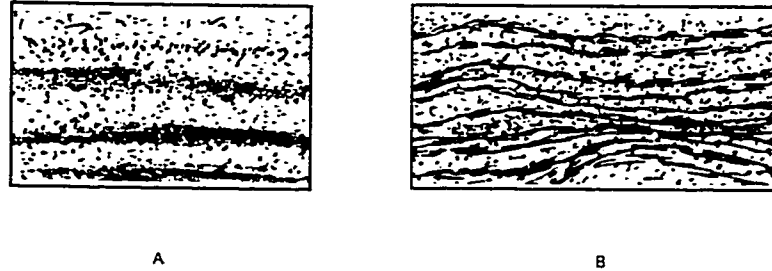


FIGURE 6.20 SCHÉMAS DE LA MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE. A: STRATIFICATION MICRITIQUE TRÈS DENSE (FLÉ 1-A) B: STRATIFICATION MICRITIQUE FIBREUSE (OUR 6-A)

La micro-structure lisse translucide présente une diversité de pétro-structure. Elle se compose soit 1) d'une micrite très dense, 2) d'une mosaïque de calcite spathique, 3) de calcite palissadique ou 4) d'un mélange de calcite spathique en aiguilles, en chaînes rhomboédriques ou en plaquettes baignant dans une micrite gélatineuse très dense. Les stratifications à l'intérieur de la micro-structure sont issues de différences de densité dans la gangue gélatineuse recouvrant les cristaux calcitiques. Nous avons aussi observé que la coloration jaune semblait correspondre à une densité très forte de la substance gélatineuse.



FIGURE 6.21 SCHÉMAS MONTRANT LA MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE. A: MOSAÏQUE DE CALCITE (CENTRE GAUCHE) ET CALCITE PALISSADIQUE (CENTRE DROIT) (MINE 2-G) B: MÉLANGE DE CALCITE EN PLAQUETTES, AIGUILLES ET CHAÎNES RHOMBOÉDRIQUES BAIGNANT DANS UNE GANGUE MICRITIQUE TRÈS DENSE (MOUL 1-C)

La micro-structure veloutée se caractérise par une micrite poreuse riche en cristaux spathiques (inclusions non calcitiques, aiguilles de calcite, calcite plumeuse, plaquettes de calcite et chaînes

rhomboédriques), baignant dans une substance visqueuse.



FIGURE 6.22 SCHÉMA MONTRANT LA MICRO-STRUCTURE VELOUTÉE, COMPOSÉE D'UNE STRATIFICATION MICRITIQUE GÉLATINEUSE CONTENANT DES CRISTAUX SPATHIQUES DE CALCITE PLUMEUSE (MKZI 3-A)

La micro-structure fibreuse possède une pétro-structure très caractéristique composée entièrement d'aiguilles de calcite de tailles variables, passant de quelques microns à plus de 90 μm .

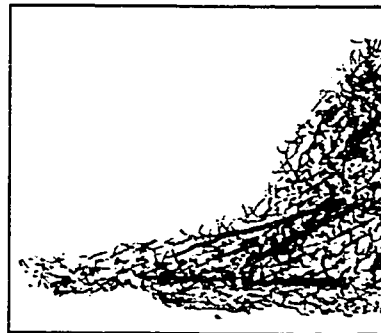


FIGURE 6.23 SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE FIBREUSE COMPOSÉE ENTIÈREMENT D'AIGUILLES DE CALCITE TRÈS DENSES (OUR 6-A)

La micro-structure feuilletée se caractérise aussi des autres micro-structures car elle présente une stratification micritique fibreuse très poreuse, parfois organisée en nids d'abeilles. Dans certains cas, elle est constituée d'une stratification micritique/spathique, intercalée par des fibres discontinues.

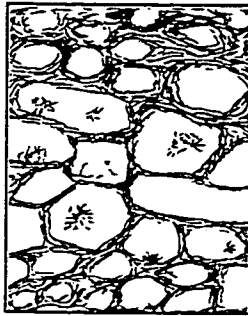


FIGURE 6.24 SCHÉMA DE LA MICRO-STRUCTURE FEUILLETÉE MONTRANT LA PÉTRO-STRUCTURE ACICULAIRE POREUSE (WSON 3-A)

La micro-structure spongieuse se présente sous diverses pétro-structures dont 1) une micrite très dense organisée en réseaux dendritiques baignant dans une micrite visqueuse peu dense et poreuse, 2) une stratification mal définie composée de cristaux spathiques organisés en filaments, 3) une stratification des couches spathiques de plaquettes de calcite et d'aiguilles, 4) des amas micritiques reliés par des ponts micritiques organisés en réseaux de mailles et 5) des aiguilles de calcite très denses formant des treillis poreux.

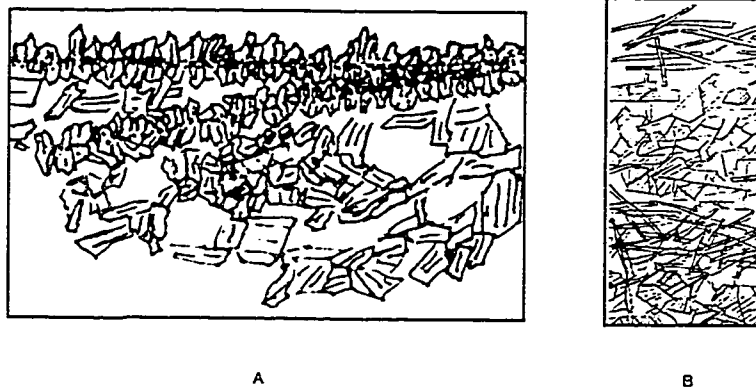


FIGURE 6.25 SCHÉMAS MONTRANT DES EXEMPLES DE PÉTRO-STRUCTURES ASSOCIÉES À LA MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE. A: FILAMENTS SPATHIQUES ET SPATH POREUX (WSON 4-A) B: STRATIFICATION POREUSE D'AIGUILLES DE CALCITES EN TREILLIS ET DE PLAQUETTES DE CALCITES (WSON 5-A)

6.2.4.2 ZONES DE TRANSITION ENTRE LES MICRO-STRUCTURES

Lors de l'observation des lames minces, nous avons accordé une attention particulière aux zones

de transition entre les micro-structures composant les micro-fabriques déterminées dans la sections 6.2.2.2. Nous avons constaté que le passage d'une micro-structure à une autre s'effectue généralement de façon progressive, formant des zones de transition qui se traduisent par une superposition graduelle des composantes pétrographiques. Par exemple, la zone de contact entre la micro-structure lisse opaque à la micro-structure spongieuse se compose d'un chevauchement graduel de la micrite gélatineuse (lisse opaque) sur les cristaux de la stratification spathique (spongieuse), ces derniers devenant de moins en moins denses pour devenir rares, laissant la place à une stratification micritique visqueuse (figure 6.26 a)). Le même type de gradation se trouve dans la zone de contact des diverses micro-structures soit lisse translucide, spongieuse et veloutée (figure 6.26 b)). Ce phénomène s'observe aussi à l'intérieur d'une même micro-structure lorsque celle-ci est stratifiée. Généralement, la stratification est issue d'une différence de la densité des grains, passant graduellement d'une strate à grains épars à une strate très dense, puis d'une strate à grains épars à nouveau (figure 6.26 c)).

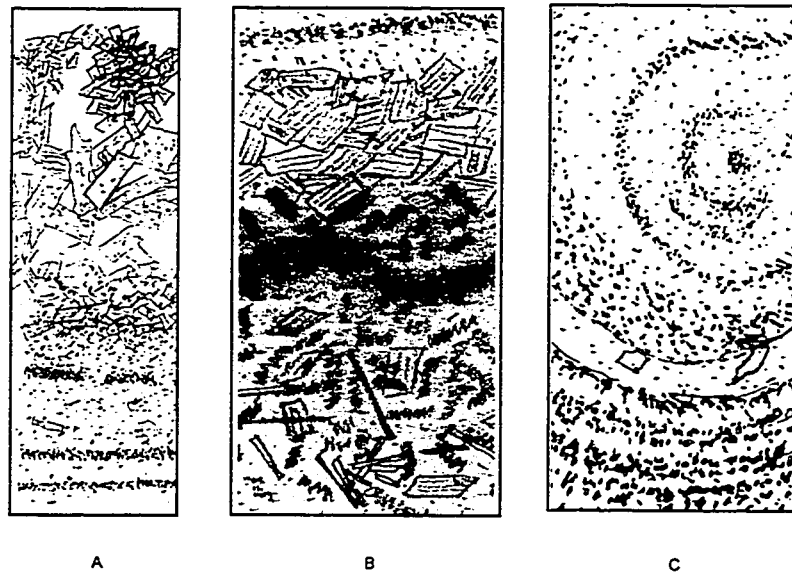


FIGURE 6.26 SCHÉMAS DÉMONTRANT DES ZONES DE TRANSITIONS GRADUELLES. A: PASSAGE GRADUEL DE MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE (MICRITE SITUÉE EN HAUT) À LA MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE (BAS) (WSON 4-A) B: PASSAGE GRADUEL ENTRE LES MICRO-STRUCTURES: VELOUTÉE (PARTIE SUPÉRIEURE), SPONGIEUSE (PLAQUETTES DE CALCITE) ET LISSE TRANSLUCIDE (DU CENTRE EN DESCENDANT) (MOUL 1-C) C: STRATIFICATION MICRITIQUE DE LA MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE (OUR 5-A)

Nous n'avons observé qu'un seul cas ne présentant pas de zone de transition, mais plutôt un passage abrupt entre deux micro-structures, soit spongieuse à pores minuscules - lisse translucide noire - lisse translucide blanche, où la strate lisse translucide noire correspond à une strate mince noire opaque discontinue par endroits, qui coupe la transition entre les deux autres structures (figure 6.27 a)). Ce phénomène n'a été observé qu'à un seul endroit sur la lame mince provenant de l'échantillon WSON 5-A. Les autres sections de cet échantillon présentent des zones de transition telles que décrites précédemment (figure 6.27 b)).



FIGURE 6.27 SCHÉMAS DES ZONES DE CONTACT ENTRE LES MICRO-STRUCTURES COMPOSANT L'ÉCHANTILLON WSON 5-A, A: DÉMONTRANT UNE DISCONTINUITÉ ENTRE LES PÉTRO-STRUCTURES ET B: LES ZONES DE TRANSITION OBSERVÉES DANS UNE AUTRE SECTION DE LA LAME

6.2.4.3 ÉLÉMENTS PARTICULIERS OBSERVÉS DANS CERTAINS ÉCHANTILLONS

Lors de l'observation de certaines lames, nous avons remarqué des éléments particuliers importants. Certains de ces éléments se retrouvent sur plus d'une lame, mais d'autres semblent uniques.

Le premier élément concerne la substance gélatineuse. Dans certains cas, elle présente une organisation structurale indépendante de l'agencement minéral dans lequel elle se trouve. Elle peut se présenter sous forme de strates parallèles ou former des réseaux dendritiques. Elle peut aussi dessiner des formes particulières très développées ou imiter la forme de cristaux palissadiques.

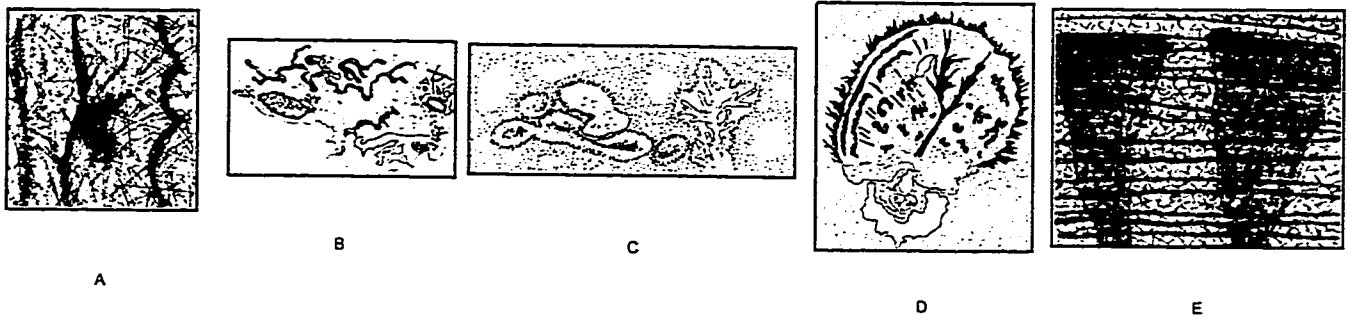


FIGURE 6.28 SCHÉMAS MONTRANT CERTAINS CARACTÈRES PARTICULIERS DE LA SUBSTANCE VISQUEUSE. A: STRATIFICATION PARALÈLE B: RÉSEAUX DENDRITIQUES C ET D: FORMES PARTICULIÈRES E: FORMATIONS PALISSADIQUES. (A ET B: PIER 3-A; C ET D: MOKI 2-A; E: OUR 5-A)

Le deuxième élément est constitué d'une substance non cristalline, qui dans certains cas forme une strate au contact du sédiment et des cristaux de la roche sous-jacente, dans d'autres cas elle forme une gaine (probablement une gaine d'altération) à la surface des cristaux de la roche sous-jacente ou formant des formes particulières prenant naissance sur la roche sous-jacente, mais se prolongeant dans le dépôt. Cette substance est généralement très compacte et même opaque dans certains cas, et possède une coloration bourgogne foncée en lumière polarisée plane. Il s'agit vraisemblablement de manganèse ou d'éléments microbiologiques.



FIGURE 6.29 SCHÉMAS MONTRANT DES CARACTÉRISTIQUES DE LA SUBSTANCE INCONNUE. A: GAINE ENTOURANT DES CRISTAUX DE LA ROCHE SOUS-JACENTE (MKZI 2-A) B: STRATE AU CONTACT DE LA ROCHE SOUS-JACENTE (ÎLE 2-D) C: STRATE AU CONTACT DE LA ROCHE SOUS-JACENTE ET FORMATIONS FIBREUSES TRÈS COMPACTES (FLÈCHES) (CASC 1-A) D: FORMATIONS DENDRITIQUES (MINE 2-F)

CHAPITRE VII: DISCUSSION

Dans le but d'établir s'il existe une association entre les diverses concrétions qui se trouvent dans les cavernes de la région, nous avons choisi d'observer et de mesurer divers paramètres environnementaux, physiques et minéralogiques, des zones de contacts entre les différents dépôts. Ceci nous a permis de déterminer s'il existait des zones de transition, ou si les passages de l'un à l'autre s'effectuaient de façon brutale impliquant des discontinuités. Des observations préliminaires supposaient qu'il y avait certaines relations spatiales et temporelles entre les concrétions. Les résultats des multiples observations et mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire semblent aussi supporter cette hypothèse. Avant de discuter des différentes sortes de transitions que nous avons observées, nous croyons qu'il est nécessaire de définir les traits spécifiques de chacun des types de concrétions qui ont été étudiés, afin d'être en mesure de les reconnaître. De plus, lors de l'analyse pétrographique des lames minces, nous avons noté quelques éléments particuliers dont les origines pourraient être issues d'une activité microbiologique.

7.1 CARACTÉRISTIQUES DES DIVERSES CONCRÉTIONS

Les différents types de concrétions qui ont fait l'objet de cette étude se caractérisent par leur physionomie générale, mais démontrent plusieurs similitudes au point de vue sédimentologique et pétrologique.

De façon générale, tous les échantillons analysés possèdent des teneurs en eau très variables, ils sont tous composés de calcite relativement pure, et présentent une stratification sédimentaire micritique parfois sparitique. Nos résultats démontrent que la différence majeure entre les dépôts de lait de lune, les botryoïdes et les micro-gours repose sur leur caractère morphologique. La différenciation des botryoïdes et des micro-gours ne pose aucun problème. Les botryoïdes se présentent en colonie plus ou moins dense de petites excroissances globuleuses, fréquemment surélevées sur un pied, leur donnant une apparence de champignons. Les formes plus complexes ressemblent étrangement à des coraux dont les extrémités

des ramifications restent globuleuses. Les micro-gours sont des petits bassins disposés en cascade, formant des coulées simples, multiples ou complexes. Par contre, les dépôts de lait de lune ne semblent pas avoir de morphologie caractéristique, mais démontrent plutôt un large éventail de formes.

Au premier coup d'oeil, il est parfois difficile de reconnaître les laits de lune des micro-gours et des botryoïdes. Dans certains cas, les dépôts de lait de lune se présentent sous des formes globuleuses (type chou-fleur) semblables aux botryoïdes ou en coulées, qui elles, sont typiques des micro-gours. Souvent, les micro-gours et les botryoïdes se développent sur un dépôt de lait de lune dissimulant ainsi sa présence. Dans d'autres cas, les laits de lune recouvrent les autres concrétions épousant ainsi la forme de ces derniers. Cependant, une observation plus méticuleuse nous permet de discerner la présence des dépôts de lait de lune. Lorsqu'ils sont hydratés, ils présentent une viscoélasticité très élevée qui les différencient des autres concrétions qui sont habituellement rigides. Secs, leurs traits grossiers et irréguliers nous permettent de les distinguer des botryoïdes et des micro-gours qui présentent normalement des contours bien définis.

Nos résultats démontrent aussi que les facteurs déterminant le type de concrétion ne reposent pas sur les paramètres environnementaux que nous avons étudiés. Tous les dépôts que l'on trouve dans les réseaux karstiques de la région se sont développés dans des environnements très variables que ce soit du point de vue climatique, de la localisation à l'intérieur des cavités (entrée, zone tampon ou zone profonde) ainsi qu'à l'intérieur d'un site (plancher, mur, plafond ou balcon), des caractéristiques physiques du substrat (pente et morphologie), ou de la présence de micro-organismes visibles. De plus, les concrétionnements reposent généralement sur des marbres de la série de Grenville qui constituent la roche encaissante. Dans certains cas, on peut observer des concrétionnements sur des inclusions, des éboulis, des sédiments de remplissage ou d'autres concrétions préexistantes, mais ce phénomène ne semble pas favoriser le développement d'un type morphologique particulier, si ce n'est que seuls les botryoïdes semblent être capables de croître sur des éboulis.

Les processus qui déterminent le type de concrétion qui se développe sur une surface déterminée restent donc inconnus. Par contre, nous pouvons avancer quelques hypothèses qui pourraient faire l'objet d'études ultérieures. 1) La morphologie du concrétionnement pourrait être régie par la source de la solution mère. Un ruissellement sur une surface possédant une pente, si minime qu'elle soit, pourrait encourager

la formation de coulées. Suivant cette hypothèse, un ruissellement restreint donnerait naissance à une coulée simple, un ruissellement diffus engendrerait une coulée multiple tandis qu'un écoulement en nappe uniforme donnerait une coulée complexe dans le cas des micro-gours, ou un enrobage stratifié couvrant la surface dans le cas des laits de lune. Une eau circulant par capillarité sous la surface pourrait favoriser le développement de botryoïdes dont la morphologie serait dirigée par le réseau interstitiel du dépôt. Un égouttement avantagerait la formation d'un pendentif de lait de lune, imitant les processus de formation des stalactites. Une eau stagnante produirait des accumulations en chou-fleur et des remplissages stratifiés de lait de lune. 2) La présence de micro-organismes pourraient influencer le concrétionnement, surtout dans le cas de botryoïdes, en servant de nucléus dont la charpente est ancrée au substrat. Et 3) la formation de concrétions de type lait de lune pourrait être issue de conditions spéciales de l'environnement, soit par la composition chimique de l'eau ou par une activité biochimique qui pourrait créer un micro-environnement chimique par la sécrétion de substances mucilagineuses qui pourrait aussi expliquer le caractère visqueux des laits de lune et l'origine de la substance gélatineuse enrobant les cristaux observables en lames minces.

Cette étude nous a aussi permis de vérifier s'il y avait des évidences supportant l'une ou l'autre des multiples hypothèses de genèse du lait de lune. L'une des plus anciennes hypothèses qui persiste depuis un siècle, est celle où le lait de lune serait le produit d'une altération de la roche en place, ou de spéléothèmes préexistants. Cet axiome ne semble pas applicable aux concrétions que l'on trouve dans la région à l'étude, car bien que les dépôts de lait de lune se sont développés sur des substrats de nature diverse, souvent composés d'une multitude de minéraux autres que la calcite, les analyses effectuées aux rayons X ont clairement démontré que les dépôts eux, étaient principalement calcitiques, et l'examen pétrographique révèle qu'ils sont constitués de calcite pouvant contenir quelques inclusions non calcitiques groupées ou isolées. Ces inclusions pourraient très bien être originaires de colloïdes en suspension dans la solution mère lorsque le débit de celle-ci lui permet de prendre en charge des particules minérales solides. De plus, dans les cas où le lait de lune s'est développé sur un autre type de concrétion, nous avons observé que la zone de contact entre les deux concrétionnements ne montrait pas de plan d'altération, c'est-à-dire que le passage de l'un vers l'autre ne présentait pas de discontinuité sédimentologique.

Pour les botryoïdes, l'hypothèse de genèse qui semble la plus acceptée de nos jours (Ford et

Williams, 1989), stipule que la source aqueuse originelle de ces concrétions proviendrait de fissures dans le substrat, et migrerait vers la surface, où il y aurait dégazage et précipitation de calcite, par un canal central. Cependant, nous n'avons observé de canaux centraux dans aucun des échantillons que nous avons analysés. Ceci n'implique pas que la solution mère ne vient pas du substrat, mais elle serait dirigée vers la surface par capillarité, et non par canalisation. Par contre, il ne faudrait pas omettre la possibilité d'un concrétionnement nourri par une eau circulant en surface.

En ce qui concerne les micro-gours, la seule hypothèse de genèse qui existe à leur sujet, spécifique que leur formation est engendrée par la présence d'un obstacle perturbant l'écoulement d'un film d'eau. Cependant, nous n'avons observé aucune évidence de l'existence de ces obstructions. Ceci propose qu'elles ont vraisemblablement été déplacées, détruites ou qu'elles n'ont jamais existé.

7.2 TRANSITIONS SPATIALES

Dans le but de déterminer si l'organisation spatiale des différents types de concrétions était aléatoire ou s'il existait des patrons associatifs, nous avons porté une attention particulière sur l'agencement in situ des dépôts selon leur morphologie et leur emplacement. Nous avons aussi observé les caractéristiques sédimentologiques des espaces inter-concrétions, afin d'établir si les passages de l'un à l'autre s'effectuaient de façon brutale, ou si il y avait des zones de transitions entre les caractéristiques pétrologiques.

Les observations de terrain semblent proposer que la disposition des concrétions est organisée suivant une gradation morphologique partant des formes plus complexes vers des types plus simples et moins bien développés. La transition s'effectue généralement de façon progressive, que ce soit entre des concrétions de la même famille mais de types différents ou entre des concrétions de familles distinctes. Le passage d'un type physiologique vers un autre se caractérise souvent par une zone plus ou moins large composée d'un mélange de proto-concrétions associés aux dépôts adjacents.

Les analyses micro-structurales et pétrographiques démontrent une homogénéité spatiale du point de vue sédimentaire. La continuité des micro-structures et des caractéristiques pétrographiques composant les concrétions juxtaposées, suggère un concrétionnement simultané des différents types. En fait, la

morphologie des divers dépôts semble être issue d'une déformation graduelle d'une même couche stratigraphique. Dans les dépôts de lait de lune les strates sont relativement planes, au niveau des micro-gours elles sont ondulées, et on observe un bombement local dans les botryoïdes. Notre étude ne nous a pas permis de déterminer l'origine de ces déformations. Un examen plus approfondi sur ce sujet pourrait nous aider à mieux comprendre la formation d'un type de concrétion plutôt qu'un autre, dans un endroit précis, apportant ainsi plus de précision sur la nature des associations spatiales des divers types morphologiques.

7.3 TRANSITIONS TEMPORELLES

Suite aux diverses analyses effectuées dans le cadre de cette étude, il est clair que les concrétionnements à l'intérieur des cavités de la région à l'étude, présentent des transitions temporelles morphologiques, sédimentologiques et pétrographiques.

Selon la classification morphologique que nous avons établie, les trois grandes familles de concrétions se subdivisent en plusieurs types. Dans le cas des botryoïdes, ces types pourraient être des stades de développement partant de formes simples vers des formes plus complexes. Les boutons simples et les champignons simples pourraient constituer les types primaires de la chaîne évolutive, les spécimens composés seraient des intermédiaires et les coraux composeraient le chaînon final. En ce qui concerne les micro-gours et les laits de lune, l'épanouissement physiologique semble être principalement spatial, partant des formes les plus développées au centre devenant de plus en plus primitives en périphérie.

L'examen des échantillons à l'échelle millimétrique nous a permis de déterminer que tous les types de concrétions analysés se sont formés par accumulation de couches stratigraphiques, qui se distinguent par leur structure et leur compacité. Les caractéristiques structurales des couches semblent indépendantes du type de concrétion, et il ne semble pas exister de fabrique modèle. L'ordre de succession des couches semble stochastique, bien que certaines séquences se répètent dans des concrétions provenant de différents sites et cavernes. Ceci pourrait s'expliquer par une suite de changements semblables dans des conditions sédimentologiques identiques prévalant dans des endroits distincts. Par contre, une même série

de strates particulières ne forme pas nécessairement le même type de concrétion, elle peut constituer un dépôt de lait de lune à un endroit et une colonie botryoïdale ou une coulée de micro-gours dans un autre secteur.

L'étude des échantillons à l'échelle micrométrique nous a permis de constater la présence de zones de transition entre les bancs composant les dépôts. Ces couches intermédiaires se composent d'une superposition graduelle des caractéristiques des strates adjacentes. De ce fait, il est impossible de repérer les limites de deux micro-structures voisines. De plus, les composantes pétrographiques de chacune des micro-structures sont souvent très semblables, possédant parfois un seul attribut distinctif telle la densité, la porosité ou la présence d'un gel.

7.4 ASSOCIATIONS SPATIO-TEMPORELLES

Bien que nos observations de terrain démontrent que la présence de l'un ou l'autre des types de concrétion n'est pas dirigée par la présence d'aucun des autres types, il semble y avoir une certaine association entre les laits de lune et les autres formations.

Les dépôts de lait de lune ne semblent pas avoir de morphologie qui leur est propre, mais empruntent plutôt les traits physiologiques de certains spéléothèmes communs. Les accumulations et les remplissages, dont le seul caractère de distinction est l'aspect superficiel, semblent être analogues à des planchers stalagmitiques ou des "flowstones", les pendentifs ressemblent à des stalactites grossières, les coulées pourraient être des intermédiaires entre des coulées de micro-gours et des draperies, et les enrobages prennent les plis de formes préexistantes. Ce qui caractérise le lait de lune des autres types de concrétions est la capacité de rétention d'eau très élevée de la calcite, qui lui donne son aspect pâteux lorsqu'il est humide, peu propice au développement de formes bien définies. Ce phénomène a aussi pour effet de limiter la capacité de cimentation des particules de calcite, formant ainsi un concrétionnement friable et poudreux lorsqu'il est asséché.

La nature humide des concrétions de lait de lune semble aussi être propice au développement de botryoïdes superficiels. Dans plusieurs cas, des dépôts de lait de lune servent de substrats à des

botryoïdes. Ceci pourraient peut-être s'expliquer par une migration de l'eau vers la surface à l'intérieur du lait de lune lorsque celui-ci est en phase de déshydratation. Si les espaces interstitiels sont disposés de façon à provoquer une concentration des molécules d'eau en des points spécifiques, ceci pourrait favoriser une accumulation de calcite résiduelle, formant ainsi une excroissance stratigraphique.

Nous avons aussi constaté que les botryoïdes et les micro-gours pouvaient être composés entièrement ou en partie (strates), possédant les caractéristiques typiques du lait de lune (teneur en eau élevée, cristaux aciculaires, micrite gélatineuse). Lorsque le lait de lune est hydraté, sa présence s'observe facilement par son aspect visqueux, de plus, les botryoïdes et les micro-gours qui en sont composés se caractérisent par des teneurs en eau anormalement élevées pour ces types de spéléothèmes. Lorsqu'il est sec, il se distingue par son caractère friable par opposition aux concrétionnements calcitiques durs et compacts habituels des spéléothèmes, ainsi que par la présence de cristaux filiformes (aiguilles de calcite) à l'intérieur de la séquence stratigraphique. Selon Bernasconi (1975), ce type de calcite est propre aux concrétions de lait de lune, et semble être issu de sa déshydratation lente.

Cette étude ne nous a pas permis d'établir les causes du caractère hydrophile du lait de lune. Par contre, nous pensons qu'une activité microbiologique ou certaines particularités hydrologiques (composition chimique, pH, ...) pourraient peut-être y jouer un rôle important par la formation de la substance gélatineuse. De ce fait, la reconnaissance des phases de mondmilchisation⁸ à l'intérieur de spéléothèmes communs, serait d'une grande importance, car le lait de lune servirait de marqueur de conditions sédimentologiques. Ce sujet devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

7.5 ACTIVITÉS MICROBIOLOGIQUES

Bien qu'il nous est impossible de déterminer si les microorganismes jouent un rôle génétique dans le concrétionnement cavernicole dans le cadre de cette recherche, nous avons observé plusieurs évidences de leur présence. Nos observations de terrain démontrent que les organismes biologiques sont omniprésents dans les sites où l'on trouve des concrétions. Dans certains cas, ils sont incorporés à

8: Mot proposé par l'auteur pour désigner la formation de lait de lune.

l'intérieur des dépôts (racines), ou bien se sont développés directement sur des concrétions (micro-champignons et mousses). Ces divers organismes pourraient avoir un impact sur la formation de concrétion, en servant de noyau de concrétionnement, ou en créant un micro-environnement inducteur de la précipitation de la calcite.

Ils pourraient probablement expliquer la présence des éléments particuliers que nous avons observés dans certains échantillons lors de notre analyse pétrographique. Les formes très développées dendritiques et fibreuses ainsi que les strates parallèles pourraient en fait représenter des empreintes de colonies bactériennes.

Finalement, les substances non cristallines rougeâtres semblent être du manganèse, qui pourrait être un produit biochimique sécrété par des micro-organismes. La formation de manganèse par certaines bactéries est un phénomène commun dans plusieurs types d'environnement, et dans notre cas, il pourrait vraisemblablement constituer la source de manganèse nécessaire à la formation de la kutnohorite présente dans une grande partie de nos échantillons.

7.6 NATURE ET ORIGINE DE LA SUBSTANCE GÉLATINEUSE

La matière gélatineuse dans laquelle baignent parfois les cristaux pourrait être soit minérale ou organique. Dans le cas où elle serait de nature minérale, il y aurait deux origines possibles: 1) Elle pourrait être issue d'une mauvaise préparation des lames minces. Si les lames sont trop épaisses, ou de tailles non uniformes, il serait alors impossible d'effectuer le "focus", et il y aurait brouillage des éléments. Selon nous, cette hypothèse devrait être rejetée, car le phénomène ne se présente pas de façon aléatoire, mais prend plutôt des formes organisées (strates bien définies et continues, organisation dendritique, formes très complexes,...). De plus, on peut souvent observer des cristaux dont les contours sont très bien dessinés (ex. aiguilles de calcite) baignant dans cette substance visqueuse. 2) Elle pourrait être une micrite finement cristallisée très dense, qui se caractérise généralement par une couleur brunâtre. Cependant, dans certains cas, cette matière possède une densité très faible, et cette hypothèse ne pourrait pas expliquer les formes

particulières que nous avons observées.

Dans le cas où elle serait d'origine organique, il s'agirait probablement d'un gel mucilagineux, qui est une substance sécrétée par le métabolisme de plusieurs organismes, dont les champignons, les algues, les cyanobactéries et les bactéries. Cette hypothèse semble très plausible, et pourrait expliquer les structures très complexes que nous avons observées ainsi que les formes dendritiques, fibreuses et arbustives qui présentent des similitudes avec les structures de croissance de colonies microbiologiques.

CHAPITRE VIII: CONCLUSION

Les objectifs de cette recherche étaient de préciser les caractéristiques propres à chacun des types de concrétions que l'on trouve dans les réseaux karstiques de la région à l'étude, de déterminer les paramètres décisifs de la morphologie du concrétionnement, et de vérifier l'existence de transitions spatio-temporelles entre les divers dépôts.

Dans les cavités de la région, nous trouvons principalement trois familles de concrétions, soit les laits de lune, les botryoïdes et les micro-gours. Lors de nos observations de terrain, nous avons constaté que chacune de ces grandes classes pouvait être subdivisée en plusieurs espèces selon leur physionomie. Ceci nous a permis d'établir une classification morphologique.

Selon nos résultats, le seul facteur de différenciation entre les concrétions réside dans l'aspect morphologique général des dépôts. Tous les spécimens analysés possèdent des assemblages minéralogiques semblables, dont la calcite est la composante primaire imprégnée de traces d'aragonite, de kutnohorite, d'albite, de microcline, de quartz et d'enstatite. Ils sont tous formés d'une stratification micritique à sparitique, dont la structure des différentes strates peut être très variable, mais leurs analogues pétrographiques sont semblables, et se distinguent principalement par la densité des particules ou par la porosité des strates. Nous avons distingué 9 micro-structures dont les combinaisons stratigraphiques peuvent être regroupées en 11 classes de fabrique. Ces micro-structures ainsi que les diverses fabriques ne sont pas spécifiques à l'un ou l'autre des types de concrétions. La teneur en eau des échantillons analysés est très variable et semble aussi relativement indépendante du type de dépôt.

Nous n'avons pas réussi à élucider les causes qui régissent le type de concrétionnement. Cependant, d'après nos observations et mesures effectuées in situ, nous pouvons affirmer que la localisation à l'intérieur des réseaux, la température ambiante, l'humidité relative, la nature du substrat, la présence d'organismes visibles à l'oeil nu ainsi que l'emplacement à l'intérieur d'un site ne sont pas des facteurs déterminants.

La synthèse des résultats obtenus par cette étude, démontre qu'il y a bel et bien des transitions entre les concrétions. Spatialement, ces transitions se résument par des continuités stratigraphiques et

structurales dans l'espace ainsi que par des phases morphologiques intermédiaires entre les différents types des concrétions qui cohabitent à l'intérieur d'un site. Dans le temps, elles se traduisent par des zones de transition issues d'un mélange graduel des caractéristiques pétrographiques de strates superposées. Par contre, il ne semble pas y avoir de dépendance entre les concrétions dans le sens qu'aucun type morphologique ne nécessite la présence d'un autre type pour se développer. Cependant, les dépôts de lait de lune prennent souvent des traits morphologiques typiques des botryoïdes et des micro-gours.

Plusieurs auteurs ont déjà souligné des exemples de spéléothèmes communs (stalactites, stalagmites, perles de caverne, "flowstone",...) formés de matières présentant les caractéristiques du lait de lune, et les interprétations de ces manifestations sont nombreuses. Les hypothèses élaborées pour expliquer ce phénomène se regroupent sous deux écoles de pensée opposées, dont la première interprète les laits de lune comme des produits d'altération de spéléothèmes pré-existants, et la seconde pense plutôt que les laits de lune sont une première étape de la formation de certains spéléothèmes. Suite à l'analyse de nos résultats, nous estimons que ces explications ne sont pas adéquates.

Selon nous, la formation de lait de lune pourrait résulter de conditions hydrologiques (composition de l'eau, pH ou autres), biochimiques (micro-environnement créé par une activité biologique) ou la combinaison de ces deux éléments, prévalant lors du concrétionnement, et qui inhibe la cristallisation habituelle de la calcite. Lors de la prospection sur le terrain, nous avons noté que les concrétions étaient généralement entourées d'organismes biologiques (dont principalement des micro-champignons) ou leurs servaient de base. Il nous a été impossible dans le cadre de cette étude de déterminer si ces organismes avaient un impact sur l'épanouissement des dépôts. Néanmoins, l'analyse pétrographique des lames minces de certains échantillons présentent plusieurs signes qui pourraient appuyer l'hypothèse d'une activité biochimique.

Si ces conditions se maintiennent, la concrétion sera formée entièrement de lait de lune, et sa forme sera celle d'un spéléothème grossier. Comme nous démontrent l'examen de la morphologie de nos échantillons de lait de lune, ainsi que ceux décrits dans la littérature, les laits de lune ne semblent pas posséder de morphologie qui leurs est propre. Ils se présentent plutôt sous une multitude de formes rappelant celles de spéléothèmes communs. Par contre, si les conditions sont temporaires, le concrétionnement dit "normal" reprendra son cours, et le lait de lune sera incorporé dans la séquence

stratigraphique, ce qui semble être le cas dans certains de nos échantillons. Alors, le lait de lune pourrait représenter un marqueur idéal pour la reconstitution de l'histoire des conditions sédimentologiques.

Selon toute évidence, le lait de lune n'est pas un spéléothème en lui-même, mais une composante occasionnelle de divers spéléothèmes communs. Conséquemment, nous proposons une nouvelle définition: soit que le lait de lune est un concrétionnement microcristallin calcitique en deux phases (liquide et solide), pouvant composer divers spéléothèmes (en partie ou en totalité), possédant une capacité de rétention d'eau anormalement élevée, ayant une consistance visqueuse et pâteuse lorsqu'il est humide, poudreuse lorsqu'il est déshydraté, présentant fréquemment une surface rappelant celle d'un chou-fleur, et pourrait être le résultat de conditions physico-chimiques et/ou biochimiques spéciales prévalant lors de sa formation, mais dont les processus de genèse restent à découvrir.

Des recherches ultérieures sur la nature du gel incorporé dans les sédiments et sur la composition chimique de l'eau d'imprégnation des laits de lune, ainsi qu'une étude microbiologique pourraient vraisemblablement apporter plus de précisions sur les causes de la formation de lait de lune et non d'une cristallisation spéléothémique normale.

BIBLIOGRAPHIE

- ADOLPHE, J.-P.; CHOPPY, J.; LOUBIÈRE, J.-F.; PARAS, J. et SOLEILHAVOUP, F., 1991. Biologie et concrétionnement: un exemple, les baguettes de gours. *Karstologia*, n° 18, p. 49-55.
- AHRENS, C.D., 1991. *Meteorology today, an introduction to weater, climate and the environment*. West Publishing Company, Minnesota, 577 p.
- BASSILLAIS, A., 1997. Dégradation des parois des grottes. Rapport de stage non publié, Centre de Recherche sur la Matière Divisée, Université d'Orléan, 44 p.
- BEAUPRÉ, M. et CARON, D., 1986. *Découvrez le Québec souterrain*. Québec Science Éditeur, Presses de l'Université du Québec, 254 p.
- BERNASCONI, R., 1961. L'évolution physico-chimique du mondmilch. *Rassegna Speleol. Italiana Mem*, vol. 5, n° 2, p. 75-100.
- BERNASCONI, R., 1975. Le mondmilch calcitique et ses formes cristallines. *Stalactite*, Neufchâtel, vol. 25, n° 2, p. 6-10.
- BERNASCONI, R., 1981. Mondmilch (moonmilk): two questions of terminology. In *Eight Intern. Congress of Speleol.*, Bowling Green Edit., tome 1, p. 113-116.
- BERTOUILLE, H., 1972. Le mondmilch, repère climatique? *Annales de Spéléol.*, tome 27, p. 609-623.
- BILLY, C. et BLANC, P. H., 1979. Application du microscope électronique à balayage (M.E.B.) et des techniques associées à la paléontologie et à la sédimentologie. 5^{ème} contribution: Le mondmilch, essai bibliographique et observations au M.E.B., *Travaux du laboratoire de micropaléontologie*, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, n° 8, p. 127-143.
- BILLY, C., FOURNI, J., CARPENTIER, P. et CHETAIL, M., 1979. Bactéries calcifiantes et hanhydrase carbonique. *Compt. Rend. Acad. Sci.*, Paris, n° 228, p. 1687-1690.
- BLACK, D.M., 1951. Origin and development of "positive" water catchment basins, Carlsbad Caverns, New Mexico. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 13, p. 27-29.
- BLACKBURN, W.H. et DENNEN, W.H., 1988. *Principles of mineralogy*. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa, 413 p.

- BOURDON, S., 1976. La grotte de Lusk (Co. Gatineau), Québec. Fiche guide non publiée de la Soc. Qué. Spéléol., 5 p.
- BROUGHTON, P. L., 1972. Secondary mineralization in the cavern environment. *Study in Speleol.*, London, vol. 2, part 5, p. 191-207.
- CARON, D., LAMARRE, J. et JOHNSON, G., 1976. La grotte de la décharge du Petit Lac du Cerf. Fiche guide non publiée de la Soc. Qué. Spéléol., 4 p.
- CAUMARTIN, V., 1957. Recherches sur une bactérie des argiles de cavernes et des sédiments ferrugineux. *Compt. Rend. Acad. Sci.*, Paris, vol. 245, p. 1758-1760.
- CAUMARTIN, V. et RENAULT, P., 1958. La corrosion biochimique dans un réseau karstique et la genèse du mondmilch. *Notes Biospéléologiques*, Paris, vol. 13, p. 87-109.
- COMPTOIS, R., 1976. Les grottes du Lac des Îles. Fiche guide non publiée de la Soc. Qué. Spéléol., 5 p.
- COOPER, R.G., 1993. A comment on "Type locality of mondmilch". *Cave Science*, vol. 20, n°1, p. 29.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A. et ZUSSMAN, J., 1992. *An introduction to the rock-forming minerals*. Longman Group Ltd., London., 696 p.
- DIACONU, G., 1976. Quelques considérations sur la genèse du mondmilch calcitique dans les grottes. *Travaux Inst. Spéléol. E. Racovitza*, Bucarest, vol. 15, p. 107-210.
- DUPUY, H., 1992. *Géologie de la région de Wakefield-Cascades et minéraux industriels*. Thèse de maîtrise non publiée, Département de Géologie, Université d'Ottawa, Ontario, 198 p.
- FISHBEC, R. et MÜLLER, G., 1971. Monohydrocalcite, hydromagnesite, nesquehonite, dolomite, aragonite and calcite in speleothems of the Fränkische Schweiz, Western Germany. *Contr. Mineral. Petrol.*, Berlin, vol. 23, p. 87-92.
- FISCHER, H., 1988. Etymology, terminology and an attempt of definition of mondmilch. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 50, p. 54-58.
- FISCHER, H., 1992. Type locality of mondmilch. *Cave Science*, vol. 19, n° 2, p. 59.
- FISCHER, H., 1993. Mondmilchloch: la cavité type du mondmilch (Obwalden, Suisse). *Karstologia*, n° 21, p. 56-58.
- FORD, D. et WILLIAMS, P., 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman Ltd., London, 601 p.

- FOUCAULT, A. et RAOULT, J. F., 1995. *Dictionnaire de géologie*. 4^e édition, Masson, Paris, 324 p.
- GENTY, D., 1992. Les spéléothèmes du tunnel de Godwarville (Belgique) - un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne - intérêt pour la cinétique de la précipitation de la calcite et sa relation avec les variations d'environnement. *Speleochronos*, vol. 4, p. 3-29.
- GÈZE, B., 1961. État actuel de la question du mondmilch. *Spelunca*, mémoires n° 1, p. 25-29.
- GÈZE, B., LAGRANGE, R. et POBEGUIN, T., 1956. Sur la nature du revêtement occasionnel des parois ou du sol des grottes (mondmilch). *Compt. Rend. Acad. Sci.*, Paris, vol. 242, p. 144-145.
- GÈZE, B. et POBEGUIN, T., 1962. Contribution à l'étude des concrétions carbonatées. Dans *Acte 2, Congrès International de Spéléologie Bari 1958*, Castellana Grotte. Tome I, p. 396-414.
- GIRAULT, J. et LEDOUX, R., 1990. *Guide pratique d'identification des minéraux, notions élémentaires de minéralogie*. Les Publications du Québec et le Ministère de l'Énergie et des Ressources (Mines), Québec, 114 p.
- GRADZINSKI, R. et RADOMSKI, A., 1957. Cavern deposits of rock-milk in the Szczelina Chocholowska Cave. *Annal. Soc. Geol.*, Pologne, vol. 26, p. 64-90.
- GRADZINSKI, R., JOACHIM, S. et BOLESZAW, S., 1997. Microbial agents of moonmilk calcification. In *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*, Switzerland, vol. 1, p. 275-278.
- HALLIDAY, W.R., 1950. Preliminary notes on a new concept of the formation of helictites. *California Caver*, vol. 2, n° 8, p. 2-3.
- HAMILTON, W.R., WOLLEY, A.R. et BISHOP, A.C., 1974. *Les minéraux roches et fossiles du monde entier en couleurs*. Elsevier Séquoia, Bruxelles, 320 p.
- HARMAN, M. et DECRO, J., 1976. Problems of mineralogy and genetics in soft sinters in the Slovak Caves. *Slovensky Kras*, Liptovski Mikulas, vol. 14, p. 64-90.
- HILL, C.A., 1976. *Cave minerals*. The Speleo Press, Austin, Texas, 137 p.
- HOCQ, M., 1994. La Province de Grenville. Dans *Géologie du Québec*, C. Dubé éditeur, Les Publications du Québec, Québec, p. 74-94.

- HOEG, O.A., 1946. Cyanophyceae and bacteria in calcareous sediments in the interior of limestone caves in Nor-Randa, Norway. *Nytt Magazine for Naturvidenskapene*, Oslo, vol. 85, p. 99-104.
- HOLDEN, R.J., 1940. Notes on certain cave deposits. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 1, p. 1-3.
- JATON, C., ROCHON, J., DELVERT, J. et BRETILLET, M., 1966. Étude du mondmilch de grottes du Camboge. *Ann. Institut Pasteur*, Paris, vol. 110, p. 912-919.
- JONES, B. et KAHLE, C.F., 1986. Dendritic calcite crystals formed by calcification of algal filaments in a vadose environment. *Journ. Sed. Petrology*, vol. 56, n° 2, p. 217-227.
- JONES, B. et KAHLE, C.F., 1993. Morphology, relationship, and origin of fiber and dendrite calcite crystals. *Journ. Sed. Petrology*, vol. 63, n° 6, p. 1018-1031.
- LAMARRE, J., 1976. Les grottes de Pontmain. Fiche guide non publiée de la Soc. Qué. Spéléol., 5 p.
- LANE, M.D. et CHRISTENSEN, P.R., 1997. Thermal infrared emission spectroscopy of anhydrous carbonates. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n° 25, p. 25 581-25 592.
- LIS, B., LIS, J. et STEPSIEWSKI, M., 1967. Preliminary results of the geochemical and structural analyses of rock-milk from Szczelina Chocholowska Cave in the Tatra Mts. *Prace Muzeum Zeiemi*, Warszawa, vol. 11, p. 271-279.
- MAALEV, M.N. et PHILIPPOV, A.P., 1975. Dislocation growth mechanism of calcite filamentary crystals forming moonmilk from the Vodopada Cave, Bulgaria. In *Proceedings of the 6th International Congress of Speleology*, Olomouc, vol. I, p. 499-508.
- MACKENZIE, W.S. et GUILFORD, C., 1980. *Atlas of rock-forming minerals in thin section*. Longman Group Ltd., London, 98 p.
- MASSON, B. et BERRY, L.G., 1968. *Elements of mineralogy*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 550 p.
- MASSON-WILLIAMS, A., 1959. The formation and deposition of moonmilk. *Trans. Cave Res. Grp. G.B.*, vol. 5, n° 2, p. 133-138.
- MASSON-WILLIAMS, A., 1961. Biological aspects of calcite deposition. *Atti. Symposium Intern. Speleol.: "Riempimenti naturali di grotte"*, Varenna. In *Rassegna Speleol. Ital. Memoria* 5, tome II, p. 235-238.
- MELON, J. et BOURGUIGNON, P., 1962. Étude du mondmilch de quelques grottes de Belgique. *Bull. Soc. Franç. Minéral. Cristal.*, vol. 85, p. 234-241.

- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1990. *Petite flore forestière du Québec*. Les Publications du Québec, Québec, 250 p.
- MITRA, S., 1989. *Fundamentals of optical spectroscopic and x-ray mineralogy*. John Willey & Sons, New York, 236 p.
- MIZGIER, S., 1929. Sur la structure de la lublinité. *Compt. Rend. Soc. Polon. Physique*, Warszawa, vol. 4, p. 19-26.
- MOORE, G.W. et NICHOLAS, G., 1964. *Speleology*. Boston D.C. Heath and Co., Boston, 120 p.
- MOORE, G.W. et SULLIVAN, G.N., 1980. *Speleology, the study of cave*. Zephyrus Press, Inc., New Jersey, 176 p.
- MOORHOUSE, W.W., 1959. *The study of rocks in thin section*. Harper & Brothers, New York, 514 p.
- NESS, W.D., 1991. Introduction to optical mineralogy. Oxford University Press, New York, 335 p.
- NOVAK, D., 1974. The aragonite moonmilk from Mezica Mine. *Nase James*, Ljubljana, vol. 16, p. 101-106.
- OHDE, B.P. et TAKII, S., 1978. Environment and micro-organisms associated with the formation of moonmilk. *Jap. Speleol. Soc.*, Japan, vol. 3, p. 44-52.
- ONAC, B.P. et GHERGARI, L., 1993. Moonmilk mineralogy in some Romanian and Norwegian Caves. *Cave Science*, vol. 20, n° 3, p. 107-111.
- POBEGUIN, T., 1955. Sur les concrétions calcaires observées dans la Grotte de Moulis (Ariège). *Compt. Rend. Acad. Sci.*, Paris, vol. 241, p. 1791-1793.
- POCHON, J., CHALVIGNAC, M.A. et KRUMBEIN, W., 1964. Recherches biologiques sur le mondmlch. *Compt. Rend. Acad. Sci.*, Paris, vol. 258. p. 5113-5115.
- PRÉVOST, C., 1991. *Processus et intensité actuels et Holocènes de l'érosion du marbre de Grenville, région Gatineau-Lièvre*. Thèse de maîtrise non publiée, Département de Géographie, Université d'Ottawa, Ontario, 250 p.
- RAJMAN, L. et RODA, S., 1974. On the investigation of the origin of plastic sinters in selected caves of the Czechoslovak Socialist Republic. *Slovensky Kras*, vol. 12, p. 320.
- RIVERS, T., MARTIGNOLE, J., GOWER, C.F. et DAVIDSON, T., 1989. New tectonic divisions of the Grenville Province, Southeast Canadian Shield. *Tectonics*, vol. 8, p. 63-84.

- ROGER, B.W. et MOORE, G.W., 1976. A scanning microscope study of moonmilk. *Geo* 2, vol. 3, n° 3, p. 37-38.
- STOOP, G.J., 1976. On the nature of "lublinite" from Hollanta (Turkey). *American Mineralogy*, vol. 61, n° 1-2, p. 172.
- SWEETING, M.M., 1972. *Karst landforms*. The Macmillan Press Ltd., London, 362 p.
- THRAILKILL, J., 1963. Moonmilk, cave pearls, and pool accretions from Fulford Cave, Colorado. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 25, p. 88-90.
- THRAILKILL, J., 1965. Origin of cave popcorn. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 27, p. 59.
- THRAILKILL, J., 1971. Carbonate deposition in Carlsbad Caverns. *Journ. Geol.*, vol. 79, p. 683-695.
- THRAILKILL, J., 1976. Speleothems. In *Developments in sedimentology*, vol. 20, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, p. 73-86.
- TRUDEL, M., 1988. Grotte Mokidjiwinib. Fiche guide non publiée de la Soc. Qué. Spéléol., 23 p.
- TUCKER, M.E., 1981. *Sedimentary petrography, an introduction*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 252 p.
- TUCKER, M.E., 1988. *Technics in sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 394 p.
- URBANI, F., 1977a. Espeleotemas de calcita (lublinita), yeso y de materiales de guano Cueva La Milagrosa, Venezuela. *Bol. Soc. Venezolana Espeleología*, vol. 8, n° 15, p. 5-15.
- URBANI, F., 1977b. Notas sobre algunas muestras de leche de luna de cuevas de Venezuela. *Bol. Soc. Venezolana Espeleología*, vol. 8, n° 16, p. 109-115.
- VARNEDOE, W.W., 1965. A hypothesis for the formation of rimstone dams and gourls. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 27, n° 4, p. 151-152.
- WARWICK, G.T., 1952. Rimstone pools and associated phenomena. *Trans. Cave Res. Grp. G.B.*, vol. 2, p. 153-165.
- WHITE, W.B., 1976. Cave minerals and speleothems. In *The science of speleology*, T.D. Ford and C.H.D. Cullingford edit., Academic Press, London, 593 p.
- WHITE, W.B., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York, 464 p.

- WHITE, W.B. et DEIKE, G.H., 1962. Secondary mineralization in Wind Cave, South Dakota. *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, vol. 24, p. 74-87.
- WILLIAMS, A.M., 1959. The formation and deposition of moonmilk. *Trans. Cave Res. Grp. G.B.*, vol. 5, no 2, p. 135-138.
- WINKLER, H.G., 1979. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Fifth edition, Springer-Verlag Edition, New York, 348 p.
- WYNNE-EDWARDS, H.R., 1972. The Grenville Province. *Geological Association of Canada Special Paper*, n° 11; p. 263-334.
- WYNNE-EDWARDS, H.R., 1976. Proterozoic ensialic orogeneses: the Millipede model of ductile plate tectonics. *Amer. Journ. Sci.*, vol. 276, p. 927-953.

ANNEXE A

**MATRICES DES DONNÉES CLIMATIQUES POUR LES STATIONS
CHELSEA ET MONT LAURIER**

Canadian Climate Data (c)1994 Environment Canada

CHELSEA, QUE (45°31'N 75°47'W, 113m, 1927 TO 1993)
 ID :7031360 , Year-Month Matrix For (1961-1990)
 Temperature- Mean Daily Temperature (°C)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1960													
1961	-15.1	-8.4	-4.4	4.0	10.1	15.6	19.7	19.0	17.5	9.6	1.7	-6.2	6.3
1962	-12.6N	-14.2	-2.8N	3.5	13.5	17.5	17.9	18.7	12.6	7.5	-0.4	-8.8N	4.4
1963	-12.9N	-15.1	-5.8	4.3	11.1	18.6	20.9	16.8	12.0	11.2	3.8	-13.3	4.3
1964	-7.8	-9.8	-2.9	5.1	14.6	17.4	21.4	17.1	13.6	6.9	1.1	-6.7	6.3
1965	-11.9	-11.2	-4.0	3.0	13.5	17.3	18.0	17.9	14.6	7.5	-0.2	-4.5	6.0
1966	-11.1	-8.6	N	4.9	10.2	16.3	20.8	18.7	13.4	8.0	2.9	-7.2	N
1967	-7.5	-14.1	-5.9	4.1	9.0	18.8	20.7	19.2	14.8	8.0	-0.7	-5.4	6.1
1968	-14.4	-11.7	-1.7	8.1	11.5	16.8	20.5	18.2	16.7	10.3	0.2	-9.1	6.6
1969	-9.5	-7.0	-3.5	4.8	10.7	17.1	20.0	21.1	14.4	7.8	2.1	-8.0	6.3
1970	-14.8	-11.6	-3.8	4.6	12.3	17.8	21.0	20.4	14.7	9.8	2.6	-10.4	6.2
1971	-14.4	-9.1	-5.4	2.4	12.4	18.1	19.2	19.0	17.1	11.3	0.5	-7.1	6.3
1972	-10.0	-12.7	-6.3	1.7	13.2	16.8	20.3	18.1	14.6	5.8	0.1	-8.4	4.4
1973	-8.8	-11.2	1.4	5.8	11.7	18.5	N	21.6	14.6	9.9	0.6	-6.9	N
1974	-10.3	-12.0	-5.0	5.2	9.6	17.4	20.0	19.5	13.3	5.6	0.7	-3.8	6.0
1975	-9.5	-8.5	-5.1	1.9	16.4N	18.6	22.0	20.6	13.6	8.7	3.7	-10.3	6.0
1976	-15.5	-7.9	-4.4	6.5N	10.9N	19.5N	N	18.3N	12.8	5.0	N	-13.0	N
1977	-14.2	-8.3	0.9	6.1	14.6	16.8	20.5	18.4	13.9	7.6	2.2	-7.8	6.3
1978	-12.2	-12.6	-5.0	2.9	15.0	17.7	20.7	20.0	13.1	7.7	0.9	-7.1	6.1
1979	-10.4	-14.1	0.1	5.6	13.1	17.6	21.2	18.5	14.3	7.7	3.0	-5.9	6.3
1980	-9.1	-9.9	-3.4	6.5	13.1	15.5	20.4	20.9	14.0	6.1	-0.7	-13.3	6.0
1981	-15.5	-3.9	-0.9	6.8	12.3	18.0	20.9	19.6	14.0	5.9N	1.4	-4.4	6.2
1982	-16.5	-10.9	-3.7N	3.4	14.7	17.0	20.9	17.7	N	9.4	2.3	-3.9	N
1983	-9.3	-7.9N	-1.3N	4.3	10.3	18.6	21.2	20.6	16.9	7.9	1.2	-9.5	6.1
1984	-13.5	-4.5	-7.4	7.0	10.9	18.2	20.5	20.4	13.6	9.4	1.6	-4.7	6.3
1985	-14.5	-7.9	-2.5	5.1	13.0	16.1	19.8	19.0	16.0	9.0	0.8	-9.2	6.4
1986	-10.5	-9.8	-2.1	8.4	14.0	16.2	19.7	17.8	13.4	7.5	-0.4	-5.1	6.7
1987	-9.7	-10.3	-0.1	8.8	12.7	18.4	21.4	18.5	14.7	6.6	0.6	-3.6	6.6
1988	-8.5	-9.2	-4.5	5.2	14.5	16.9	22.5	20.1	13.9	6.1	2.8	-7.8	6.3
1989	-9.1	-10.8	-5.5	4.0	13.7	18.3	21.5	19.5	15.1	6.9	-1.1	-17.1	4.8
1990	-5.1	-8.5	-2.9	6.9	11.8	18.1	20.9	20.3	13.4	7.8	1.7	-5.7	6.6
mean	-11.5	-10.1	-3.4	6.0	12.5	17.6	20.6	19.2	14.4	8.0	1.2	-7.8	6.6
No.Yrs	30	30	29	30	30	30	28	30	29	30	29	30	

Canadian Climate Data (c)1994 Environment Canada

CHELSEA, QUE (45°31'N 75°47'W, 113m, 1927 TO 1993)
 ID :7031360 , Year-Month Matrix For (1961-1990)
 Precipitation - Total Precipitation (mm)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1960													
1961	28.3	64.4	47.8	77.6	68.6	94.5	108.6	85.8	46.9	27.0	65.4	75.7	790.6
1962	74.2	83.7	38.9	N	49.9	85.9	80.0	51.6	75.2	112.9	58.5	65.4	N
1963	38.1	62.1	75.3	88.9	65.8	54.0	86.1	84.6	109.7	15.5	155.8	54.9	890.8
1964	74.7	23.0	50.4	57.0	59.3	N	80.4	73.3	46.3	53.3	73.8	96.8	N
1965	64.7	73.4	22.0	50.6	36.3	32.0	77.9	201.7	102.4	132.9	93.2	79.9	967.0
1966	55.6	43.6	62.7	24.0	69.4	96.1	72.8	85.1	53.3	44.7	143.2	141.6	892.1
1967	100.8	65.1	32.6	78.0	65.6	147.1	66.7	72.3	134.9	106.1	104.1	61.0	1034.3
1968	85.6	47.9	103.9	43.3	63.9	104.6	62.8	79.2	125.8	64.9	85.3	61.8	929.0
1969	71.8	25.5	42.3	131.0	92.8	76.5	109.3	44.7	30.9	54.9	114.7	79.4	873.8
1970	33.4	86.3	57.5	60.3	83.8	31.4	78.5	43.7	104.5	92.0	99.8	109.6	880.8
1971	75.1	129.4	64.6	45.7	34.3	116.3	123.1	75.6	55.8	62.8	75.1	96.9	964.7
1972	79.1	129.2	92.4	46.3	62.9	185.6	118.3	183.6	80.7	98.6	100.7	172.6	1362.2
1973	61.3	66.3	110.0	100.9	113.0	127.6	107.3	114.7	41.8	71.4	73.2	139.8	1127.3
1974	67.8	43.7	106.2	75.2	151.1	82.0	65.0	27.2	69.2	53.4	102.7	131.6	976.1
1975	90.3	47.2	82.5	57.4	35.5	62.0	90.3	24.9	111.6	86.5	96.5	96.4	881.1
1976	74.4	122.4	134.7	N	98.3	136.0	N	85.6	112.5	75.2	N	59.8	N
1977	77.1	64.6	125.5	54.4	72.3	73.5	105.8	112.6	107.0	84.9	114.5	122.2	1114.4
1978	131.3	8.9	89.6	82.8	55.6	52.2	24.7	103.9	71.0	46.5	71.9	111.7	860.1
1979	97.1	28.8	58.6	103.7	99.3	88.3	111.3	83.1	53.4	113.9	101.9	97.2	1036.6
1980	35.8	39.7	114.3	100.4	55.5	84.6	155.2	43.2	87.9	109.3	46.8	100.5	973.2
1981	34.3	110.7	42.1	69.3	120.9	127.4	44.4	102.9	98.1	124.4	50.1	36.9	961.6
1982	67.5	32.4	52.9	67.2	44.4	77.9	68.5	64.1	110.9	51.8	129.9	104.0	871.6
1983	81.6	62.2	54.8	84.5	142.5	55.0	64.6	42.9	58.1	119.2	101.8	116.7	963.9
1984	48.6	91.0	29.8	114.1	114.1	70.7	57.6	205.0	15.5	51.4	79.6	101.0	976.4
1985	51.8	78.9	98.9	52.0	70.2	83.8	98.8	47.6	61.7	72.0	64.9	64.8	846.4
1986	58.2	35.4	59.7	33.7	200.2	85.2	119.4	135.3	145.7	80.6	44.5	82.0	1067.9
1987	51.5	31.6	70.7	52.7	89.6	97.0	136.0	82.1	123.8	78.1	114.8	75.9	1003.8
1988	64.7	78.1	32.6	86.4	25.1	85.1	68.8	149.4	57.4	115.5	75.5	52.4	891.0
1989	63.5	31.6	65.5	21.9	85.3	90.8	63.6	55.3	60.0	103.1	131.6	57.5	839.7
1990	88.9	68.1	31.9	81.4	47.9	71.6	70.3	60.9	103.7	113.5	79.8	131.5	947.6
mean	67.4	62.6	68.4	69.4	79.4	88.8	86.8	87.4	81.9	79.9	91.4	92.7	968.8
No.Yrs	30	30	30	26	30	29	29	30	30	30	29	30	

Canadian Climate Data (c)1994 Environment Canada

MONT LAURIER, QUE (46°34'N 75°33'W, 244m, 1963 TO 1993)
 ID :7035160 , Year-Month Matrix For (1963-1990)
 Temperature - Mean Daily Temperature (°C)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1960													
1963	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	2.0N	-15.5	M
1964	-9.2	-10.9	N	4.5N	12.8N	15.6	19.3	14.9	12.2	5.1N	M	-8.5N	M
1965	N	-12.0N	M	M	11.8	15.7	15.5	16.2	12.0	4.2N	-3.2N	-6.3N	N
1966	M	-11.1N	-2.4	3.6	8.0	17.1N	18.1	16.8	11.1	6.0	1.2	-8.9	N
1967	-9.5	-16.9	-8.2	2.1	6.9	17.0	18.4	17.0	12.3	5.4	-2.4	-8.6	2.8
1968	-16.3	-13.9	-2.6	5.9	10.1	14.7	18.4	15.9	15.5	9.0	-2.2	-10.4	3.7
1969	-9.9	-7.4	-4.7	3.0	8.5	15.6	17.9	18.9	11.8	5.3	0.7	-10.5	4.1
1970	-17.6	-12.9	-5.0	3.9	10.3	15.6	19.2	17.9	12.3	7.9	1.0	-12.0	3.4
1971	-16.6	-10.8	-6.0	2.0	11.1	16.2	17.0	16.9	15.5	9.6	-1.4	-9.4	3.7
1972	-11.8	-14.3	-7.7	0.5	11.9	15.7	18.6N	16.3	12.2	4.0	-1.5	-10.6	2.8
1973	-10.6	-13.2	1.2	4.5	10.7N	17.1	N	20.2	12.1	8.0	-1.4	-8.7	N
1974	-13.4	M	M	M	M	M	N	16.7N	10.4	3.4	-0.8	-5.8	N
1975	-11.3	-10.4	-6.7	0.6	14.2	16.8	19.7	17.5N	11.3	6.9	1.2	-12.5	3.9
1976	-17.5N	-10.2N	-5.6	5.2	9.6N	17.8	17.2	16.3	10.7	3.3N	-3.0	-15.7	2.3
1977	-15.6	-9.4	-0.4	3.5	12.7	14.5	18.1	16.0	11.3	5.6N	-0.3	-10.3	3.8
1978	-14.6	-14.9	-7.7	1.4	13.3	15.4	17.8	17.0	9.6	5.2	-2.2	-10.2N	2.6
1979	-13.1	-16.2	-1.2	4.1	11.3	15.3	18.3	15.7	11.5	5.9	1.1	-8.2	3.7
1980	-12.5	-13.1	-4.6	5.3	10.4	13.6	17.5	17.7	10.2	3.6	-3.8	-17.7	2.2
1981	-17.7	-5.5	-3.6	4.4	10.3	15.1	17.9	16.4	11.3	3.6	-0.9	-6.7	3.7
1982	-19.2	-12.2	-5.9	0.8	12.9	14.0	17.4	13.7	12.7	6.8	-0.6	-6.9	2.8
1983	-11.1	-9.6	-3.0	3.5	8.1	15.9	18.1	17.5	13.6	5.7	-0.8	-12.4	3.8
1984	-16.2	-8.0	-9.3	5.9	8.4	15.3	17.6	18.0	10.8	7.2	-1.1	-7.5	3.6
1985	-15.9	-9.7	-4.6	2.6	10.5	14.7	17.7	16.6	13.5	7.4	-1.5	-11.8	3.3
1986	-13.0	-12.0	-3.6	7.3	12.1	13.5	N	15.8	11.2	5.1	N	M	N
1987	M	M	M	M	N	16.0	19.0	15.5	12.4	4.0	-1.7	-6.0	N
1988	-12.5	-12.2	-6.6	4.1	12.7	14.2	19.7	17.5	11.1	4.0	M	M	N
1989	M	M	M	M	M	M	N	17.1N	12.5N	7.0	-3.6	-20.9	N
1990	-7.8	-10.8	-5.2	5.2	9.6	15.9	18.2	17.2	11.2	5.9	-0.5	-8.5	4.2
mean	-13.6	-11.6	-4.7	3.6	10.8	16.6	18.1	16.8	11.9	6.7	-1.0	-10.4	3.4
No.Yrs	23	24	22	23	24	26	23	27	27	27	26	26	

Canadian Climate Data (c)1994 Environment Canada

MONT LAURIER, QUE (46°34'N 75°33'W, 244m, 1963 TO 1993)
 ID :7035160 , Year-Month Matrix For (1963-1990)
 Precipitation - Total Precipitation (mm)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1960													
1963	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	180.2	39.9	N
1964	102.1	36.9	65.4	49.1	72.5	71.6	85.6	105.3	61.6	47.9	101.6	144.5	944.1
1965	100.5	83.5	24.6	36.9	86.2	26.7	107.8	160.2	170.3	104.6	88.9	N	N
1966	60.7	13.2	32.5	19.6	81.8	75.3	81.9	122.3	78.1	67.4	116.6	126.7	878.1
1967	94.8	65.7	42.3	81.2	60.4	144.2	105.9	102.5	128.8	136.5	116.5	78.3	1167.1
1968	34.3	83.2	82.4	54.3	33.8	103.4	95.8	54.7	110.9	58.9	52.2	78.2	842.1
1969	49.3	27.9	37.1	95.2	106.7	105.7	102.0	79.8	110.3	84.3	110.6	81.7	990.6
1970	27.8	85.3	54.1	53.8	125.5	60.6	153.6	87.0	104.9	84.1	85.9	57.7	980.3
1971	74.2	107.8	60.7	57.2	107.1	73.2	90.7	95.7	126.9	57.5	71.4	85.3	1007.7
1972	63.8	113.1	92.6	62.9	54.8	158.2	188.0	135.6	122.8	111.2	71.4	131.6	1304.0
1973	44.3	69.6	78.0	59.2	85.2	107.3	N	185.4	52.6	66.0	48.1	97.6	N
1974	79.6	M	M	M	M	M	N	52.1	111.5	N	80.9	42.2	N
1975	N	50.2	68.8	60.4	60.5	66.6	51.9	73.2	98.4	89.4	83.3	107.5	N
1976	89.6	119.3	118.6	35.7	89.6	151.4	115.7	79.5	66.4	97.0	83.3	82.0	1128.1
1977	75.3	80.9	77.8	64.0	35.4	97.1	49.9	117.6	66.7	55.4	105.0	92.0	917.1
1978	65.7	8.9	74.6	70.1	46.5	68.5	68.5	96.8	69.0	47.6	43.3	80.2	739.7
1979	36.4	11.8	52.9	89.1	114.6	69.0	123.1	125.9	91.8	140.5	90.2	47.5	992.8
1980	50.6	14.5	48.9	92.4	65.7	58.0	111.7	97.2	183.6	132.1	54.0	56.3	966.0
1981	28.5	105.6	80.7	87.9	128.6	147.6	77.8	95.3	86.0	75.3	70.8	41.3	1026.4
1982	71.2	26.8	69.2	63.2	39.6	115.0	26.4	94.2	79.6	64.6	116.4	147.9	914.3
1983	40.6	49.4	52.6	102.3	189.6	52.6	88.5	46.1	77.2	93.1	106.2	89.4	987.6
1984	43.2	68.2	40.2	94.7	170.0	113.2	170.6	152.3	63.9	60.5	113.8	81.7	1172.3
1985	37.8	59.8	92.2	75.0	56.4	63.8	169.0	57.2	76.8	89.2	50.4	64.3	891.9
1986	63.0	33.0	94.2	72.4	160.2	118.8	N	106.5	105.8	83.8	N	M	N
1987	M	M	M	M	N	101.2	104.6	120.0	105.6	110.4	92.9	73.7	N
1988	61.5	N	N	90.7	67.4	74.4	72.8	157.6	98.6	160.1	M	M	N
1989	M	M	M	M	M	M	N	88.8	138.0	113.2	N	54.0	N
1990	97.4	55.4	32.4	63.2	53.8	122.0	92.0	51.8	93.0	146.8	128.1	90.4	1026.3
mean	62.2	69.6	64.0	67.9	87.2	93.8	101.4	101.4	99.2	91.4	90.6	83.0	1001.6
No.Yrs	24	23	23	24	24	26	23	27	27	26	26	26	

ANNEXE B

**DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES ÉCHANTILLONS ET LEUR
LOCALISATION DANS LES SITES**

LAIT DE LUNE

# ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
OUR 1-A	où: fissure dans le mur hauteur: ≈ 1.5 m du sol pente: 43° substrat: roche mère qui semble un peu altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 3 cm état: ± sec, poudreux, contient plusieurs débris organiques
OUR 2-A	où: fissure dans le mur hauteur: ≈ 1,5 m du sol pente: ≈ 5° substrat: roche mère qui semble altérée	type: remplissage aire: ≈ 20 cm ² épaisseur: ≈ 5-10 cm état: humide, très pâteux
OUR 3-A	où: fissure dans le mur hauteur: ≈ 10 cm du plancher pente: 7° substrat: sédiment de remplissage	type: remplissage aire: ≈ 15 cm ² épaisseur: ≈ 35 cm état: très humide, pâteux et stratifié
OUR 4-A	où: balcon dans le mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 20° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: remplissage aire: ≈ 50 cm ² épaisseur: 10-25 cm état: très dur, surface très humide
OUR 4-B	où: balcon dans le mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 5° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: remplissage aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: 10 cm état: pâteux très humide.
OUR 4-D	où: balcon dans le mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 5° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: remplissage aire: ≈ 10 cm ² épaisseur: 5-10 cm état: sableux très humide
OUR 6-A	où: arche au plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: ≈ 135° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 30 cm ² épaisseur: ≈ 5-20 cm état: très humide et pâteux
OUR 6-B	où: arche au plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: 180° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 40 cm ² épaisseur: ≈ 20-25 cm état: très humide et pâteux
OUR 6-C	où: arche au plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: ≈ 120° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 30 cm ² épaisseur: ≈ 5-15 cm état: très humide et pâteux
OUR 6-D	où: plafond hauteur: ≈ 2.5 m du sol pente: 180 ° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 5-20 cm état: très humide et pâteux

# ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
WSO 1-A	où: mur hauteur: ≈ 10 cm du sol pente: 90 ° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 75 cm ² épaisseur: ≈ 10 cm état: sec et poudreux
WSO 2-A	où: jonction du plafond et du mur hauteur: ≈ 75 cm du sol pente: ≈ 110° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 10 cm état: sec et poudreux
WSO 3-A	où: mur hauteur: du sol jusqu'au plafond pente: variant entre 70° et 90° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: enrobage aire: ≈ 5 m ² épaisseur: ≈ 0.5-5 cm état: très humide, pâteux et recouvrant quelques racines
WSO 4-A	où: plancher hauteur: — pente: ≈ 10° substrat: remplissage	type: remplissage aire: ≈ 2 m ² épaisseur: indéterminée état: stratifié et très humide
WSO 5-B	où: base du mur, au-dessus d'un balcon hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: variant de 100° à 135 ° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: pendentif aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 20 cm état: stratifié, très humide et pâteux.
MOUL 1-A	où: tablette au plafond hauteur: ≈ 2.5 m du sol pente: ≈ 0° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: remplissage aire: ≈ 20 cm ² épaisseur: ≈ 15 cm état: sec et poudreux, contenant plusieurs petites racines
MOUL 1-B	où: tablette au plafond hauteur: ≈ 2.5 m du plancher pente: ≈ 0 ° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: remplissage aire: ≈ 30 cm ² épaisseur: ≈ 10 cm état: sec et poudreux, contenant quelques petites racines
MOUL 1-C	où: plafond, sous la tablette hauteur: ≈ 2.5 m du sol pente: variant de 90° à 160° substrat: inclusion dénudée très noire	type: coulée simple en chou-fleur aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 5 cm état: humide et pâteux
MOUL 2-A	où: tablette au plafond hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 0° substrat: roche mère qui semble altérée	type: remplissage aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 5 cm état: très sec et poudreux, sert de base à des botryoïdes
MOUL 3-A	où: plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: ≈ 160° substrat: roche mère qui semble altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 10 cm ² épaisseur: 1-5 cm état: sec, poudreux et contenant beaucoup de racines
MKZI 1-A	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 90° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 50 cm ² épaisseur: 1-5 cm état: sec et poudreux

#ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
MKZI 2-A	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 115° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée simple lisse aire: ≈ 10 cm ² épaisseur: 1-5 cm état: lisse, sec et poudreux
CASC 1-A	où: plafond hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 135° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 50 cm ² épaisseur: 0.5-3.0 cm état: humide et pâteux
PIER 1-A	où: balcon dans le mur hauteur: ≈ 1.5 m du sol pente: ≈ 10° substrat: roche mère qui semble altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 10 cm ² épaisseur: 0.5-1.0 cm état: sec et poudreux
PIER 1-B	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 90° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulée simple lisse aire: ≈ 30 cm ² épaisseur: ≈ 5 cm état: sec, très dur et recouvert d'une mousse verte
PIER 2-A	où: plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: 150° substrat: roche mère qui semble altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 20 cm ² épaisseur: 1-10 cm état: humide et pâteux
PIER 3-A	où: jonction du mur et du plafond hauteur: ≈ 4 m du sol pente: 90° substrat: roche mère qui semble altérée	type: accumulation en chou-fleur aire: ≈ 1 m ² épaisseur: ≈ 30 cm état: sec, poudreux, contenant plusieurs racines
PIER 7-A	où: plafond hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: 160° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée simple en chou-fleur aire: ≈ 20 cm ² épaisseur: ≈ 10 cm état: humide et pâteux
MINE 1-A	où: recouvrement des murs et du plafond hauteur: — pente: — substrat: roche mère qui semble altérée	type: enrobage aire: > 5 m ² épaisseur: 0.1 - 0.5 cm état: humide et pâteux
MINE 2-C	où: recouvrement du mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 90° substrat: roche mère qui semble altérée	type: enrobage aire: ≈ 20 cm ² épaisseur: 0.1 - 0.5 cm état: sec et poudreux
MINE 2-D	où: mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: 70° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulée simple en chou-fleur aire: ≈ 10 cm ² épaisseur: 1-2 cm état: sec, très dur
ÎLE 1-A	où: arche du mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: variant de 90° à 150° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulées multiples en chou-fleur aire: ≈ 25 cm ² épaisseur: ≈ 5 cm état: humide et pâteux

#ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
ÎLE 1-D	<p>où: mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: 25° substrat: roche mère qui semble altérée</p>	<p>type: coulée simple en chou-fleur aire: ≈ 25 cm² épaisseur: ≈ 2 cm état: ± humide, assez dur</p>
ÎLE 2-A	<p>où: balcon hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: 18° substrat: roche mère qui semble non altérée</p>	<p>type: coulée simple lisse aire: ≈ 50 cm² épaisseur: ≈ 1-3 cm état: humide et pâteux</p>
MOKI 1-A	<p>où: plafond hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 115° substrat: roche mère qui semble non altérée</p>	<p>type: coulées multiples en chou-fleur aire: ≈ 2.0 m² épaisseur: ≈ 10 cm état: sec, poudreux et cassant</p>
MOKI 2-A	<p>où: mur hauteur: indéterminée pente: 130° substrat: roche mère qui semble non altérée</p>	<p>type: coulées multiples en chou-fleur aire: > 5 m² épaisseur: ≈ 10 cm état: ± sec, très dur avec une surface plutôt poudreuse</p>

BOTRYOÏDES

#ÉCHANT.	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
OUR 5-A	où: mur hauteur: ≈ 0.1 à 0.5 m du sol pente: ≈ 90° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: boutons simples distribution: homogène à ± 0.2-1.0 cm aire: ≈ 2.0 m ² hauteur: 0.1-1.0 cm largeur: 0.1-2.0 cm
OUR 5-B	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 90° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: champignons gobelets distribution: bouquets compacts aire: ≈ 1.0 m ² hauteur: 0.5-1.0 cm largeur: 0.1-0.3 cm
MOUL 2-B	où: balcon au haut du mur hauteur: ≈ 1.5 m du sol pente: ≈ 0° substrat: lait de lune	type: coraux primitifs et moyens distribution: bouquets compacts aire: ≈ (2 x 5 cm) 10 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm largeur: 0.1-0.2 cm
CASC 1-B	où: plancher hauteur: 0 m du sol pente: ≈ 0° substrat: gros bloc d'un éboulis	type: champignons et boutons; simples et composés distribution: bouquets épars et quelques uns isolés aire: ≈ (5x10 cm) 50 cm ² hauteur: 1-2 cm et 0.5-1.0 cm largeur: 0.5-1.0 cm et 0.1-0.3 cm
PIER 1-C	où: balcon ≈ 1 m par 2 m hauteur: ≈ 1 m du sol pente: ≈ 60° substrat: gros bloc d'un éboulis	type: coraux matures distribution: bouquets épars aire: ≈ (2x5 cm) 10 cm ² hauteur: 0.5-2.0 cm largeur: 0.5-1.0 cm
PIER 5-B	où: sur le rempart d'un balcon hauteur: ≈ 1 m du sol pente: ≈ 40° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: champignons; simples et composés distribution: homogène à ± 1.0-5.0 cm aire: ≈ 500 cm ² hauteur: 0.5-1.5 cm largeur: 0.1-0.3 cm
PIER 5-C	où: sur le rempart d'un balcon hauteur: ≈ 1 m du sol pente: ≈ 20° substrat: roche mère	type: champignons; simples et composés distribution: homogène à ± 1.0-5.0 cm aire: ≈ 450 cm ² hauteur: 0.5-1.5 cm largeur: 0.1-0.3 cm
PIER 6-A	où: mur, entourant des coulées de micro-gours hauteur: ≈ 0.05 à 0.5 m du sol pente: ≈ 65° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: champignons et boutons; simples et composés distribution: homogène à ± 1.0-2.0 cm aire: ≈ 50 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm et 0.2-0.5 cm largeur: 0.5-1.5 cm et 0.2-0.5 cm
MINE 1-B	où: draperie sur l'arche du plafond hauteur: ≈ 2.0 m du sol pente: ≈ 120° substrat: mince croûte de calcite recouvrant la roche mère qui semble non altérée	type: coraux primitifs distribution: petits groupes épars à une distance ≈ 5.0 cm aire: groupes variant de 2-4 cm ² sur une surface ≈ 30 cm ² hauteur: 0.1-1.0 cm largeur: 0.1-0.5 cm
MINE 2-A	où: mur hauteur: ≈ 1.5 m du sol pente: ≈ 90° substrat: draperie de lait de lune	type: coraux; moyens et matures, et boutons simples distribution: isolés rares aire: ≈ 1-2 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm et 0.1-0.2 cm largeur: 0.2-0.5 cm et 0.1-0.2 cm

# ÉCHANT.	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
MINE 2-B	où: fissure dans le mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 45° substrat: draperie recouverte d'une mince couche de lait de lune	type: boutons composés distribution: homogène à ± 0.1-0.2 cm aire: ≈ 25 cm ² hauteur: 0.1-0.3 cm largeur: 0.1-0.2 cm
MINE 2-E	où: fissure dans le mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: ≈ 45° substrat: draperie recouverte d'une mince couche de lait de lune	type: boutons simples distribution: très dense aire: ≈ 10 cm ² hauteur: 0.1-0.2 cm largeur: 0.1-0.3 cm
MINE 2-F	où: mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: ≈ 90° substrat: roche mère recouverte d'une mince couche de lait de lune	type: coraux matures distribution: homogène à ± 1.0-2.0 cm aire: ≈ 40 cm ² hauteur: 2-5 cm largeur: 1-3 cm
MINE 2-G	où: mur hauteur: ≈ 2 m pente: ≈ 90° substrat: draperie recouverte de lait de lune	type: champignons et boutons; simples et composés distribution: petits groupes épars aire: ≈ (4x6 cm) 24 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm et 0.1-0.2 cm largeur: 0.5-1.5 cm et 0.1-0.2 cm
MINE 3-A	où: plafond hauteur: ≈ 2.5 m du sol pente: ≈ 130° substrat: roche mère recouverte d'une mince couche de lait de lune	type: boutons simples distribution: homogène à ± 0.1-0.2 cm aire: ≈ 100 cm ² hauteur: 0.1 cm largeur: 0.1-0.2 cm
WSO 1-B	où: mur hauteur: ≈ 0.1 m du sol pente: ≈ 100° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coraux matures distribution: homogène à ± 0.5 cm aire: ≈ 60 cm ² hauteur: 1-2.5 cm largeur: 0.5-1.0 cm
WSO 5-A	où: mur hauteur: ≈ 1.5 m du sol pente: ≈ 90° substrat: pendentif de lait de lune ≈ 20 cm, recouvert d'une croûte de calcaire	type: boutons simples distribution: isolés, rares aire: ≈ 1 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm largeur: 0.5-1.0 cm
ÎLE 1-B	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 110° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: champignons simples distribution: homogène à ± 0.5 cm aire: ≈ 10 cm ² hauteur: 0.5-1.0 cm largeur: 0.1-1.0 cm
ÎLE 2-C	où: balcon hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 18° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: champignons et boutons; simples distribution: isolés, épars aire: ≈ 1 cm ² hauteur: 0.1-1.0 cm et 0.1-0.5 cm largeur: 0.1-1.0 cm et 0.1-0.5 cm
ÎLE 2-D	où: balcon hauteur: ≈ 1.0 m pente: ≈ 10° substrat: gros blocs	type: boutons simples distribution: rares aire: ≈ 1 cm ² hauteur: 0.1-1.0 cm largeur: 0.1-0.3 cm

# ÉCHANT.	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
MKZI 2-B	où: plafond hauteur: ≈ 1.5 m pente: ≈ 185° substrat: roche mère qui semble altérée	type: boutons simples distribution: très dense aire: ≈ 10 cm ² hauteur: 0.1-0.5 cm largeur: 0.1-1.0 cm
MOKI 1-B	où: plafond hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: ≈ 115° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coraux primitifs distribution: homogène à ± 0.1-0.5 cm aire: ≈ 1.0 m ² hauteur: 0.5-1.0 cm largeur: 0.5-1.0 cm

MICRO-GOURS

# ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
OUR 4-C	où: balcon dans le mur hauteur: ≈ 1,0 m du sol pente: ≈ 20° substrat: lait de lune sec et durci	type: coulée complexe aire: ≈ 10 cm ² dimensions: largeur: 0.5 cm; longueur: 0.5 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent actifs
WSO3 3-B	où: mur hauteur: du plancher jusqu'au plafond pente: variant de 65° à 85° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée simple aire: variant de 10 cm à ≈ 45 cm de long par ≈ 5-10 cm de large dimensions: largeur: 1.5 cm; longueur: 0.5 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent inactifs
WSO3 6-A	où: plancher hauteur: — pente: ≈ 15° substrat: remplissage	type: coulée complexe aire: ≈ 1.0 m ² dimensions: largeur: 3.5 cm; longueur: 2.5 cm; profondeur: 1.0 cm état: semblent actifs
WSO3 7-A	où: rebords d'un balcon hauteur: du sol jusqu'à ≈ 0.5 m du sol pente: variant de 0° à 80° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée complexe aire: > 5 m ² dimensions: largeur: 5.0 cm; longueur: 2.0 cm; profondeur: 1.5 cm état: semblent actifs
WSO3 8-A	où: monticule près du mur hauteur: du sol jusqu'à ≈ 0.3 m du sol pente: variant de 0° à 90° substrat: semble être un stalagmite	type: coulée complexe aire: ≈ 2 m ² dimensions: largeur: 5.0 cm; longueur: 2.5 cm; profondeur: 1.0 cm état: semblent actifs
MOUL 1-D	où: mur hauteur: ≈ 30 cm jusqu'à ≈ 1.0 m pente: 45° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée multiple aire: ≈ 1.0 m ² dimensions: largeur: 1.5 cm; longueur: 1.0 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent inactifs
MKZI 2-C	où: plafond hauteur: ≈ 1.5 m pente: ≈ 135° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulée simple aire: ≈ 10 cm ² dimensions: largeur: 0.5 cm; longueur: 0.5 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent inactifs
PIER 4-A	où: mur hauteur: ≈ 1.0 m jusqu'à ≈ 1.5 m pente: 95° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulée multiple aire: ≈ 1.0 m ² dimensions: largeur: 1.5 cm; longueur: 1.0 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent actifs
PIER 6-B	où: mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: ≈ 45° substrat: roche mère qui semble altérée	type: coulée complexe aire: 50 cm ² dimensions: largeur: 2.0 cm; longueur: 1.0 cm; profondeur: 0.5 cm état: semblent actifs
ÎLE 1-C	où: mur hauteur: ≈ 0.5 m du sol pente: 90° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée multiple aire: ≈ 10-20 cm ² dimensions: largeur: 2.0 cm; longueur: 1.0 cm; profondeur: — état: très lisses, mais semblent tout de même actifs

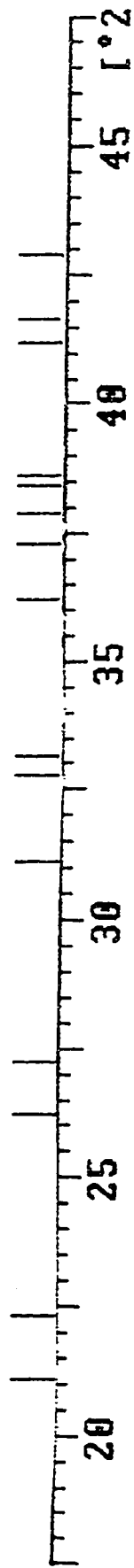
# ÉCHANTILLON	LOCALISATION	CARACTÉRISTIQUES
ÎLE 2-B	où: plancher d'un balcon hauteur: ≈ 1.0 m du sol pente: 18° substrat: roche mère qui semble non altérée	type: coulée complexe aire: ≈ 2.0 m ² dimensions: largeur: 5.0 cm; longueur: 3.0 cm; profondeur: 0.2 cm état: semblent actifs
LAFLÈCHE 1-A	où: plancher hauteur: — pente: ≈ 10° substrat: remplissage	type: coulée complexe aire: ≈ 2.0 m ² dimensions: largeur: 6.0 cm; longueur: 4.0 cm; profondeur: 2.0 cm état: semblent inactifs et ont été très altérés par endroits

ANNEXE C

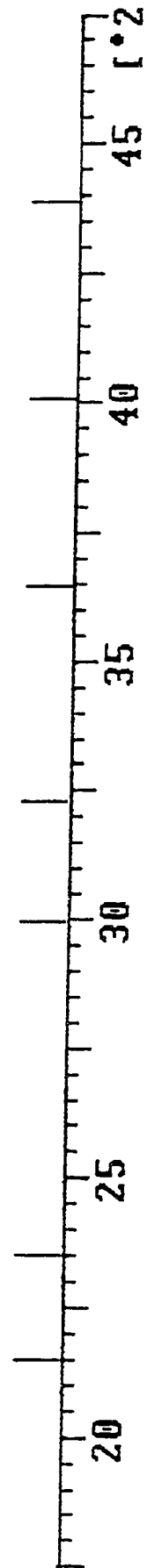
SPECTRES DE DIFFRACTION AU RAYON X



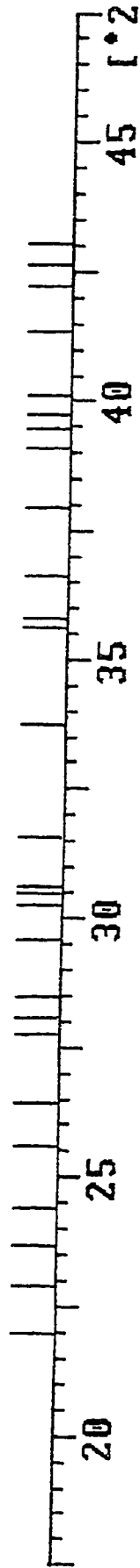
POSITION DES PICS DE LA CALCITE [CaCO₃]



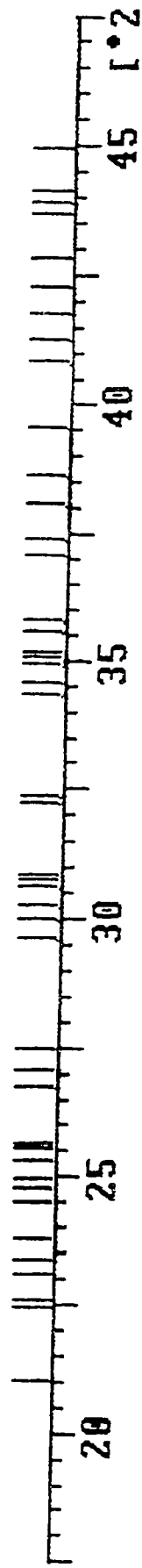
POSITION DES PICS DE L'ARAGONITE [CaCO₃]



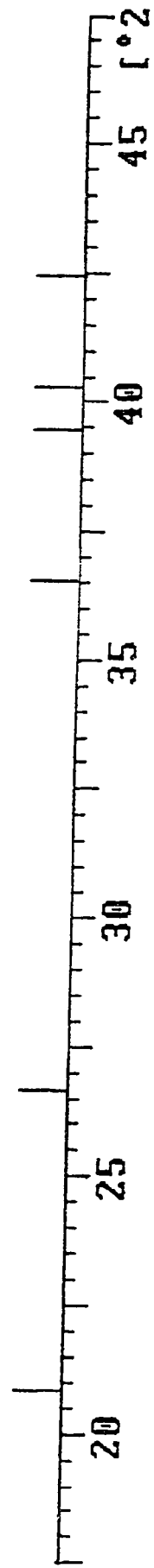
POSITION DES PICS DE LA KUTNOHORITE [Ca(Mn,Ca)(CO₃)₂]



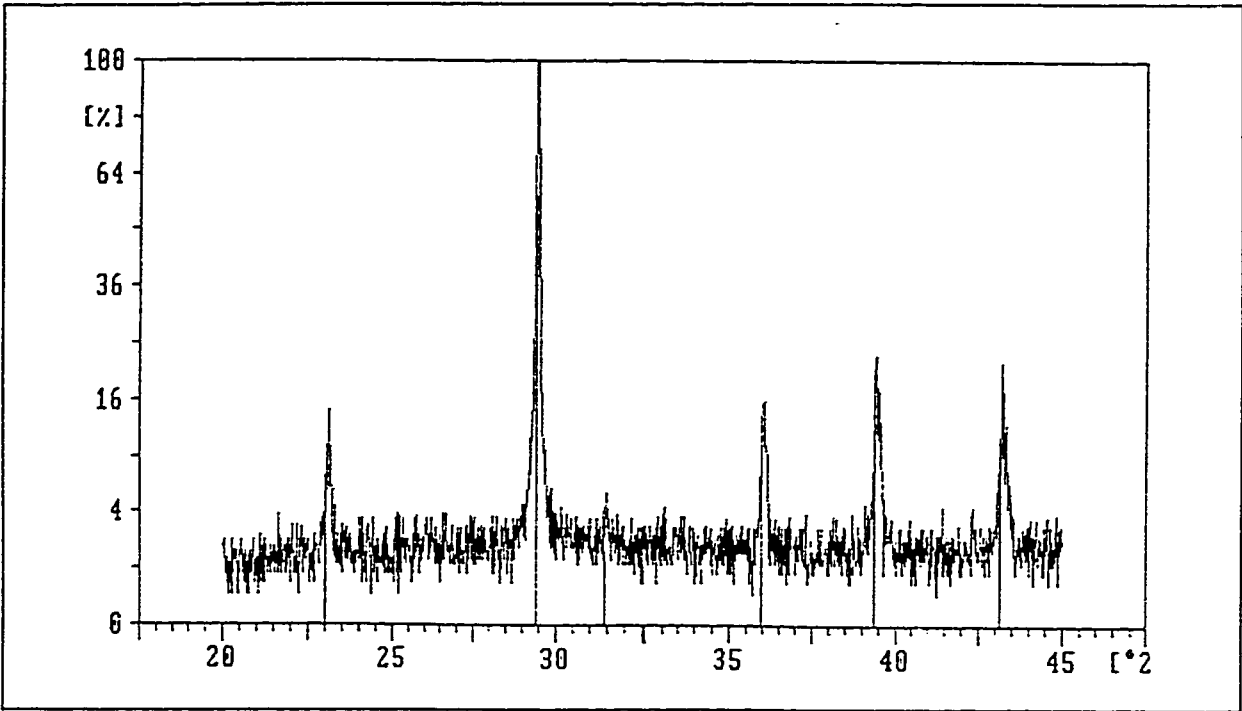
POSITION DES PICS DE L'ALBITE [NaAlSi₃O₈]



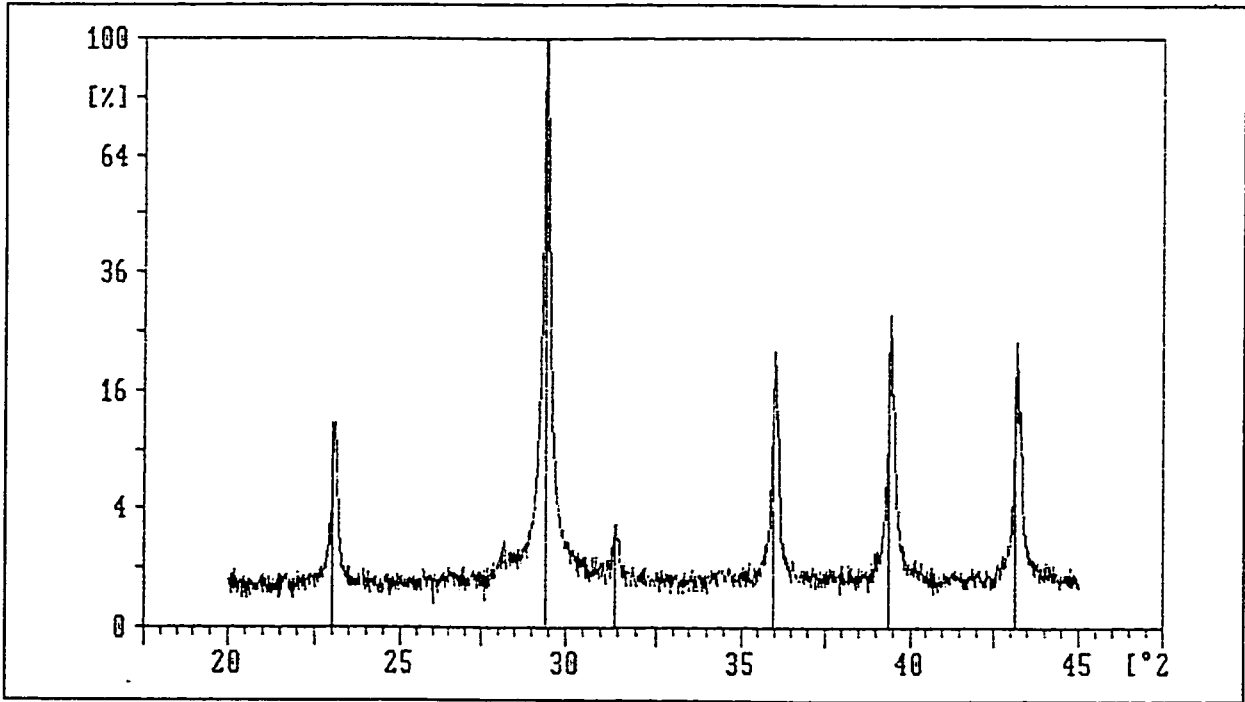
POSITION DES PICS DE LA MICROCLINE [KAlSi₃O₈]



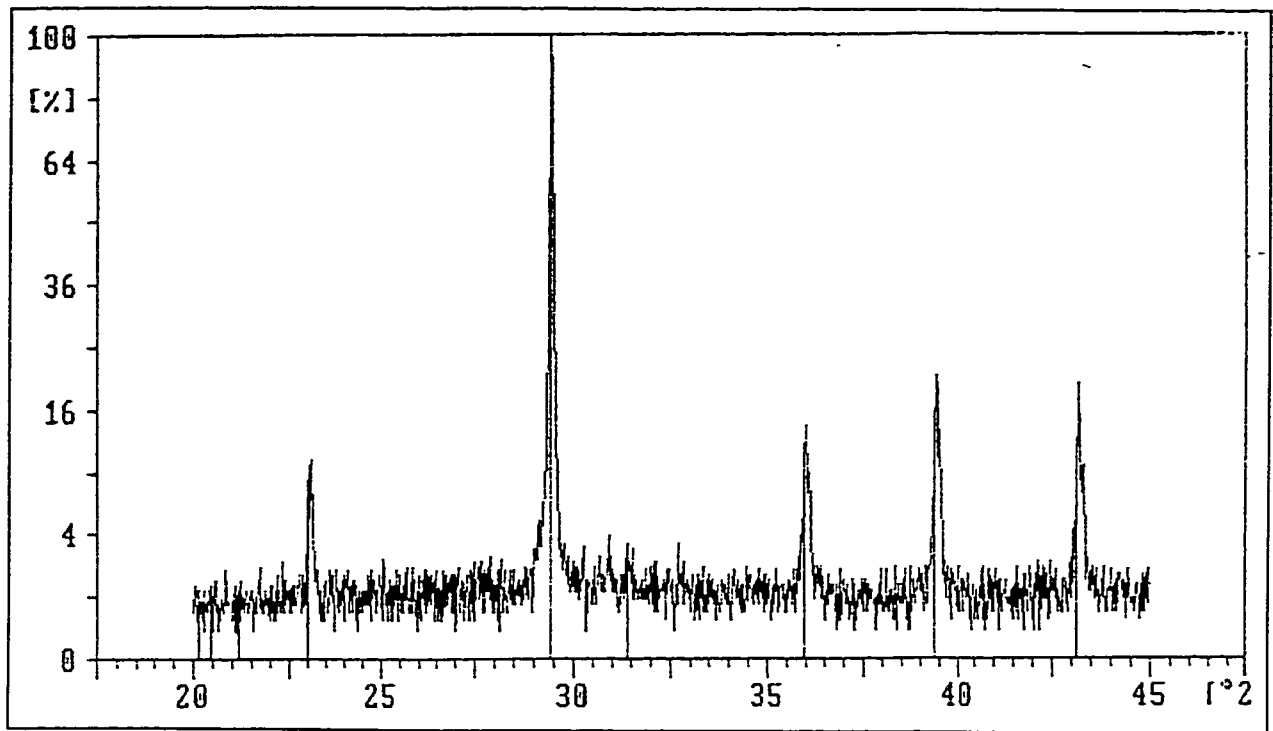
POSITION DES PICS DU QUARTZ [SiO₂]



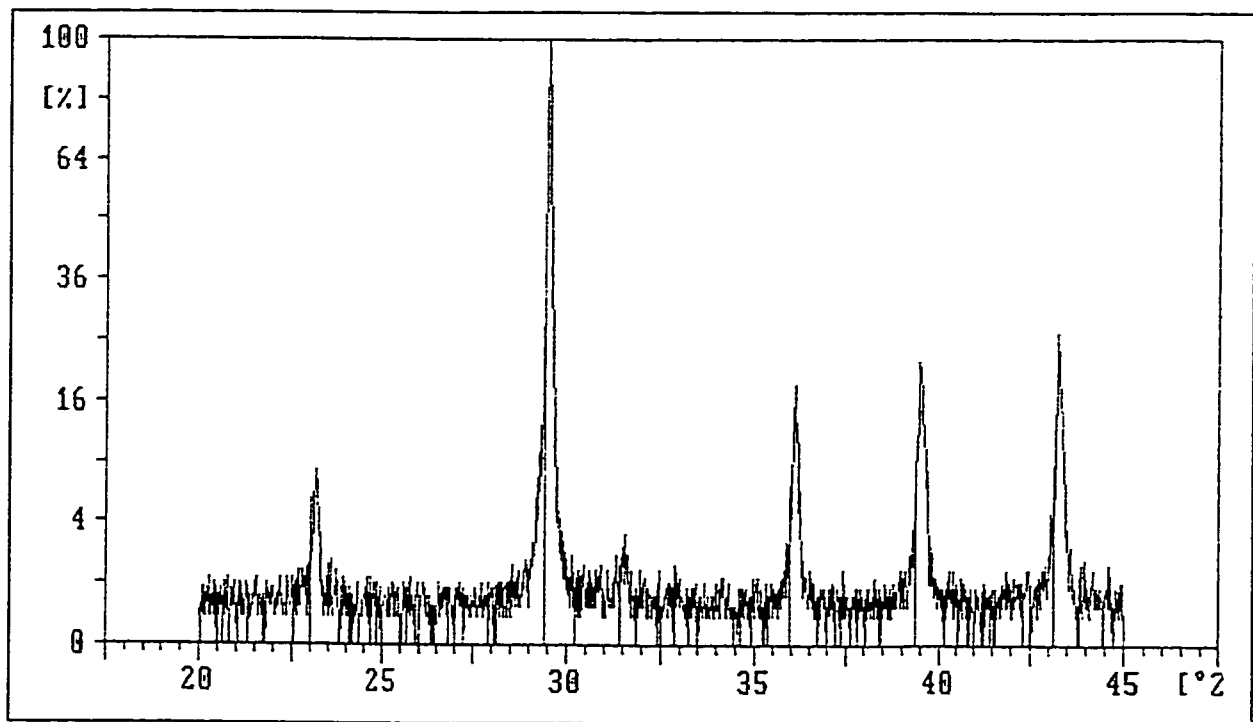
PIER 7-A: MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE, BLANCHE



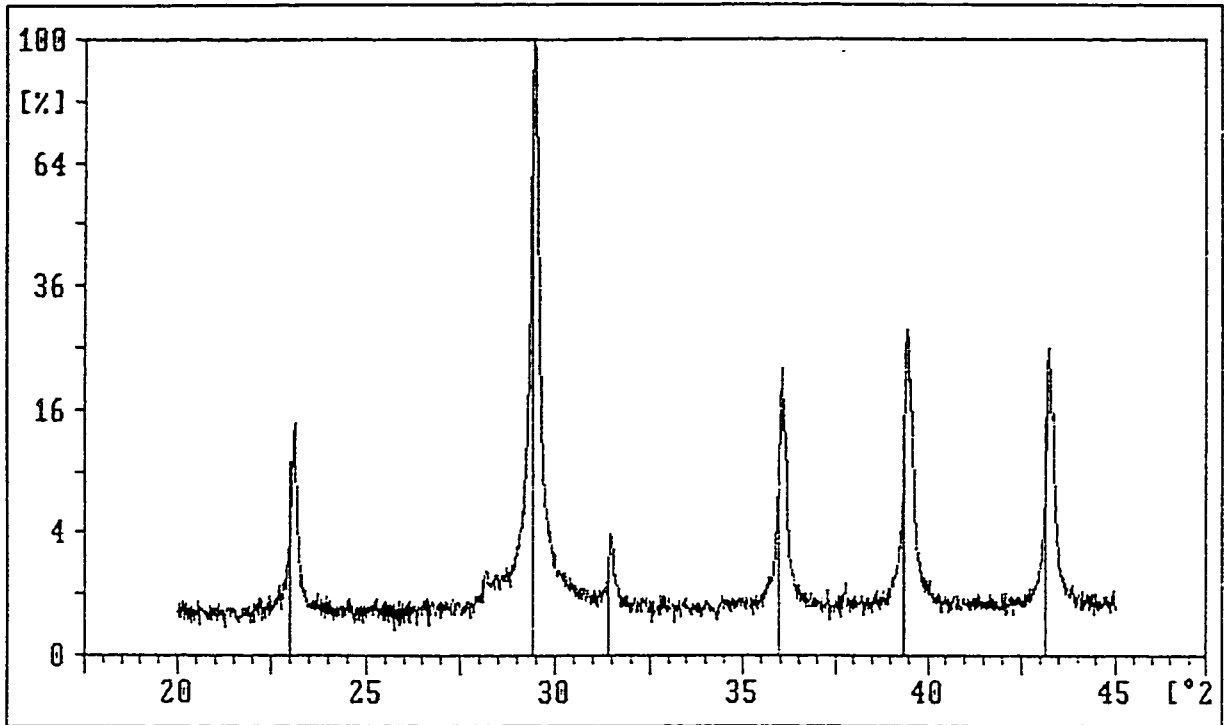
PIER 7-B: MICRO-STRUCTURE GLOBULEUSE



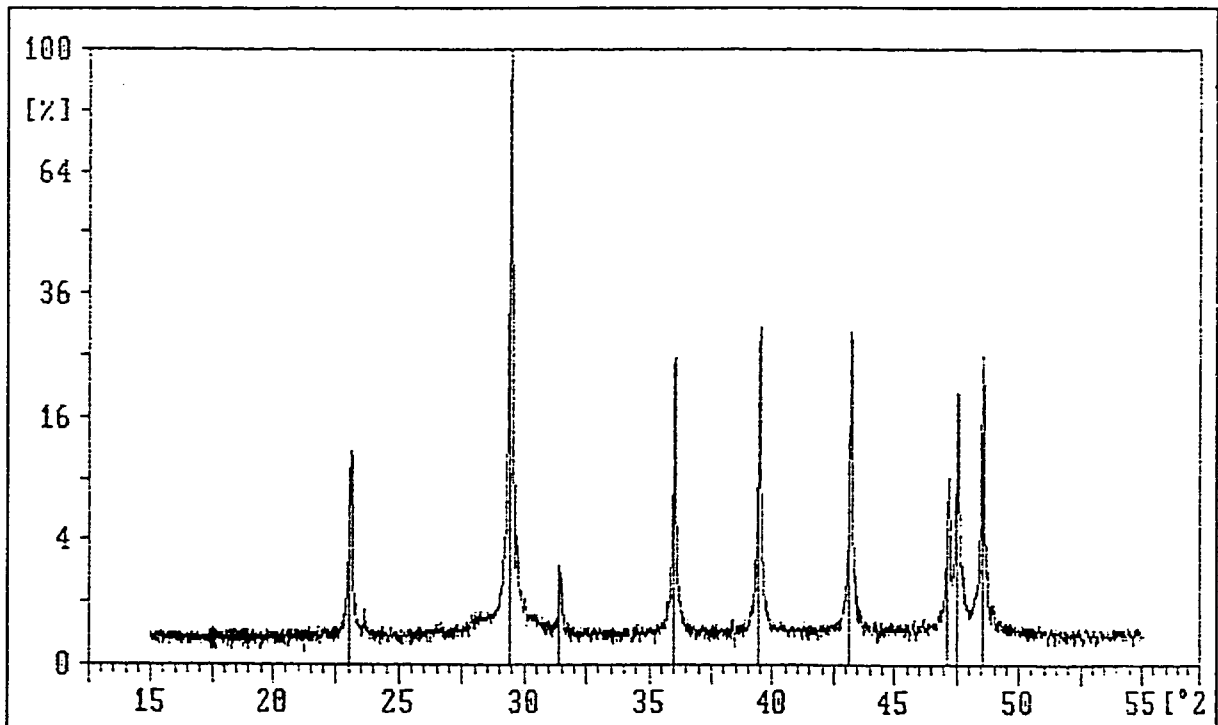
CASC 1-A: MICRO-STRUCTURE FIBREUSE, BÂTONNETS



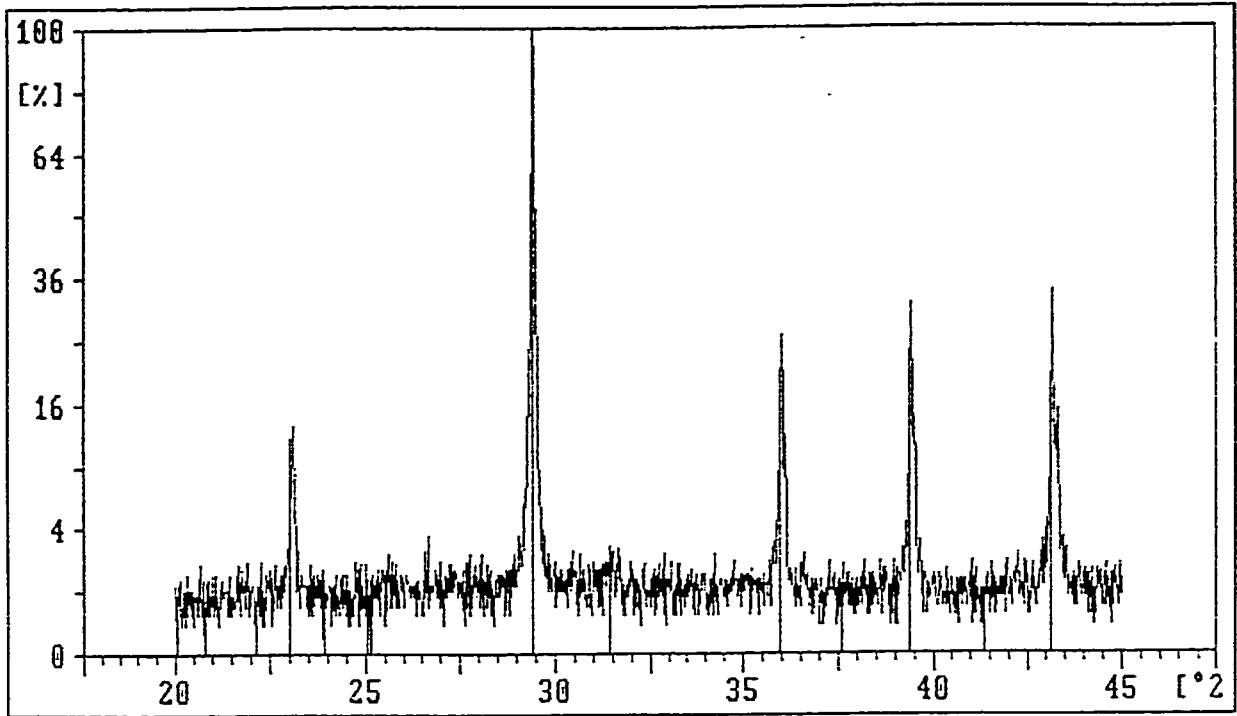
MINE 2-A: MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE, VERTE



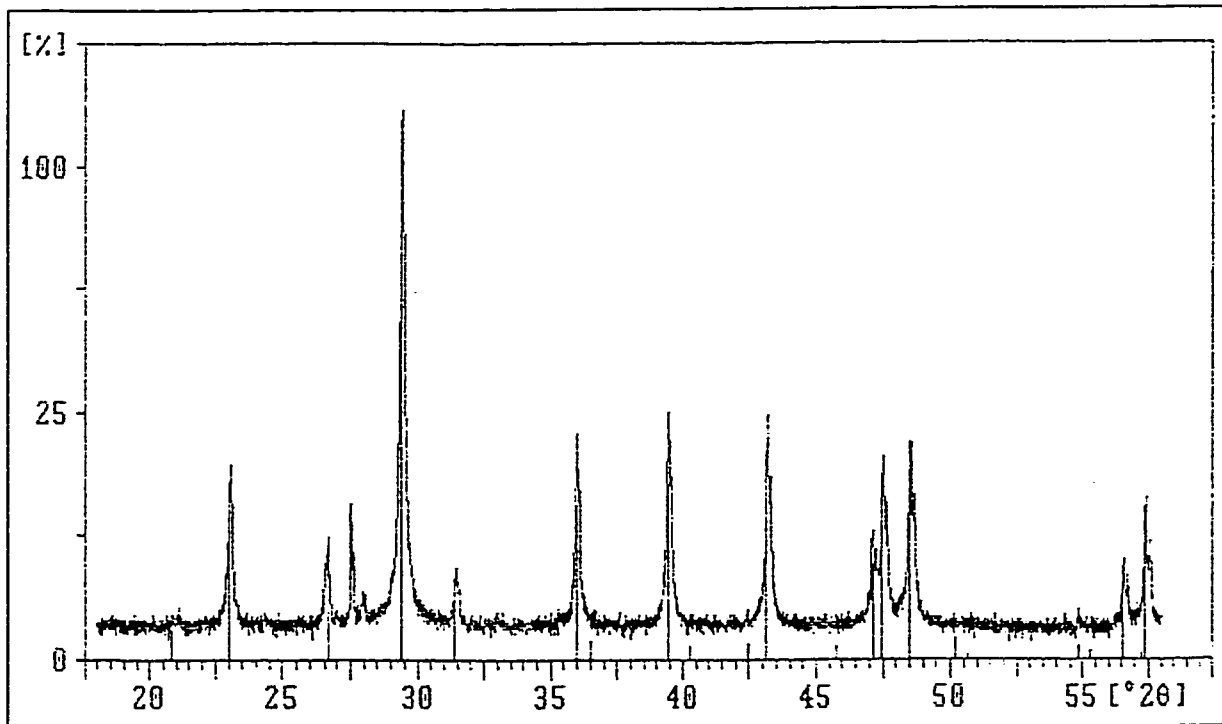
MOKI 2-A: MICRO-STRUCTURE FIBREUSE, FILAMENTS



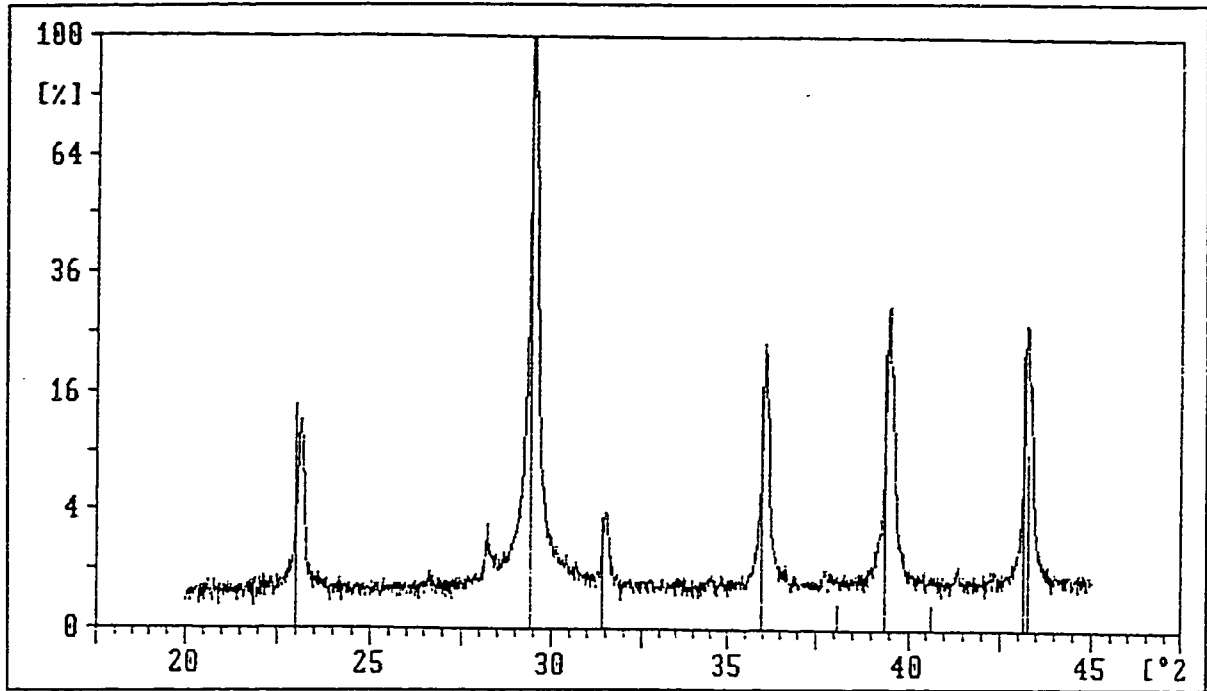
MOUL 1-D: MICRO-STRUCTURE POUDREUSE



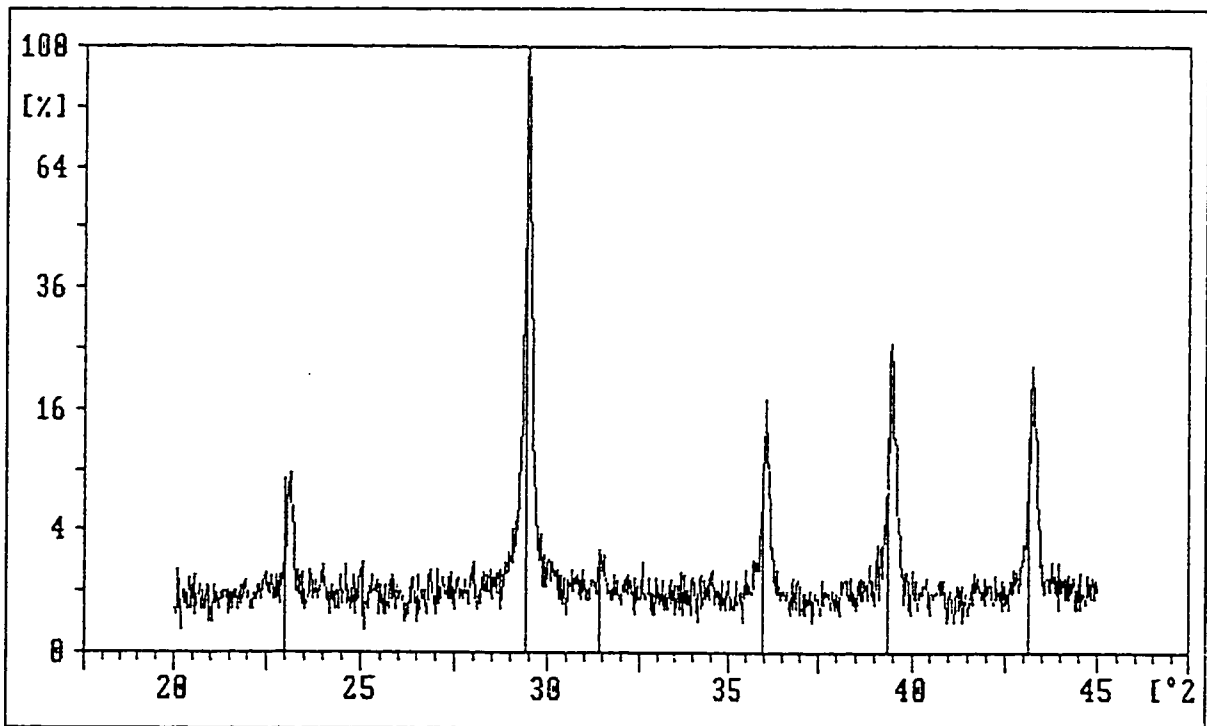
OUR 4-C: MICRO-STRUCTURE SABLEUSE TRANSLUCIDE



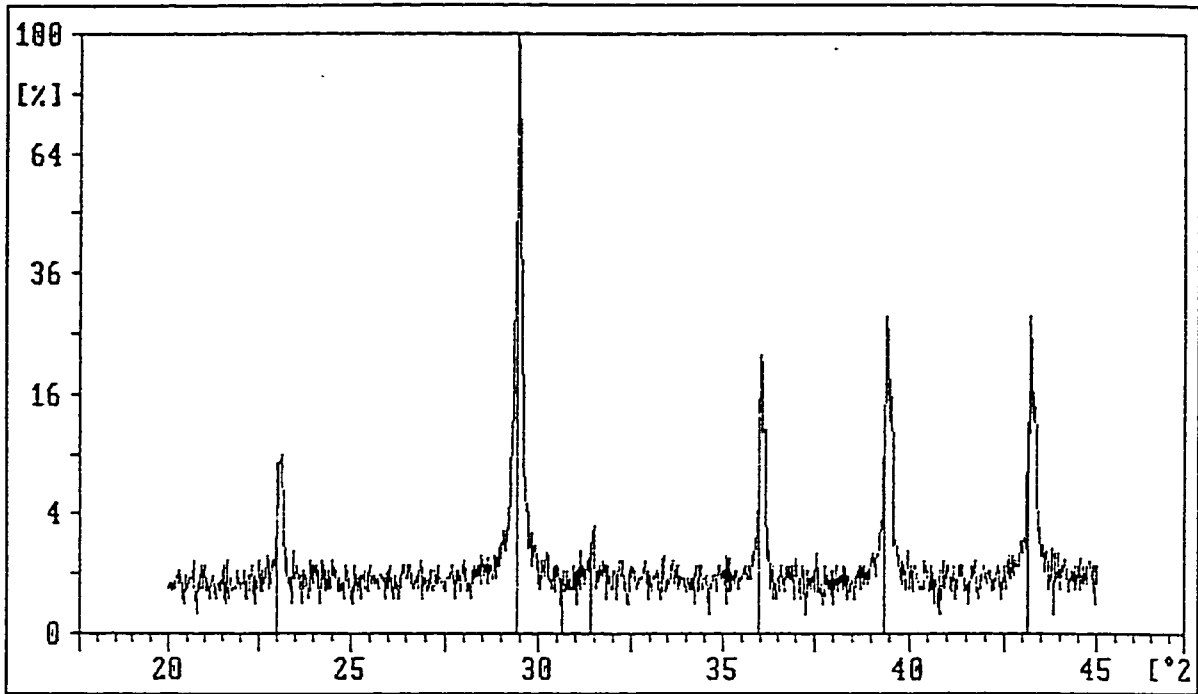
WSON 2-A: MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE, GROS PORES



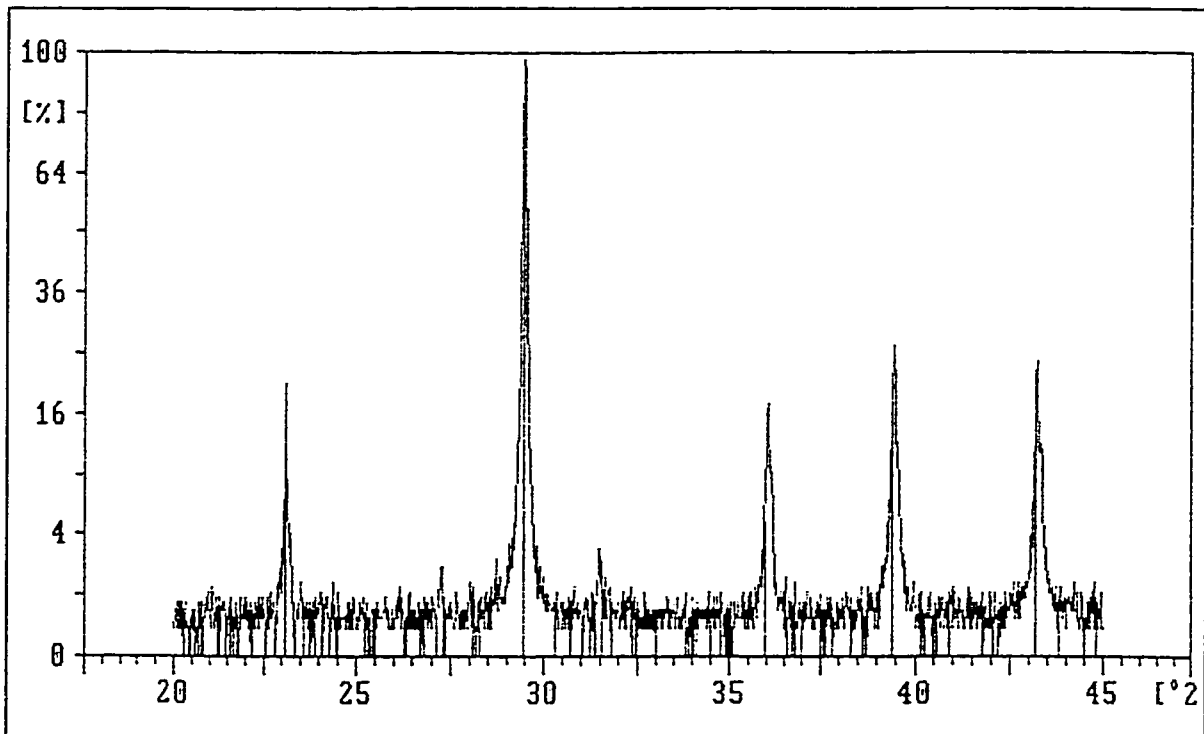
PIER 3-A: MICRO-STRUCTURE SABLEUSE



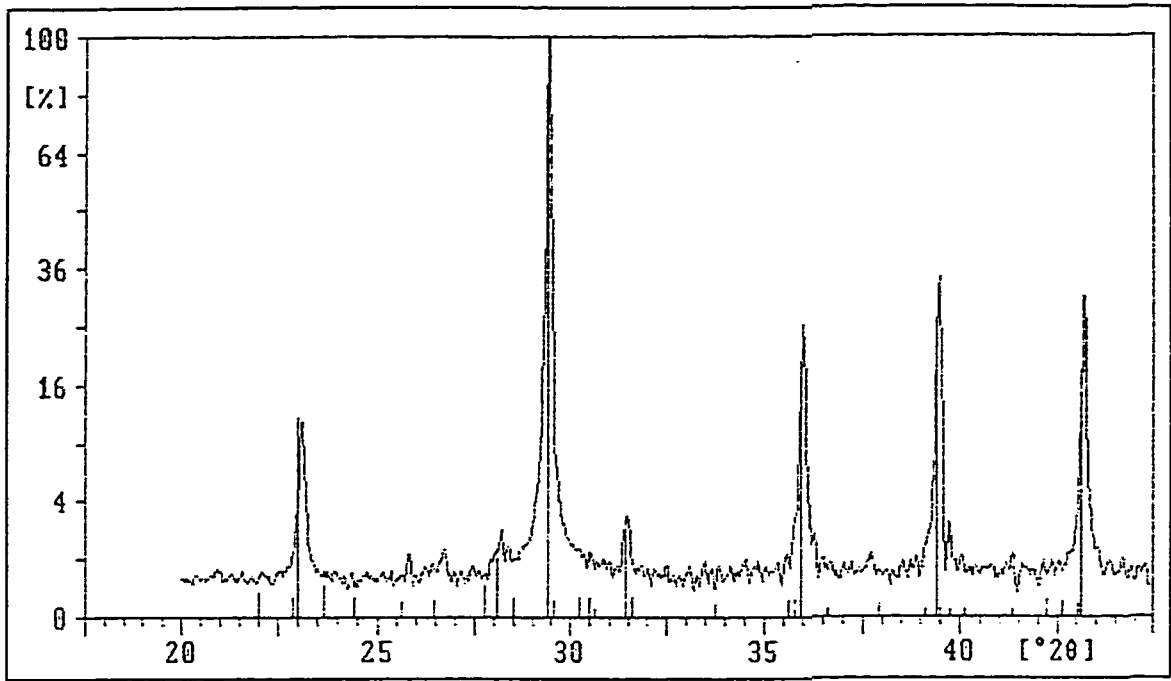
MOKI 1-A: MICRO-STRUCTURE SPONGIEUSE, PORES MINUSCULES



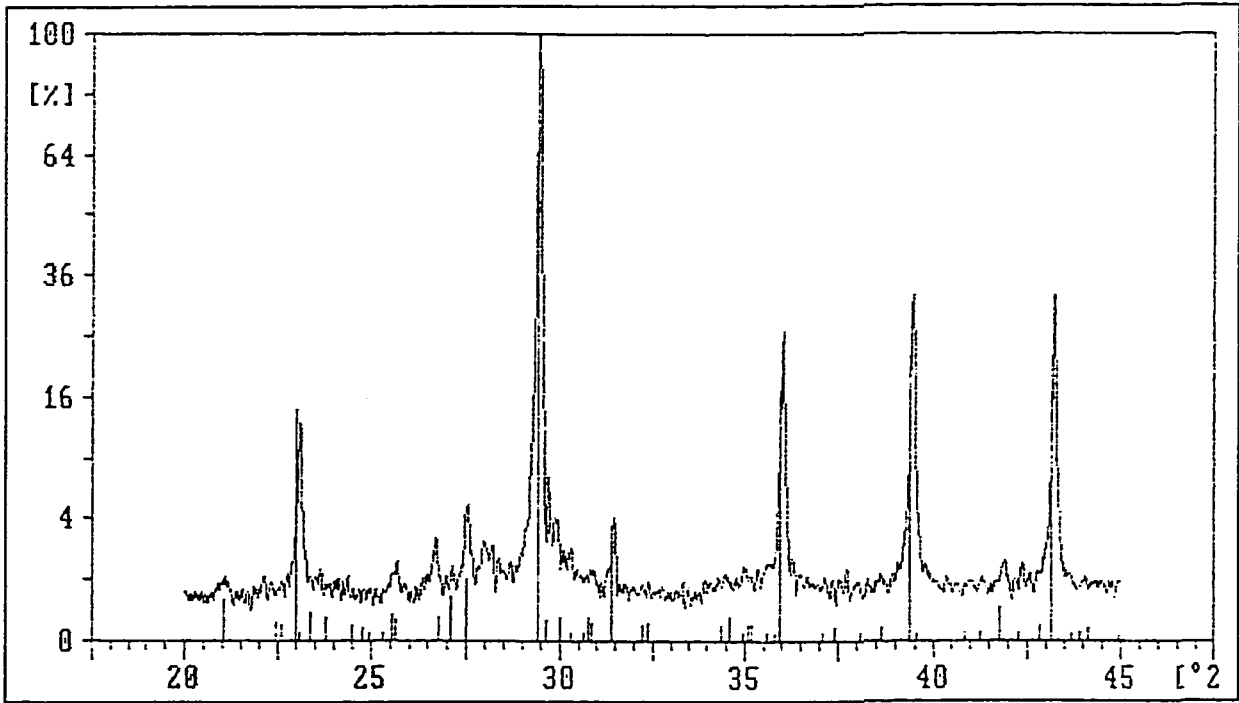
WSON 3-A: MICRO-STRUCTURE FEUILLETÉE



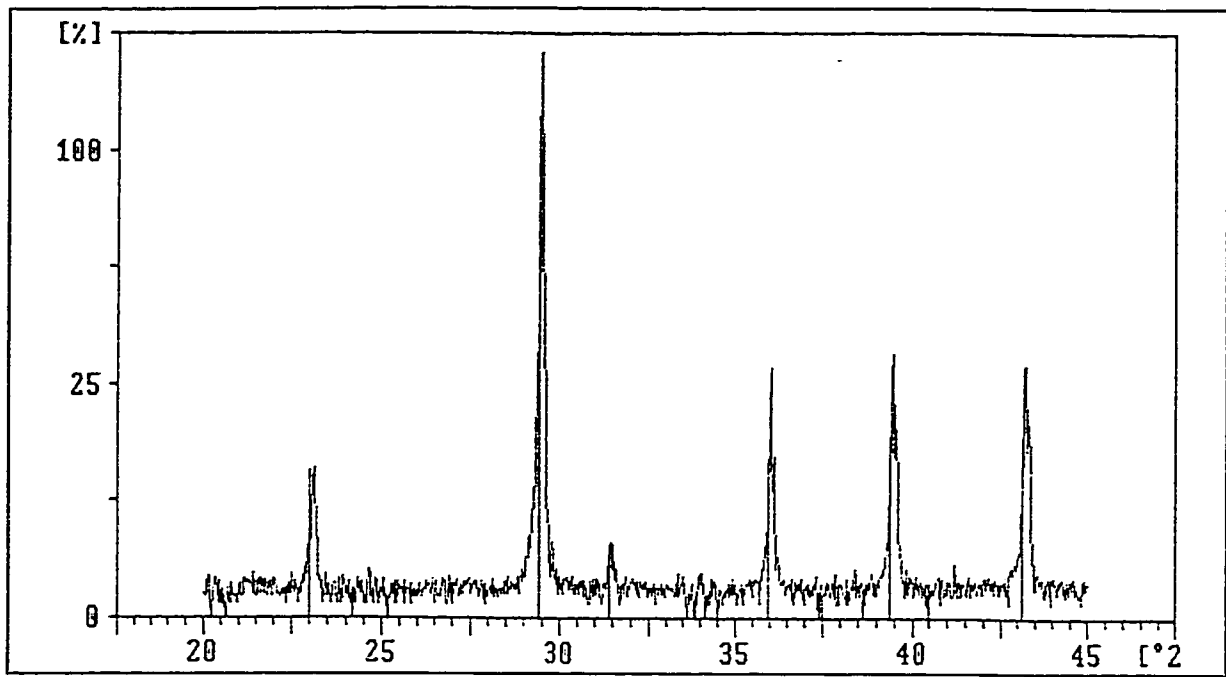
MKZI 3-A: MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE JAUNE



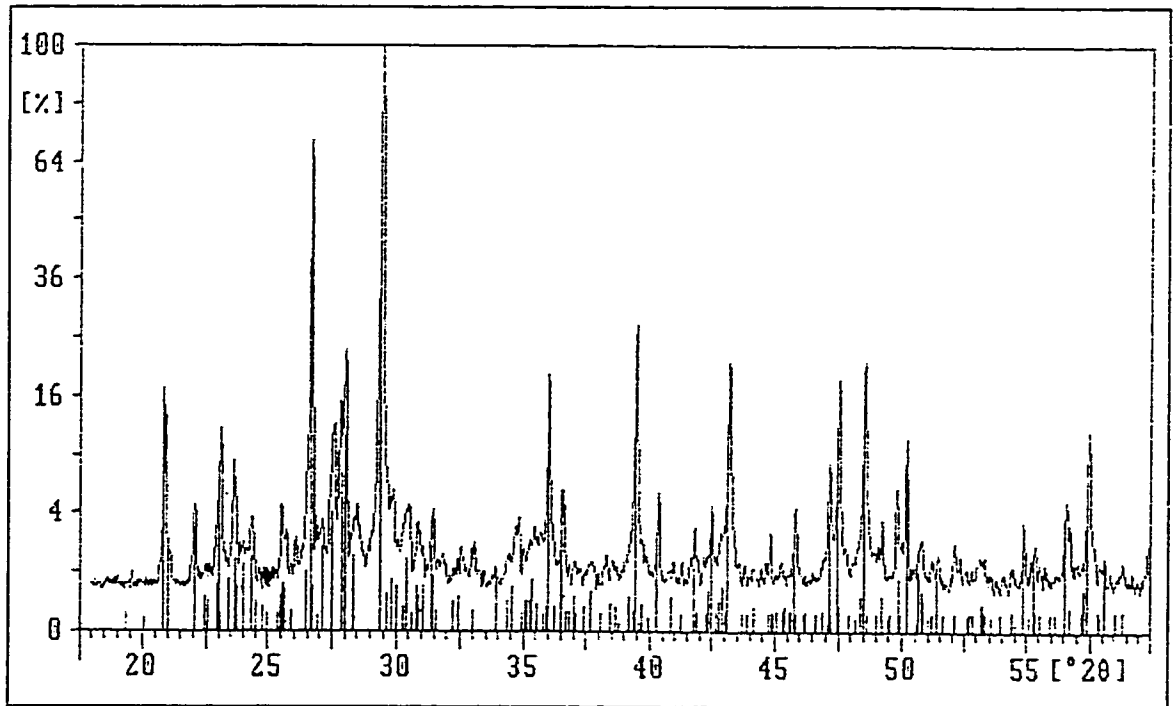
OUR 2-A: MICRO-STRUCTURE FIBREUSE, AIGUILLES



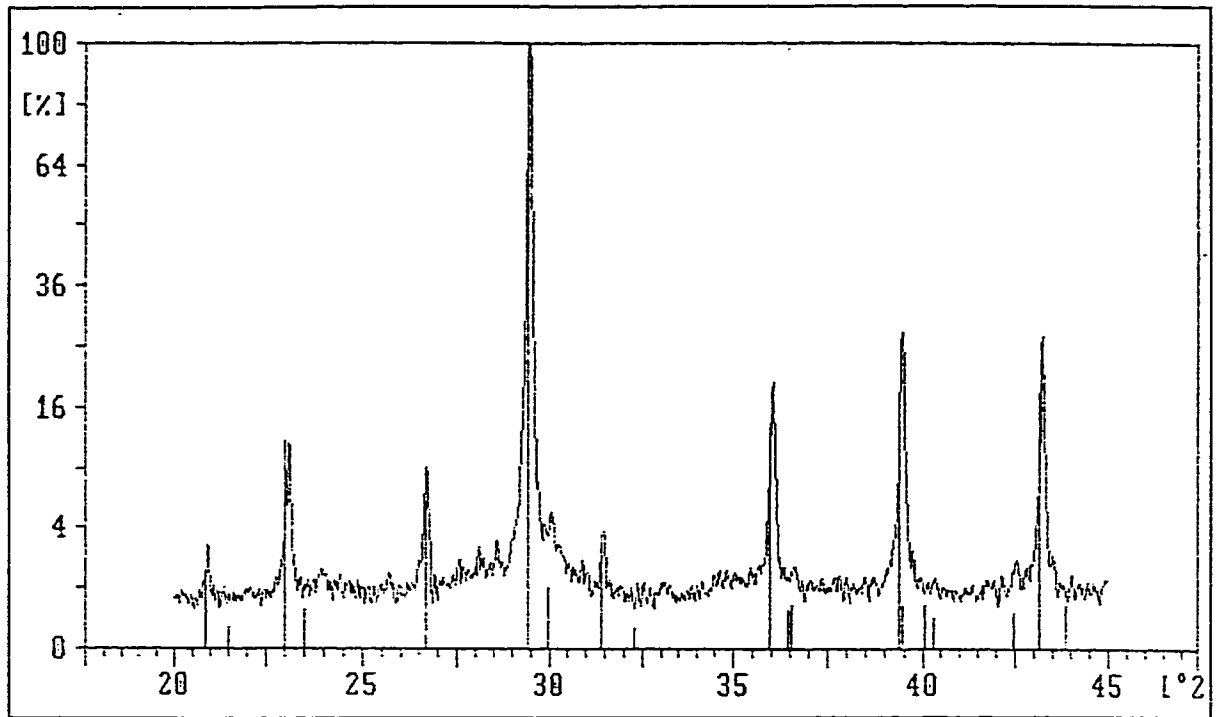
OUR 6-D: MICRO-STRUCTURE LISSE OPAQUE, BLANCHE



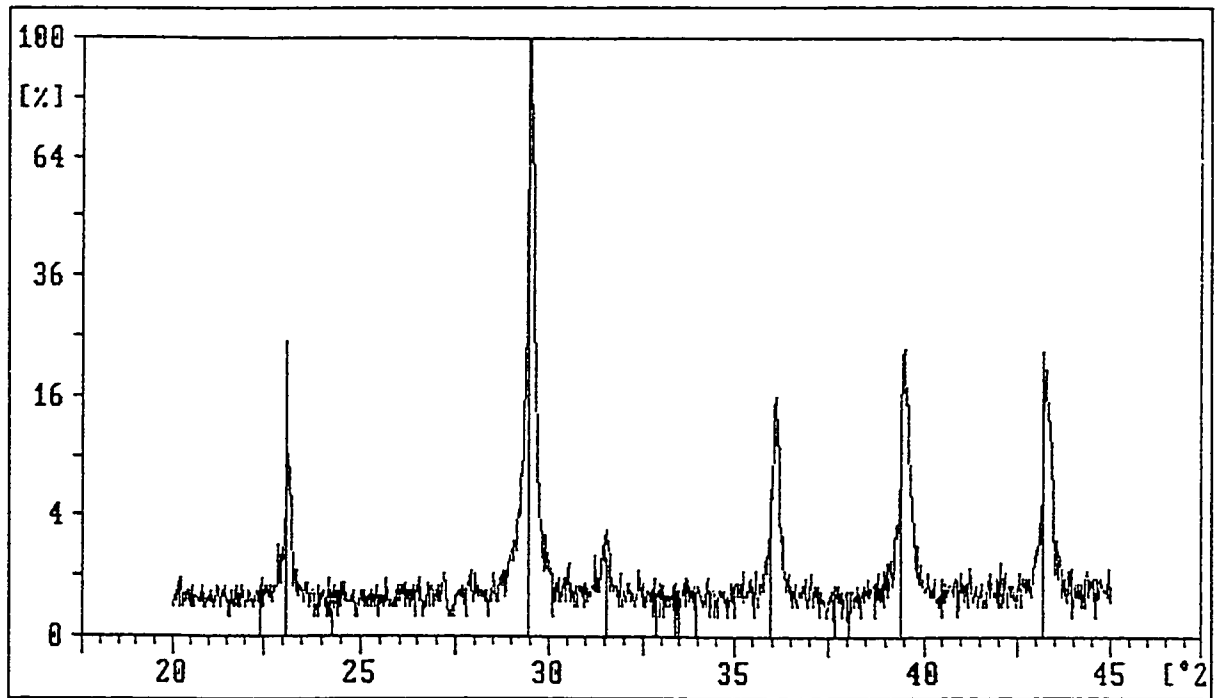
OUR 4-A: MICRO-STRUCTURE FIBREUSE, MÉLANGE D'AIGUILLES, DE BÂTONNETS ET DE FILAMENTS



ÎLE 2-B: MICRO-STRUCTURE SABLEUSE, DÉTRITIQUE



MOUL 1-C: MICRO-STRUCTURE POUDREUSE, TRANSLUCIDE



MINE 2-D: MICRO-STRUCTURE LISSE TRANSLUCIDE, JAUNE

ANNEXE D

**LISTE DES ÉCHANTILLONS POUR LES ANALYSES
PÉTROGRAPHIQUES**

# ÉCHANT.	TYPE DE CONCRÉTION	TYPE DE MICRO-FABRIQUE
OUR 4-D	LAIT DE LUNE: REMPLISSAGE STRATIFIÉ	1
OUR 5-A	BOTRYOÏDES: BOUTONS SIMPLES	7
OUR 6-A	LAIT DE LUNE: PENDENTIF STRATIFIÉ	6
WSO 1-B	BOTRYOÏDES: CORAUX MATURES	5
WSO 2-A	LAIT DE LUNE: PENDENTIF STRATIFIÉ	6
WSO 3-A	LAIT DE LUNE: ENROBAGE STRATIFIÉ	4
WSO 4-A	LAIT DE LUNE: REMPLISSAGE STRATIFIÉ	9
WSO 5-A	BOTRYOÏDES: BOUTONS SIMPLES	11
PIER 1-B	LAIT DE LUNE: COULÉE SIMPLE LISSE	6
PIER 2-A	LAIT DE LUNE: ACCUMULATION EN CHOU-FLEUR	5
PIER 3-A	LAIT DE LUNE: ACCUMULATION EN CHOU-FLEUR	8
PIER 5-C	BOTRYOÏDES: BOUTONS SIMPLES ET COMPOSÉS	3
MKZI 2-A	LAIT DE LUNE: COULÉES MULTIPLES EN CHOU-FLEUR	7
MKZI 3-A	LAIT DE LUNE: COULÉE SIMPLE LISSE	7
MOUL 1-B	LAIT DE LUNE: REMPLISSAGE STRATIFIÉ	1
MOUL 1-C	LAIT DE LUNE: COULÉE SIMPLE EN CHOU-FLEUR	2
MINE 2-F	BOTRYOÏDES: CORAUX MATURES	5
MINE 2-G	BOTRYOÏDES: CHAMPIGNONS ET BOUTONS, SIMPLES ET COMPOSÉS	3
MOKI 2-A	LAIT DE LUNE: COULÉES MULTIPLES EN CHOUX-FLEUR	7
CASC 1-A	LAIT DE LUNE: ACCUMULATION EN CHOUX-FLEUR	5
ÎLE 2-D	BOTRYOÏDES: BOUTONS SIMPLES	1
FLÉ 1-A	MICRO-GOURS: COULÉE COMPLEXE	10

NOTE TO USERS

Oversize maps and charts are microfilmed in sections in the following manner:

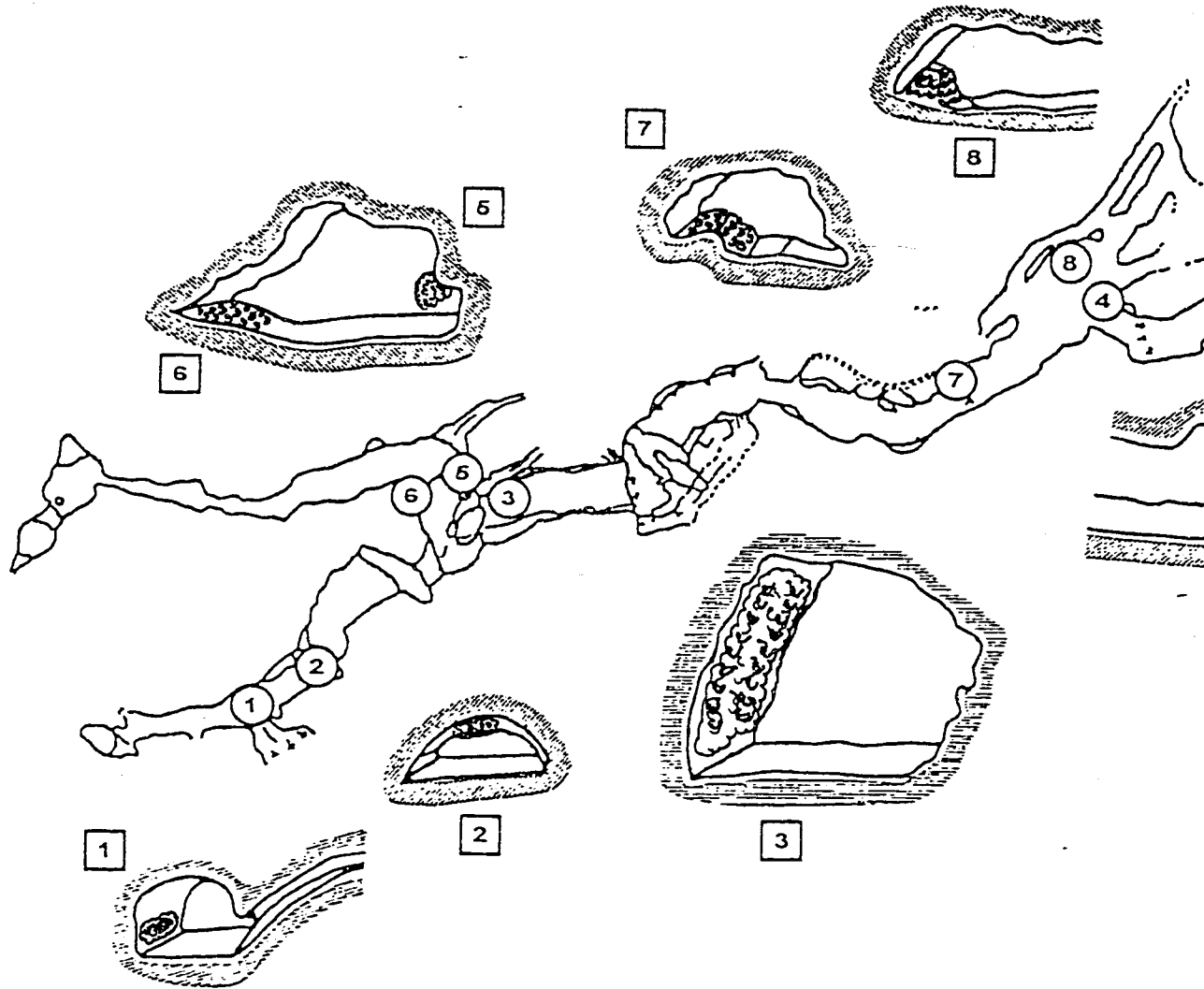
LEFT TO RIGHT, TOP TO BOTTOM, WITH SMALL OVERLAPS

The following map or chart has been microfilmed in its entirety at the end of this manuscript (not available on microfiche). A xerographic reproduction has been provided for paper copies and is inserted into the inside of the back cover.

Black and white photographic prints (17"x 23") are available for an additional charge.

UMI

1. GROTTES WILSON

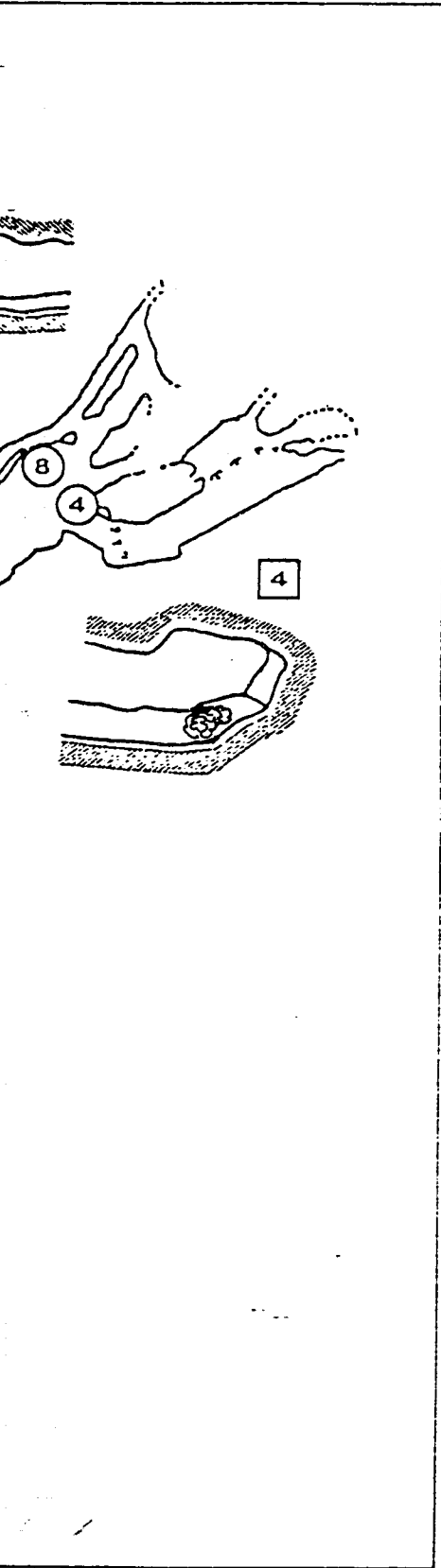


ÉCHELLES :

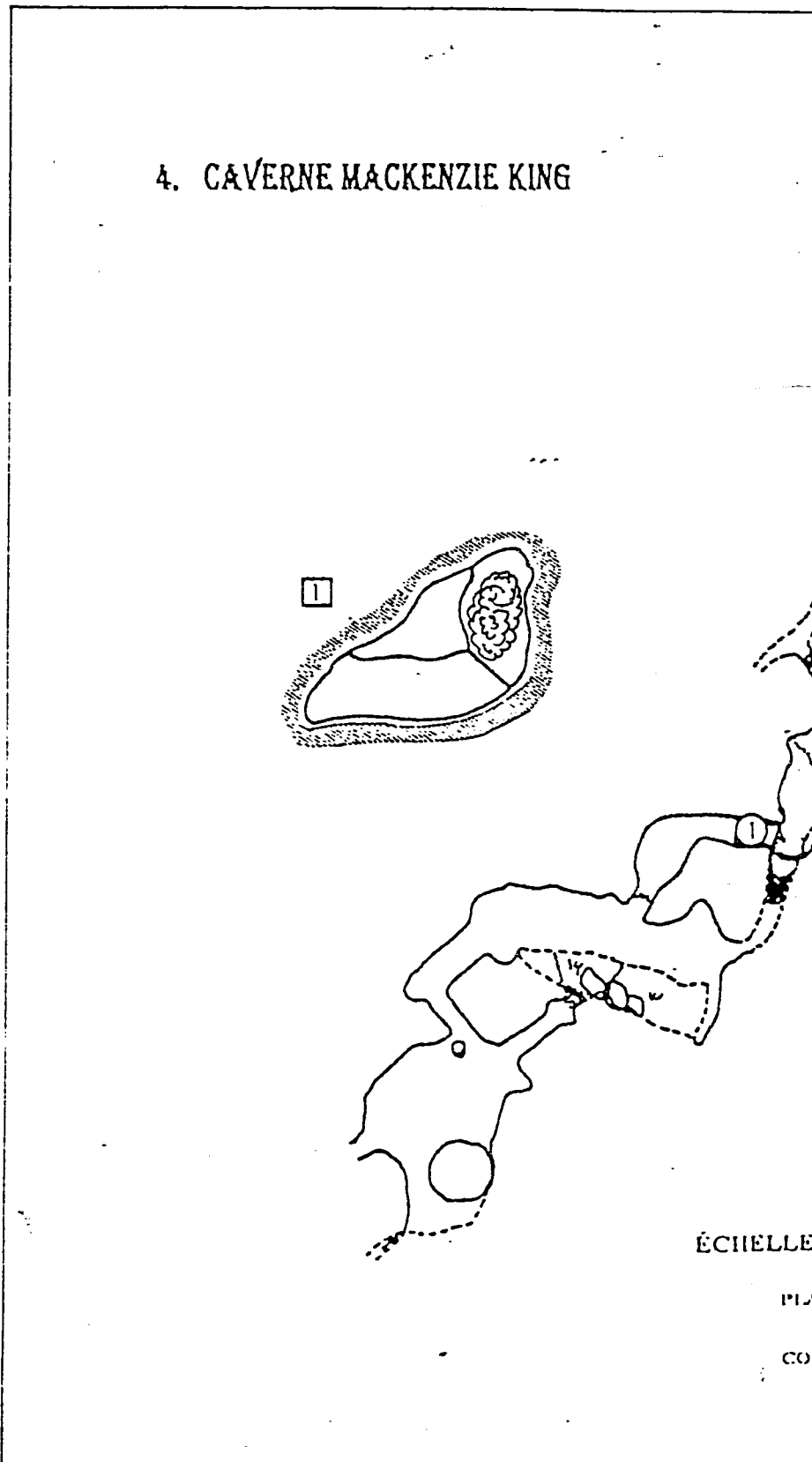
PLAN : 0 ————— 10 m

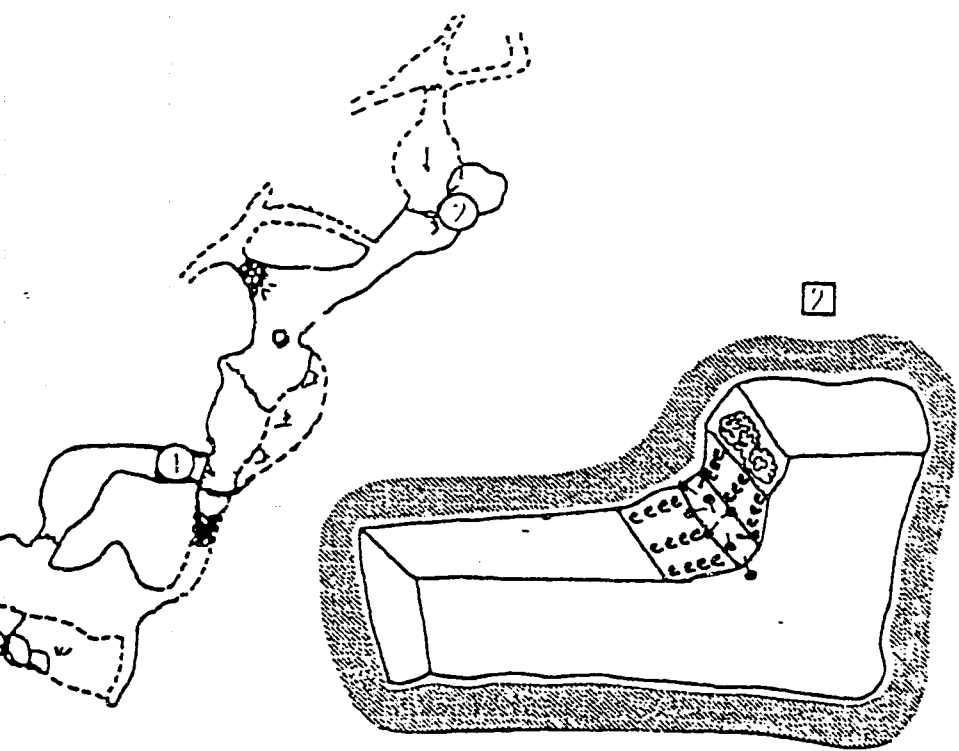
CROUPE : 0 ————— 5 m

8. GROTTES DES MOULES

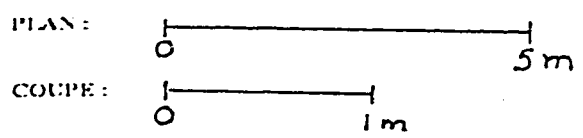


4. CAVERNE MACKENZIE KING





ÉCHELLES : -



6. CA

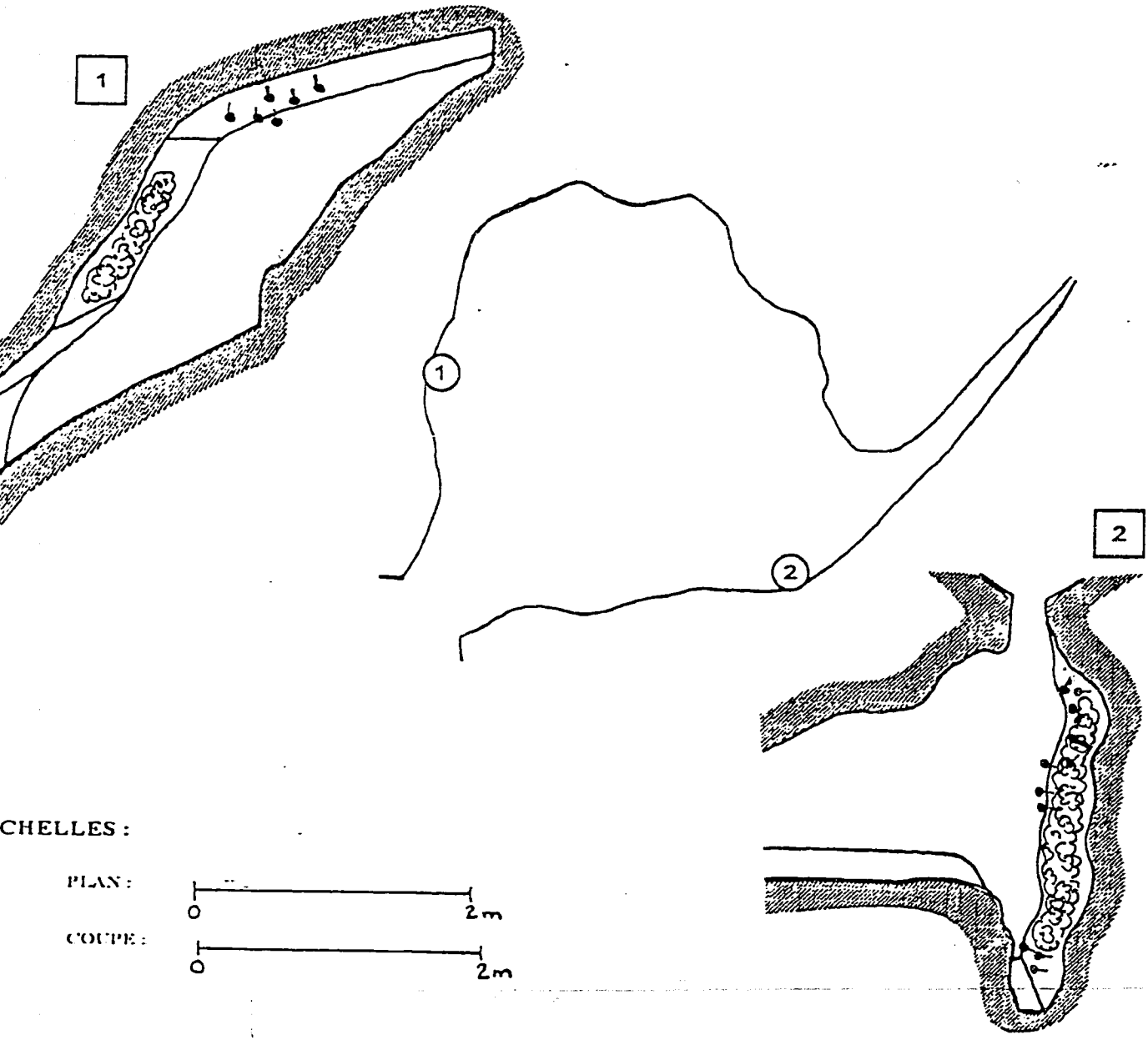


ÉCHELLE

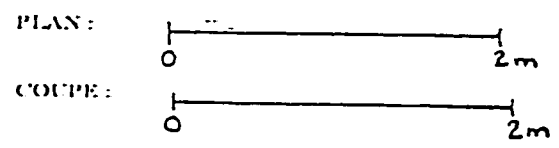
PL.

CO

CAVERNE DE LA MINE , DÔME



CHELLES :



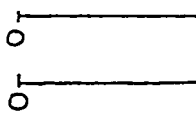
8. GROTTES DES MOULES

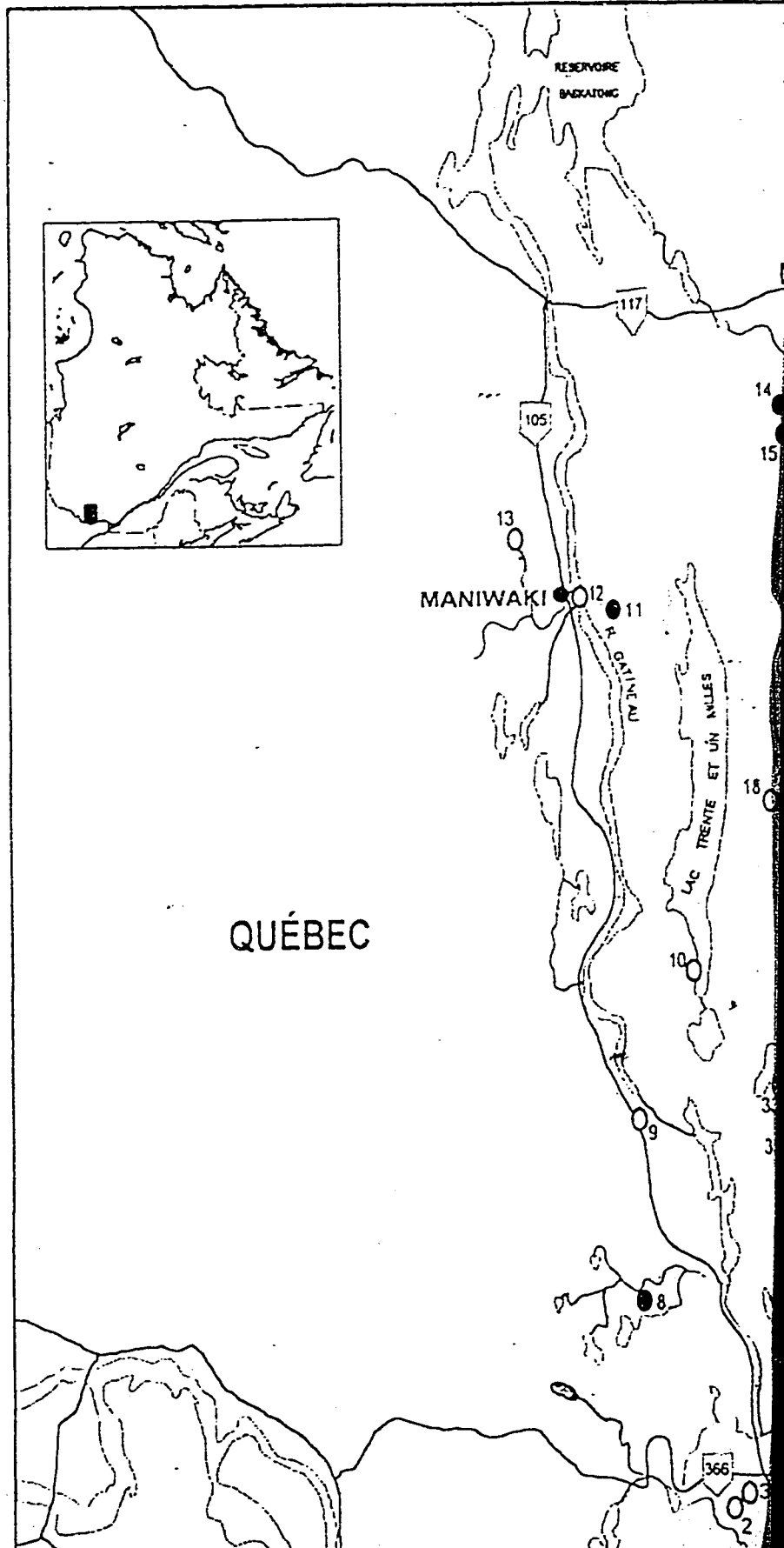
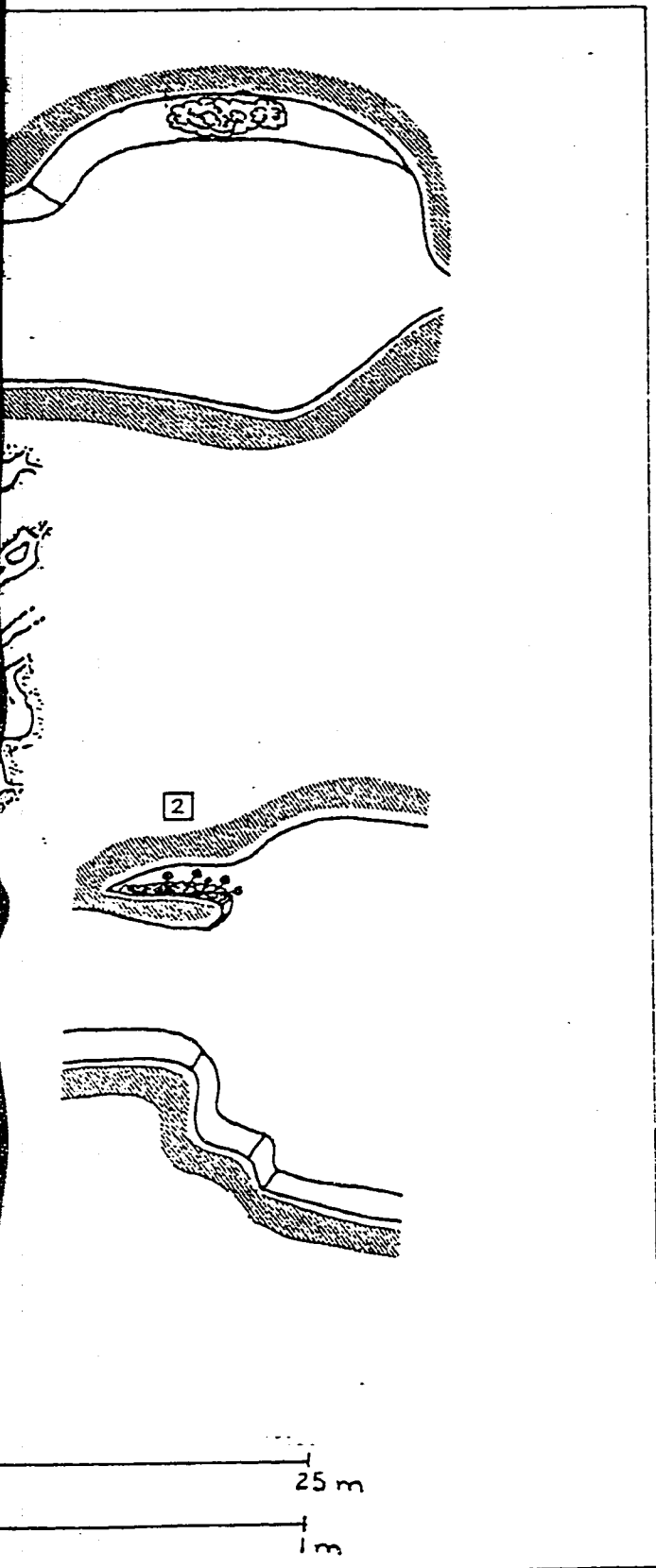


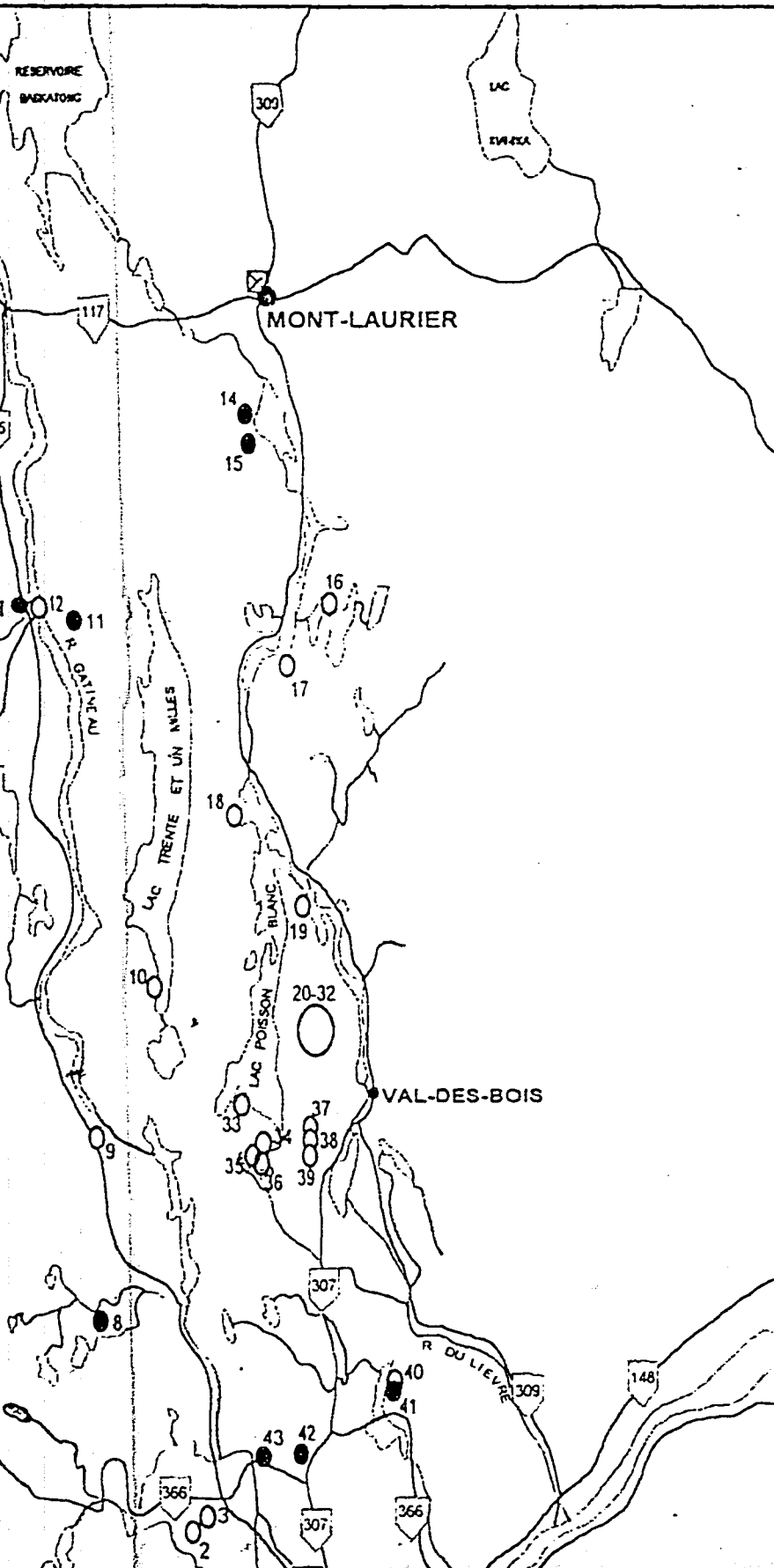
ÉCHELLES :

PLAN :

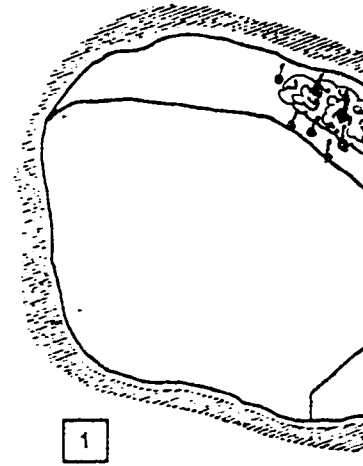
COUPE :



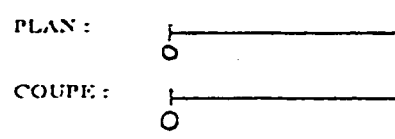




11. GROTTES MOKIDJIWINIB, RÉ

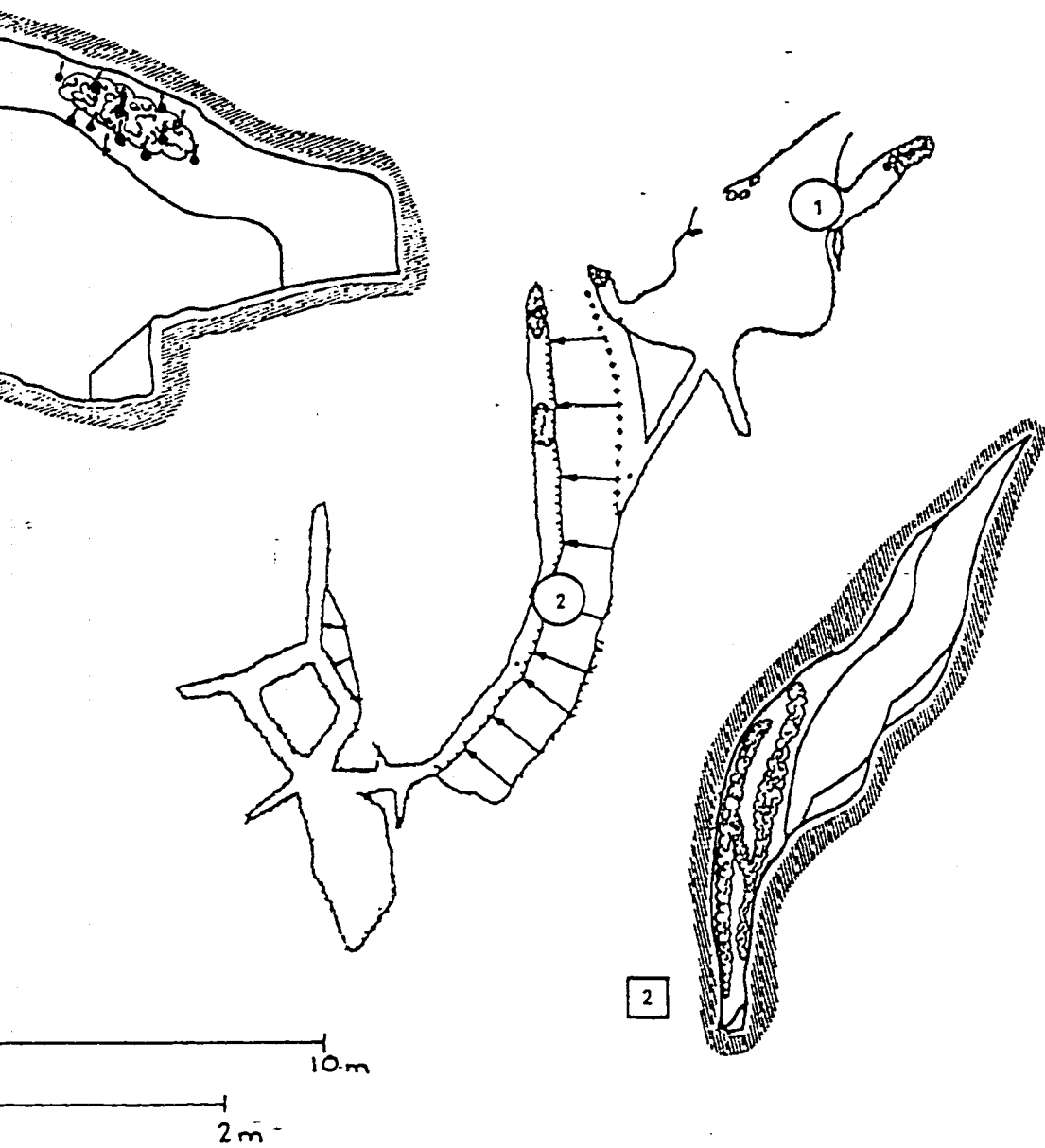


ÉCHELLES :



15. GROTTES DE L

WINIB, RÉSEAU FOSSILE



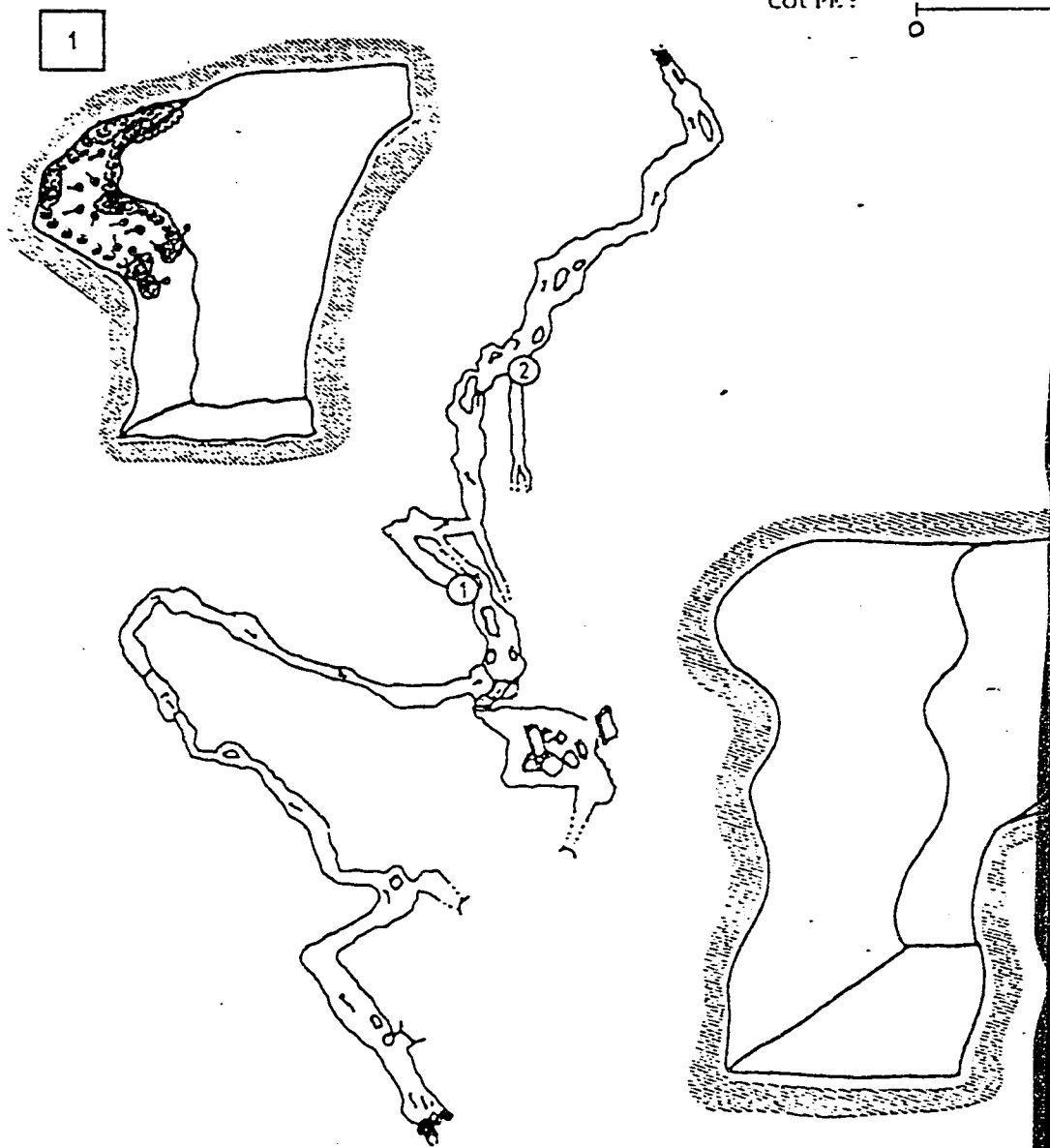
DE LA MAISON DE PIERRE

14. GROTTTE DU LAC DES ÎLES

ÉCHELLES :

PLAN :

COUPE :

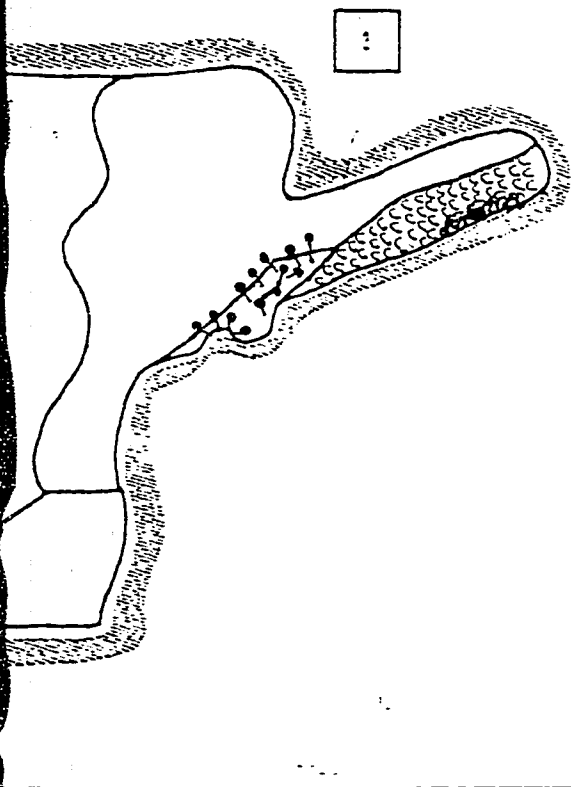
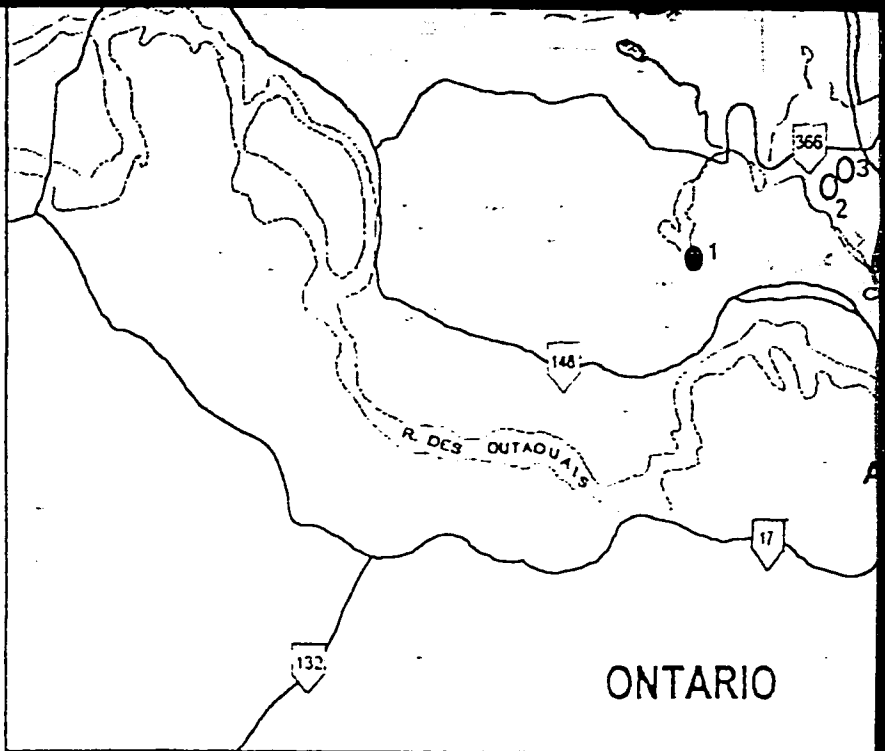
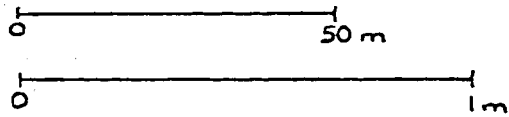


41. CAVERNE DE L'OURS

3

6





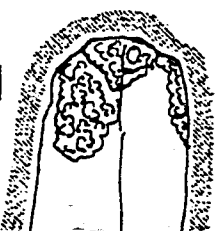
LEGENDE :

- | | | | |
|--|----------------------------|--|--------------|
| | ROUTES | | LOCALITES |
| | RIVIÈRES | | COUPES |
| | LACS | | ROCHES |
| | VILLES | | LAIT DE LUNE |
| | STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES | | BOTRYCHES |
| | CAVERNES NON SÉLECTIONNÉES | | MICRO-OC |
| | CAVERNES SÉLECTIONNÉES | | |

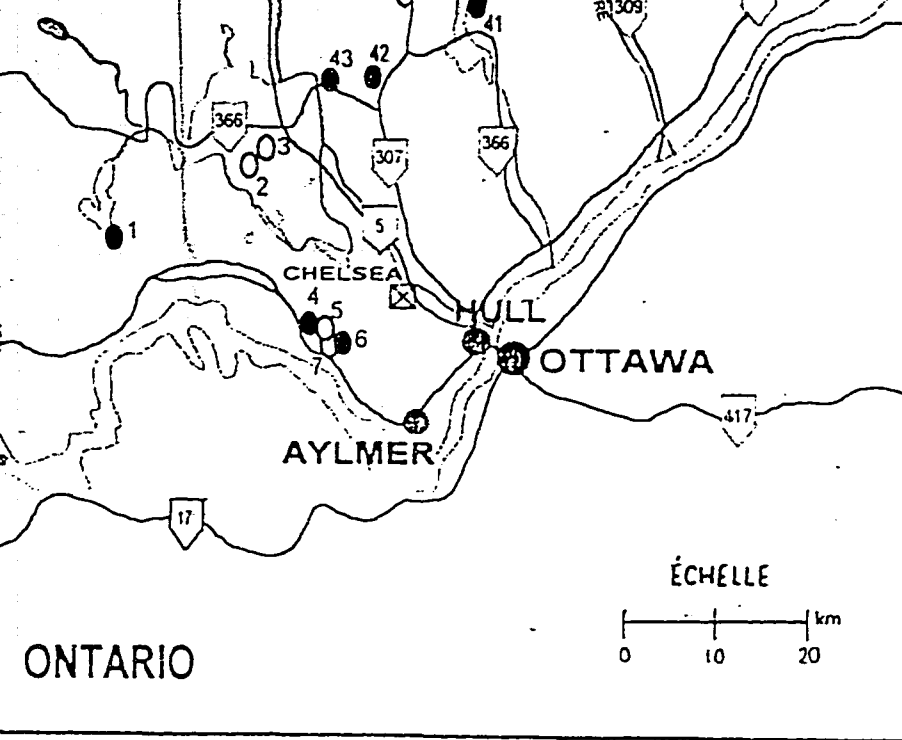
LISTE DES CAVERNES DE LA RÉGION À L'ÉTUDE

1	GROTTE WILSON	12	GROTTE DE L'ÎLE DU CORBEAU	23	
2	GROTTE DE LUSK	13	CAVERNE TAWANWANGUA	24	
3	GROTTE DE MASHAM	14	GROTTE DU LAC DES ÎLES	25	
4	CAVERNE MACKENZIE KING	15	GROTTE DE LA MAISON DE PIERRE	26	
5	GROTTE DU PLATEAU	16	GROTTE DU PETIT LAC DU CERF	27	
6	CAVERNE DE LA MINI	17	GROTTE DU POINT MAIN	28	
7	LE PUI	18	GROTTE DES NIDS DE CORBEAUX	29	
8	GROTTE DES MOULLES	19	GROTTE DU LAC HADLOW	30	
9	KARST DE KASABAZUA	20	GOUFFRE DES VENTS	31	
10	CAVERNE DE POINT COMFORT	21	GROTTE TUBULAIRE	32	
11	GROTTE MOKIDJWINII	22	GROTTE DE LA FRONTIÈRE	33	

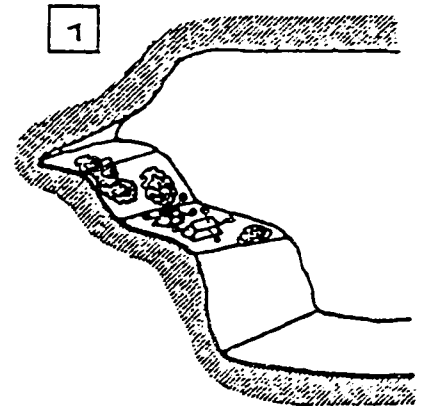
6



42. CAVERNE LAFLECHE



15. GROTTTE DE L



- LOCALISATION DES SITES
- COUPES SCHEMATIQUES DES SITES
- ROCHE ENCAISSANTE
- ☉ LAIT DE LUNE
- ⚡ BOTRYOIDE
- ∪ MICRO-GOURS

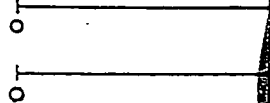


L'ÉTUDE

LE DU CORDEAU	21	GROTTE DE LA VILLA	34	GROTTE DU TORRENT
ANWANGUA	24	GROTTE DU PORCEPIC	35	GROTTE DU LAC ROND
DES ÎLES	25	GROTTE DE LA CARPE EN FOLIE	36	GROTTE DE LA GLACIERE
MAISON DE PIERRE	26	GROTTE DU PREMIER PRINTEMPS	37	GROTTE DU LAC SAMLOCK
ET LAC DU CERF	27	GROTTE DU LAC NOIR	38	CAVERNE DU CASTOR
MAIN	28	GROTTE DU FER A CHEVAL	39	GROTTE DU MARAIS
OS DE CORDEAUX	29	ASTRE DES ARAGNES	40	GROTTE DU LAC GRAND
IBHALOW	30	TROU DES ARGILLES	41	CAVERNE DE LOURS
ENTS	31	GROTTE DU VISON	42	CAVERNE LAFLECHE
AIRI	32	GROTTE DES PINS	43	CAVERNES DU MONT CASCADE
FRONTIERE	33	GROTTE DE L'EGLISE		

ÉCHELLES :

PLAN :

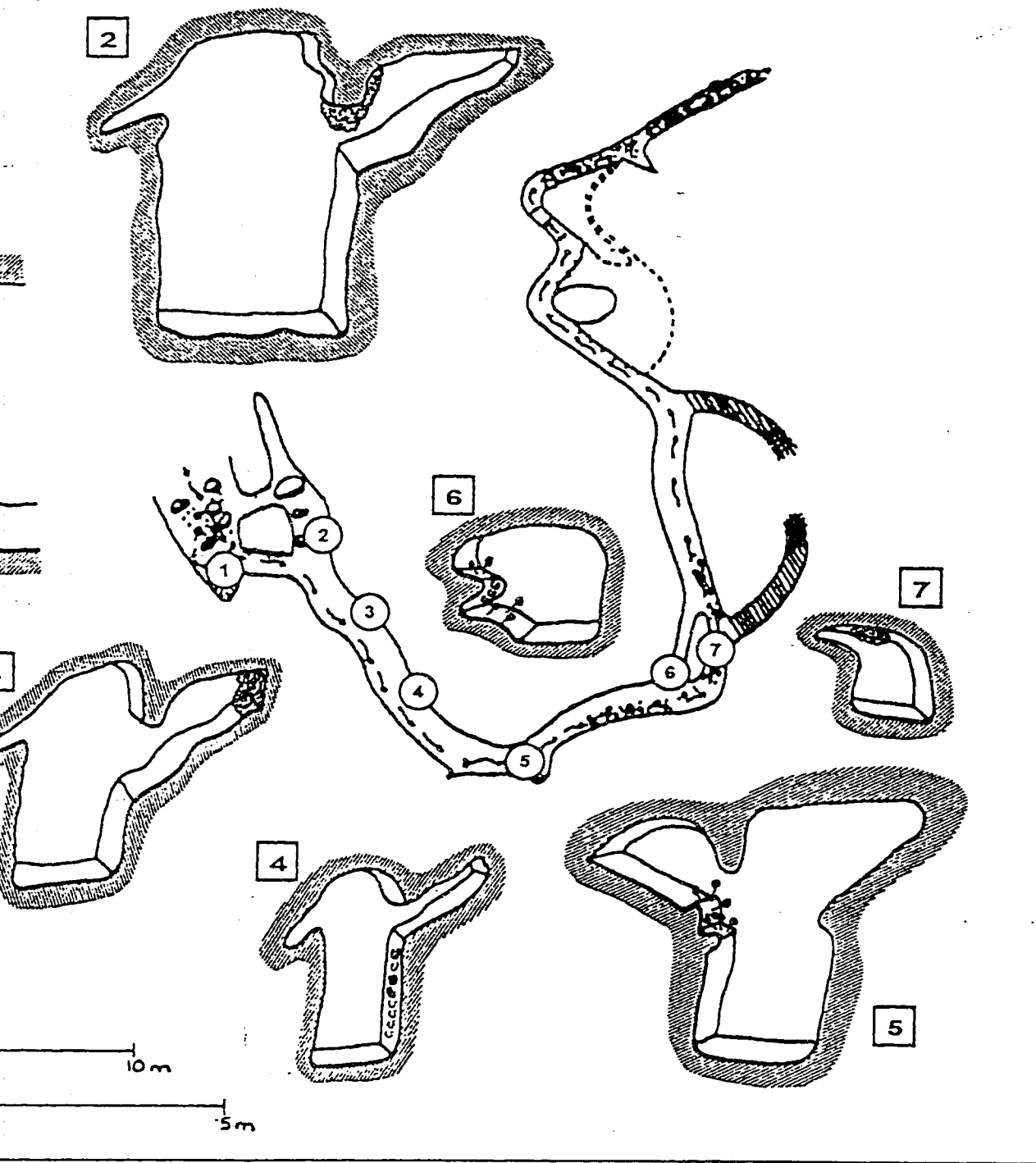


COUPE :



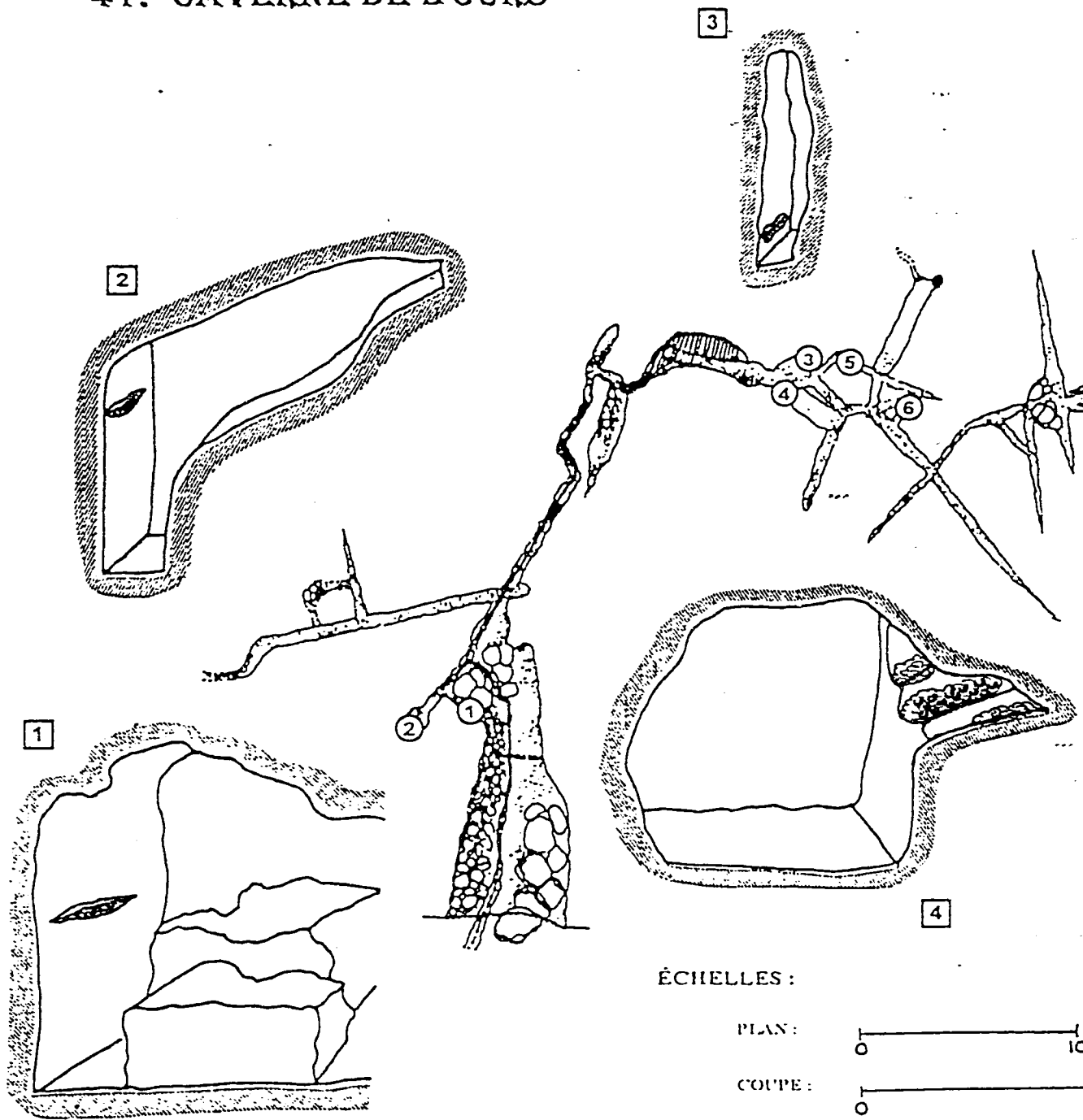
43. CAVERNE

DE LA MAISON DE PIERRE

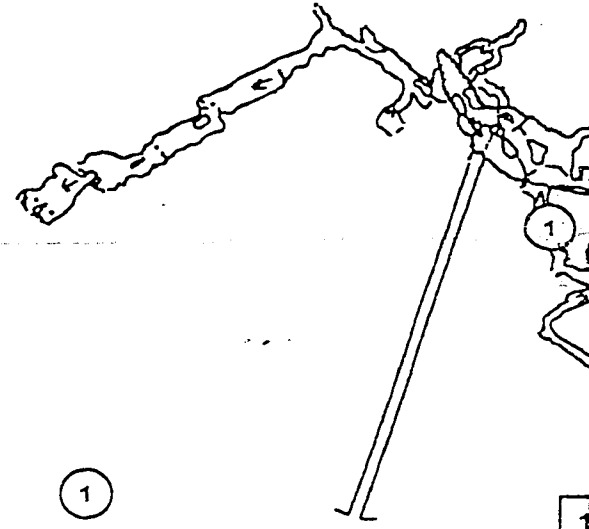
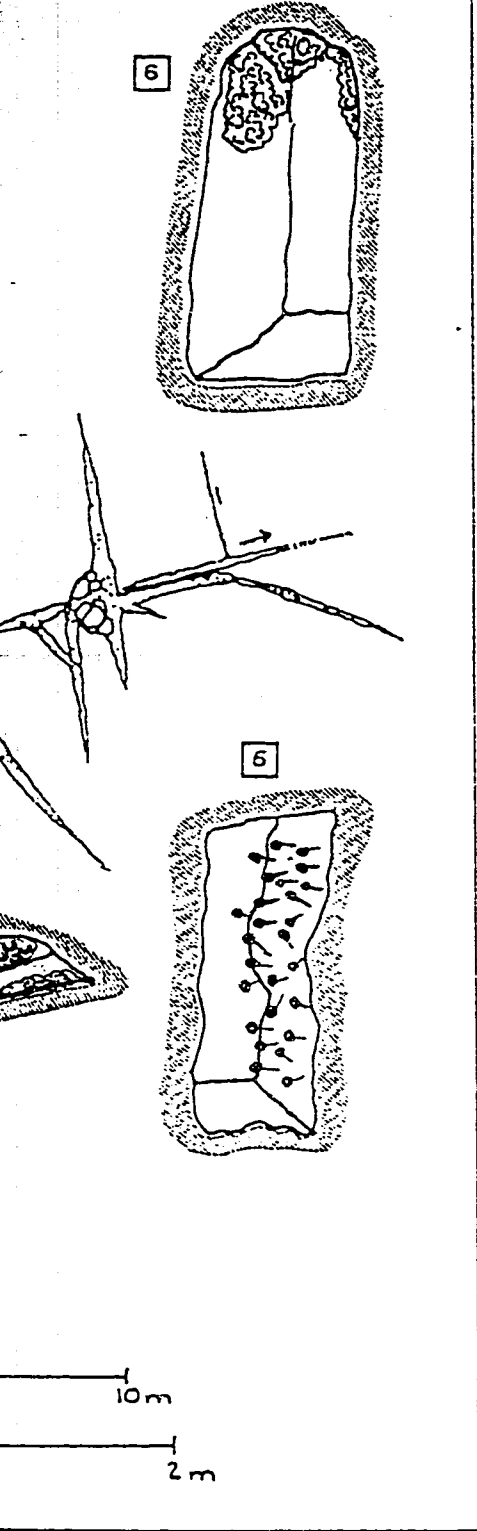


CAVERNES DU MONT CASCADE , RÉSEAU FOSSILE

41. CAVERNE DE L'OURS



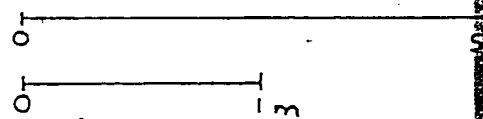
42. CAVERNE LAFLÈCHE



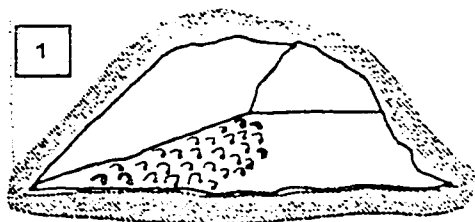
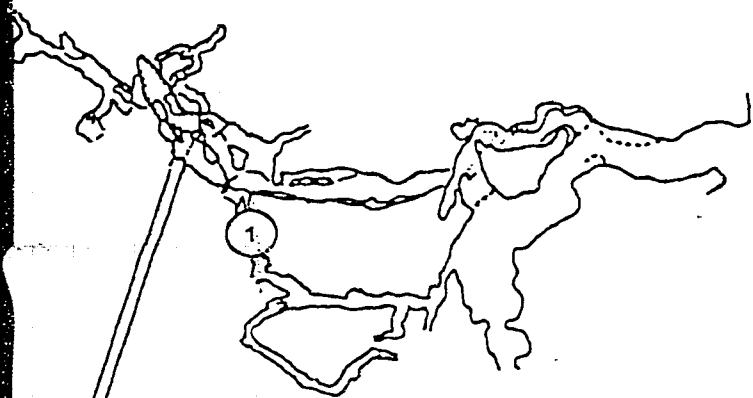
ÉCHELLES :

PLAN :

COUPE :



CARTE DE LOCALISATION

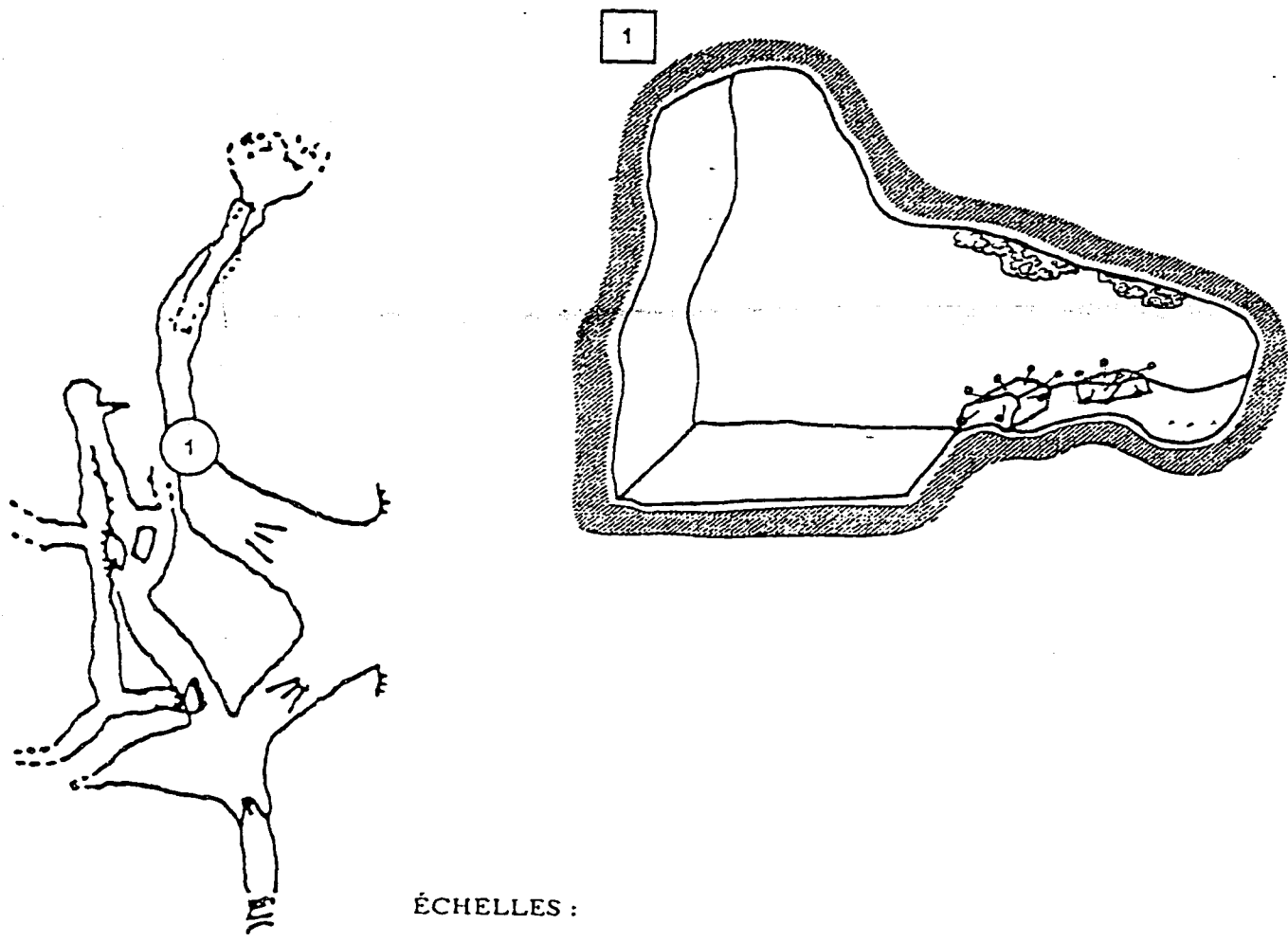


50 m

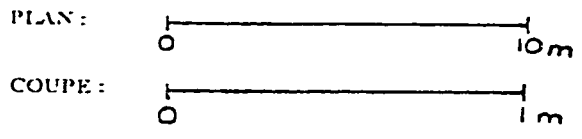
1 m

LOCALISATION

CAVERNES DU MONT CASCADE , RÉSEAU FOSSILE



ÉCHELLES :



SONIA-GABRIELLE VIGNEUX, 1998

CARTE GÉOMORPHE

DE LA RÉGION

GRENVILLE AND SUPERIOR PROVINCES

HADRYNIAN OR YOUNGER



diabase dyke

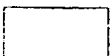
HELIKIAN



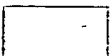
Hsl *slate*



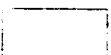
Hnc *marble*



Hq *quartzite*



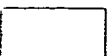
Hcg *conglomerate*



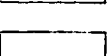
Hvd *andesite*



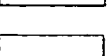
Hvr *rhyolite*



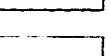
Hm *amphibolite*



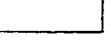
Hn-h *hornblende gneiss*



Hn *paragneiss*



Hn-bg *biotite-garnet gneiss*



Hn-bh *hornblende-biotite gneiss*



Hnp *porphyritic biotite gneiss*



Hn-g *graphite-garnet-biotite gneiss*



Hn-s *sillimanite-garnet-biotite gneiss*



Hnqf *biotite quartzofeldspathic gneiss*



Hng *migmatite, granitic gneiss*

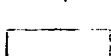


Hng-b *biotitic migmatite*

APHEBIAN OR HELIKIAN



Pg *granite*



Pgd *granodiorite*



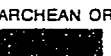
Pn-s *sillimanite-garnet-biotite gneiss*



Png *migmatite*



Png-b *biotitic migmatite*



Pnqf *biotite quartzofeldspathic gneiss*



Pnh *quartzofeldspathic gneiss
leucogranulite*

ARCHEAN OR PROTEROZOIC



y *syenite*



yq *quartz syenite*



g *granite*



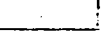
gk *potassic granite*



g-b *biotitic potassic granite*



gd *granodiorite*



gd-b *biotitic granodiorite*



b *gabbro*



di *diorite*



ub *ultrabasics*



n *paragneiss*



n-b *biotite gneiss*



n-m *muscovite gneiss*



n-bg *garnet-biotite gneiss*



n-gf *amphibole-garnet-biotite gneiss*



n-s *sillimanite-garnet-biotite gneiss*



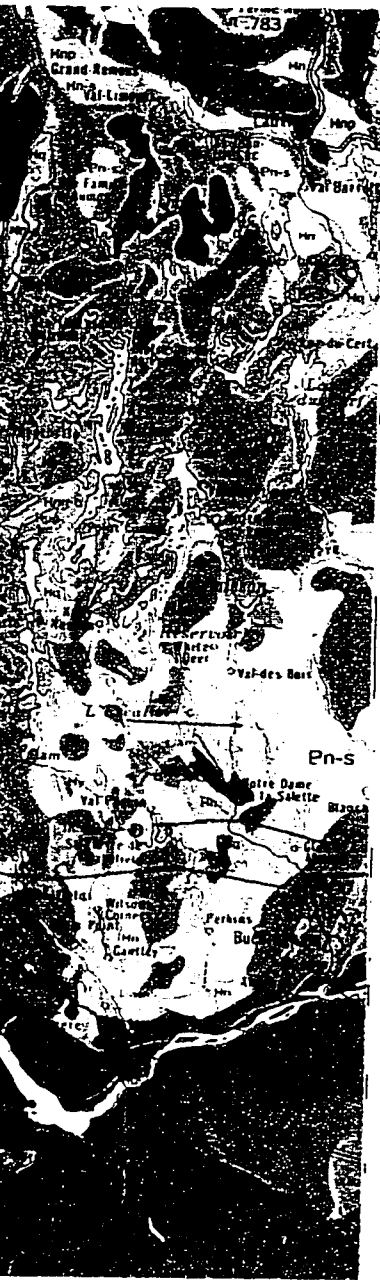
n-bh *hornblende-biotite gneiss*





MORPHOLOGIQUE

REGION À L'ÉTUDE



PALEOZOIC

	An-b	biotite gneiss
	An-bf	hornblende-biotite gneiss
	Anql	biotitic quartzofeldspathic gneiss
	mOT	TRENTON GROUP: limestone
	mOBR	BLACK RIVER GROUP: limestone
	mOBE	BEAUCEVILLE: slate conglomerate, tuff
	mOP	PARTRIDGE: black slate
	mOCZ	CHAZY GROUP: limestone, sandstone, shale
	mOG	GUIGUES: sandstone
	mOL	LAVAL: limestone, sandstone, shale
	mOMY	MYSTIC: limestone, conglomerate
	mOM	MIDDLEBURY: limestone
	mOR	ROCKCLIFFE: sandstone, shale, limestone
	mOAV	AMMONGOOSUC: soda-rhyolite
	mOA	ALBEE: phyllite, schist, quartzite
	mOB	BROMPTON: greenstone, rhyolite, greywacke
LOWER OROVICIAN		
	iOB	BEEKMANTOWN GROUP: dolomite, limestone
	iOBN	BEAUHARNOIS: dolomite
	iOO	OXFORD: dolomite
	iOC	mainly carbonate formations
	iOM	MARCH: sandstone, dolomite
	iON	NEPEAN: sandstone

HADRYNIAN

	Hy	syenite
--	----	---------

HELIKIAN

	Hy	syenite
	Hy-f	hornblende syenite
	Hy-h	hypersthene syenite
	Hy-u	nepheline syenite
	Hy-x	pyroxene syenite
	Hy-q	quartz syenite
	Hg	granite
	Hgk	potassic granite
	Hg-b	biotitic potassic granite
	Hg-f	hornblende potassic granite
	Hgik	alkali
	Hgo	olivine granite
	Ha	anorthosite, gabbro
	Hb	gabbro
	Hci	diorite

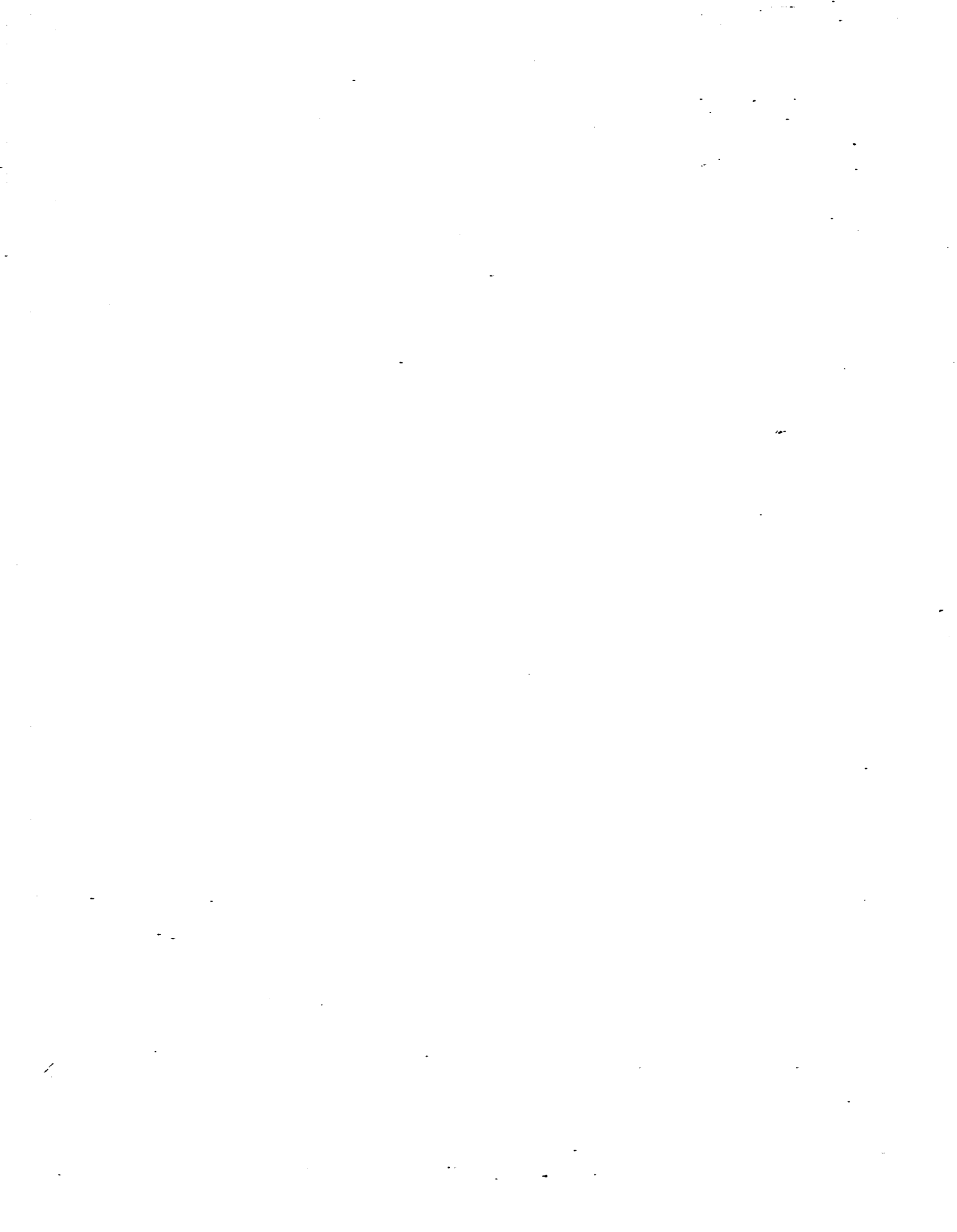
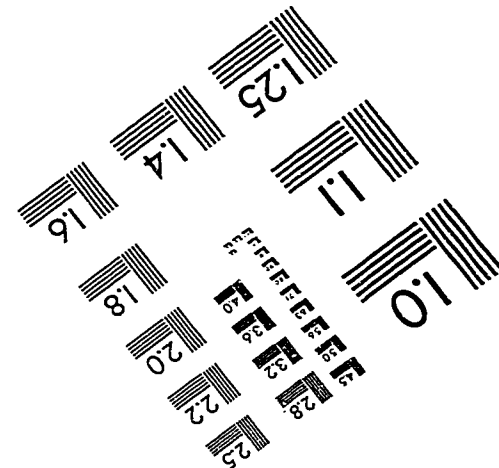
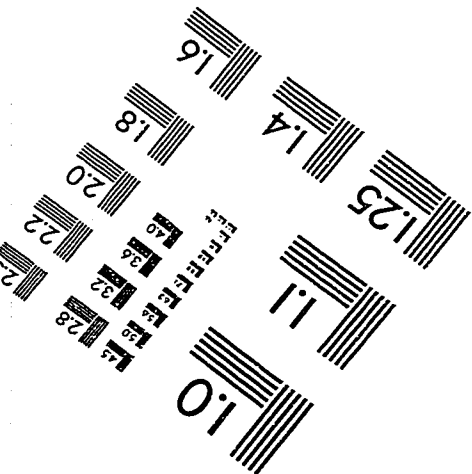
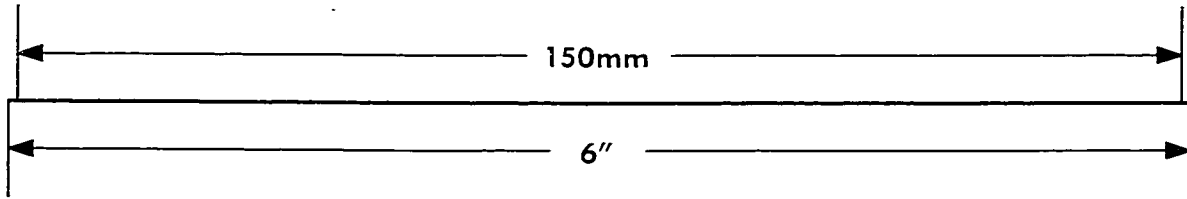
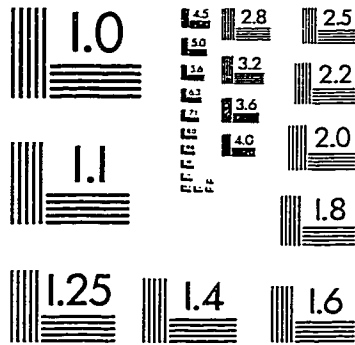
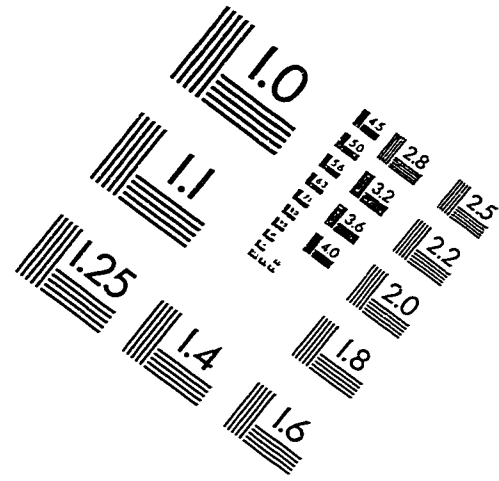
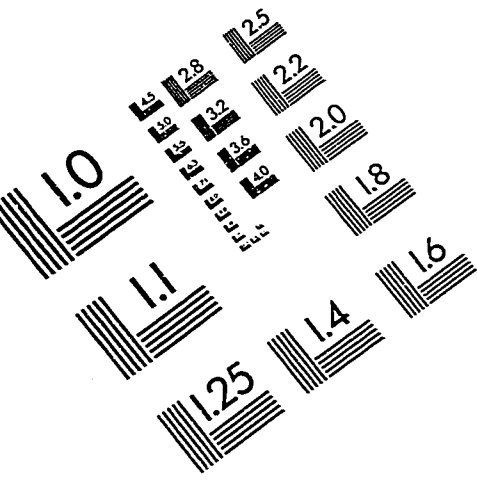


IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved