Université du Québec
INRS Géoressources

Étude structurale et géochimique des veines de l'écaille de Saint-Dominique, Appalaches du sud du Québec

Par
Stephan Séjourné
Maîtrise en Sciences de la Terre

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

Jury d'évaluation

Examinateur externe	Pierre Labaume CNRS - Université Joseph Fourier
Examinateur interne	Alain Tremblay INRS Géoressources
Directeur de recherche	Michel Malo INRS Géoressources
Codirectrice de recherche	Martine Savard Commission Géologique du Canada
Codirectrice de recherche	Donna Kirkwood Université Laval

(31 juillet 2000)

© droits réservés de Stephan Séjourné 2000

RÉSUMÉ

L'écaille de Saint-Dominique fait partie de la zone de failles imbriquées qui souligne la limite entre les nappes externes de la zone de Humber et la plate-forme autochtone des Basses-Terres du Saint-Laurent. On y retrouve les mêmes roches que dans la plate-forme, depuis le Groupe de Beekmantown jusqu'au Groupe de Lorraine, qui ont été déformées durant l'orogenèse taconienne (Ordovicien moyen à tardif). Nous considérons ici quatre affleurements de grandes dimensions situés le long de la Route 235 et dans la Carrière Saint-Dominique, afin d'établir l'enchaînement des déformations qui ont affecté l'écaille. Un soin particulier a été apporté à la compréhension du mode de formation des veines parallèles au litage (VPL) et des veines nord-nord-est parallèles à l'axe du plissement, ces deux types de veines étant le sujet d'une importante controverse dans la littérature. Trois approches complémentaires devront permettre d'arriver à cette fin : une analyse détaillée des éléments structuraux et microstructuraux et de leurs relations de recoupement, une étude pétrographique des ciments de calcite qui scellent les veines, et enfin l'analyse isotopique de ces ciments ($\delta^{18}O_{PDB}$ ‰ ,$\delta^{13}C$ ‰).

L'ouverture des premières VPL s'est produite en enfouissement lors de la formation de chevauchements parallèles au litage. Le plissement par flexion et glissement a ensuite réactivé ces VPL et en a formé de nouvelles. Les ciments de calcite ont enregistré toutes les étapes de l'ouverture et de la déformation des VPL ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -9,7 à -8,2 et $\delta^{13}C$ = -1,59 à -0,08 pour le Groupe de Beekmantown, $\delta^{18}O_{PDB}$ = -8,1 à -4,7 et $\delta^{13}C$ = 0,60 à 1,96 pour le Groupe de Trenton).

Les veines d'extension parallèles à l'axe du plissement ont un pendage vers l'ouest-nord-ouest ou vers l'est-sud-est. Elles se sont développées dans les charnières anticlinales au passage des rampes ou sous le poids des redoublements tectoniques, et sont recoupées par le clivage de plan axial et les derniers mouvements cisaillants des VPL. Les ciments de ces veines ont précipité à partir du même fluide que les VPL ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -9,5 à -8,3 et $\delta^{13}C$ = -0,64 à -0,23 pour le Groupe de Beekmantown, $\delta^{18}O_{PDB}$ = -7,5 à -6,5 et $\delta^{13}C$ = 1,36 à 1,67 pour le Groupe de Trenton).

Les failles inverses recoupent ou réactivent les éléments structuraux précédents. Leurs ciments ont des signatures isotopiques très voisines de celles des derniers ciments des VPL et correspondent donc aux derniers mouvements des failles ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -8,5 à -6,1 et $\delta^{13}C$ = -1,03 à -0,25 pour le Groupe de Beekmantown, $\delta^{18}O_{PDB}$ = -6,2 à -6,0 et $\delta^{13}C$ = 1,39 à 1,66 pour le Groupe de Trenton).

La plupart des failles normales sont tardi-taconiennes. Elles soulignent le relâchement des contraintes et l'effondrement final des structures chevauchantes. Le fluide impliqué dans leur cimentation est très proche de celui des failles inverses ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -6,8 à -3,4 et $\delta^{13}C$ = 0,52 à 1,78 pour le Groupe de Trenton). Seules deux failles dans les groupes de Beekmantown et de Trenton ont pu être actives respectivement avant et après l'orogenèse taconienne.

L'ensemble des résultats isotopiques indique une diminution progressive de la température du système (Beekmantown : $\delta^{18}O_{PDB}$ = -10,5 à -8,1, Trenton : $\delta^{18}O_{PDB}$ = -8,1 à -4,7) expliquée par l'effet conjugué de la remontée des structures le long des plans de chevauchements et du mélange avec un fluide de même nature mais plus froids, provenant des séries du mur des chevauchements.

Des failles inverses et normales ont été réactivées tardivement selon un mouvement décrochant nord-sud incompatible avec les contraintes qui ont présidé aux déformations taconiennes ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -5,4 et $\delta^{13}C$ = 1,00 pour le Groupe de Beekmantown, $\delta^{18}O_{PDB}$ = -1,1 et $\delta^{13}C$ = -1,05 pour le Groupe de Black River).

Étudiant

Directeur de recherche

REMERCIEMENTS

Michel et Andréa Séjourné m'ont toujours encouragé dans mes passions. Grâce à eux, le rêve devient souvent réalité. Eux seuls savent les sacrifices qu'ils ont dû faire pour moi. Cette maîtrise est aussi la leur, et ce mémoire est pour eux.

Christine Sehrbrock aussi mérite toute ma reconnaissance, pour m'avoir accompagné tout au long de mes travaux et pour m'avoir supporté dans mes périodes de questionnement.

Michel Malo est l'âme de ce travail. Comme directeur il a su me communiquer le goût du travail rigoureux et objectif. Comme géologue il a réussi à entretenir et renouveler ma passion pour la recherche. Comme homme il a toujours tenu compte de mes goûts et de mes orientations personnelles, et a su instaurer un climat de confiance et de respect sans lequel rien ne peut être accompli.

Je tiens aussi à remercier mes codirectrices, mesdames Martine Savard et Donna Kirkwood, pour leur disponibilité et pour l'intérêt qu'elles ont porté à mes travaux. Je rend hommage à leur compétence et à la finesse de leur jugement.

Presque tout le personnel du Centre Géoscientifique de Québec a apporté sa touche personnelle à ma maîtrise à un moment ou à un autre. Je leur suis très reconnaissant pour leur support technique et parfois moral. Je ne peux les citer tous ici, mais je les garde tous dans ma mémoire.

En particulier, je veux remercier Patrice Gosselin, l'homme à la casquette, pour m'avoir accompagné et supporté sur le terrain avec tout le tact qui le caractérise et dont il peut être fier. Merci aussi à mesdames Lise Michard, Sonia Dupuis, Anne Robitaille, Luce Dubé, et Christine Deblonde, ainsi qu'à messieurs Pierre Labaume, Alain Tremblay, Yvon Héroux, Rudolph Bertrand, André Chagnon, Marc Luzincourt et Jean-Claude Bérubé, pour leurs talents de correcteurs, de professeurs et/ou de simples complices. Merci enfin à toutes les étudiantes et à tous les étudiants de l'INRS : mes collègues et néanmoins ami(e)s, complices de tous les moments d'euphorie et de stress. Merci aussi à Monsieur Jean-Guy Ledoux, surintendant de la compagnie Les Carrières de Saint-Dominique Ltée, pour nous avoir autorisés à travailler sur les terrains de la compagnie.

Il me reste une dernière personne à remercier : celle par qui tout est arrivé. En 1995, j'ai effectué un stage dans les laboratoires de l'Université Libre de Bruxelles sous la direction de Monsieur Alain Herbosch, professeur et directeur des Laboratoires Associés de l'université. Je débutais alors en géologie et je n'avais aucune expérience, rien ne l'obligeait à m'accepter et je représentais même une charge supplémentaire pour lui. Mais il m'a fait confiance, déclenchant par là une série de coïncidences qui m'ont conduites jusqu'ici. Merci beaucoup Monsieur Herbosch.

Le trait commun à toutes les personnes citées ici est leur disponibilité. Je souhaite à tout le monde de travailler avec des gens comme eux et de pouvoir s'enrichir à leur contact. Tous ont contribué à améliorer la qualité de mon travail, mais je sais qu'il reste encore bien des défauts à corriger. J'en assume l'entière responsabilité.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ III

REMERCIEMENTS V

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES FIGURES X

LISTE DES TABLEAUX XI

CHAPITRE 1
INTRODUCTION 1
1.1 Problématique 1
1.2 Objectifs 7
1.3 Méthodologie 8
1.3.1 Analyse structurale et pétrographique 8
1.3.2 Analyse isotopique 9
1.3.3 La représentativité des affleurements et des échantillons 10
1.4 Géologie régionale 11
1.4.1 Les zones tectonostratigraphiques 11
1.4.2 La stratigraphie de la plate-forme du Saint-Laurent 13
1.4.2.1 Le Groupe de Beekmantown 14
1.4.2.2 Le Groupe de Chazy 14
1.4.2.3 Le Groupe de Black River 15
1.4.2.4 Le Groupe de Trenton 15
1.4.3 La zone de Humber externe et le domaine parautochtone 15
1.4.4 L'évolution tectonique et paléoenvironnementale de la plate-forme du Saint-Laurent et de la zone de Humber externe 17

CHAPITRE 2
LITHOSTRATIGRAPHIE DE L'ÉCAILLE DE SAINT-DOMINIQUE 21
2.1 Le Groupe de Beekmantown 21
2.2 Le Groupe de Chazy 23
2.3 Le Groupe de Black River 23
2.4 Le Groupe de Trenton 23

CHAPITRE 3
ANALYSE STRUCTURALE DE L'ÉCAILLE DE SAINT-DOMINIQUE 25
3.1 Plissement et clivage 28
3.2 Les failles 30
3.2.1 Distribution et attitude 30
3.2.2 Caractères pétrographiques 31

3.3 Les veines parallèles au litage 33
3.3.1 Caractères structuraux et relation avec le plissement 33
3.3.2 Structure interne 35
3.3.3 Caractères pétrographiques 36
3.3.3.1 Caractères généraux 36
3.3.3.2 La structure laminée 37
3.3.3.3 La structure massive 38
3.3.4 Ouverture et cimentation 38
3.3.4.1 Ouverture perpendiculaire aux épontes 38
3.3.4.2 Ouverture sub-parallèle aux épontes 39
3.3.5 Déformations 43
3.3.6 Relations chronologiques 44
3.4 Les veines parallèles au front orogénique 46
3.4.1 Caractères structuraux 46
3.4.1.1 Les fentes de tension 47
3.4.1.2 Les veines centimétriques d'extension 47
3.4.1.3 Les veines décimétriques à métriques d'extension 48
3.4.1.4 Les veines de cisaillement 48
3.4.2 Caractères pétrographiques 49
3.4.3 Déformations 50
3.5 Les veines perpendiculaires au front orogénique 51
3.5.1 Caractères structuraux 51
3.5.2 Caractères pétrographiques 51

CHAPITRE 4
ANALYSE ISOTOPIQUE 53
4.1 L'encaissant 55
4.2 Les failles 56
4.2.1 Les failles normales 56
4.2.2 Les failles inverses 58
4.2.3 Les failles décrochantes 58
4.3 Les veines parallèles au litage 59
4.3.1 Variation isotopique à l'échelle de l'affleurement 59
4.3.2 Variation isotopique à l'échelle d'une veine 60
4.3.2.1 Variation sur la longueur d'une veine 60
4.3.2.2 Variation d'une lamination à l'autre 61
4.3.3 Les générations de ciments 63
4.3.4 Les structures massive et laminée 64
4.3.5 Lien avec les variations pétrographiques 64
4.4 Les veines parallèles au front orogénique 65
4.4.1 Les fentes de tension 65
4.4.2 Les veines d'extension 66
4.4.3 Les veines de cisaillement 66
4.5 Les veines perpendiculaires au front orogénique 67
4.6 Les relations de recoupement 68

CHAPITRE 5
DISCUSSION DES RÉSULTATS 69
5.1 L'interprétation des signatures isotopiques 69
5.2 Le plissement 72
5.3 Les failles 73
5.3.1 Les failles normales 73
5.3.1.1 Extension pré-taconienne 73
5.3.1.2 Extension tardi-taconienne 75
5.3.1.3 Extension post-taconienne 76
5.3.2 Les failles inverses 76
5.3.3 Les failles décrochantes 76
5.4 Les veines parallèles au litage 77
5.4.1 Les veines parallèles au litage dans les flancs des plis 77
5.4.2 Les veines parallèles au litage dans les zones à litage tabulaire et dans les charnières de plis 78
5.5 Les veines parallèles au front orogénique 83
5.5.1 Les fentes de tension 83
5.5.2 Les veines d'extension 83
5.5.3 Les veines de cisaillement 85
5.6 Les veines perpendiculaires au front orogénique 85
5.7 Histoire de la déformation dans l'écaille de Saint-Dominique 86

CHAPITRE 6
CONCLUSIONS 89

RÉFÉRENCES 93

APPENDICE A : Résultats de l'analyse isotopique des ciments de calcite de l'encaissant, des veines et des failles 101

APPENDICE B : Erreur statistique sur l'analyse isotopique des ciments de calcite de l'encaissant, des veines et des failles 105

PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES 107

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Géologie générale des Basses-Terres du Saint-Laurent 2

Figure 2 : Stratigraphie de la plate-forme du Saint-Laurent pour la région de Montréal 3

Figure 3 : Géologie de l'écaille de Saint-Dominique 4

Figure 4 : Principaux modèles de formation des VPL 5

Figure 5 : Principaux éléments structuraux de l'affleurement 4, le long de la route 235, et de l'affleurement 1, dans la Carrière Saint-Dominique 12

Figure 6 : Localisation des échantillons prélevés dans les affleurements 2 et 3 22

Figure 7 : Coupe structurale de l'écaille de Saint-Dominique 26

Figure 8 : Attitude du litage et des VPL 29

Figure 9 : Attitude des stries sur les VPL 29

Figure 10 : Attitude du clivage 29

Figure 11 : Attitude des plans de failles et des stries 29

Figure 12 : Schéma d'une veine de calcite tabulaire résultant de l'ouverture de cavités Rhomboédriques selon le modèle de Labaume, Berty et Laurent (1991) 40

Figure 13 : Schéma des caractères microstructuraux des VPL de type A et B selon Fowler (1996) 42

Figure 14 : Relations de recoupement entre les ciments des VPL 45

Figure 15 : Attitude des veines parallèles et perpendiculaires au front orogénique 46

Figure 16 : Attitude des stries sur les veines de cisaillement parallèles au front orogénique 46

Figure 17 : Compilation du signal isotopique des calcites marines d'après différents auteurs 54

Figure 18 : Valeurs isotopiques des micrites de l'encaissant des veines, des VPL et des failles, pour les Groupes de Beekmantown, Black River et Trenton 56

Figure 19 : Valeurs isotopiques des ciments des failles et des veines parallèles et perpendiculaires au front orogénique 57

Figure 20 : Champs des veines et des failles dans les groupes de Beekmantown et de Trenton 58

Figure 21 : Valeurs isotopiques des ciments de calcite des VPL 60

Figure 22 : Ciments des laminations des VPL 41 et 94, Groupe de Beekmantown 62

Figure 23 : Générations de ciments dans les VPL 63

Figure 24 : Comparaison entre les ciments des structures massive et laminée des VPL 64

Figure 25 : Assemblages pétrographiques dans les VPL 65

Figure 26 : Évolution de la signature isotopique des ciments des veines et des failles en fonction des relations de recoupements structurales et microstructurales 68

Figure 27 : Formation des différents types de veines pendant le développement des plis de rampe et des chevauchements parallèles au litage 82

Figure 28 : Chronologie relative des éléments structuraux à partir de la phase compressive taconienne 87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les différents mécanismes de formation des VPL 6

Tableau 2 : Caractères pétrographiques des ciments des veines et des failles pour les groupes de Beekmantown et de Trenton 32

Tableau 3 : Moyennes des signatures isotopiques de chaque famille structurale 53

CHAPITRE 1
INTRODUCTION

1.1 Problématique

Entre la plate-forme du Saint-Laurent et les nappes de la zone de Humber externe des Appalaches du Québec, on reconnaît au sein de la zone de failles imbriquées des écailles parautochtones détachées de la plate-forme, et qui sont déplacées et imbriquées avec les nappes taconiennes (figure 1). Ces écailles affleurent très mal et sont surtout situées en profondeur sous les nappes, de sorte que leur histoire tectonique et leur mode de fracturation sont encore largement méconnus. La compréhension de cette histoire est cependant un enjeu important pour qui s'intéresse à la circulation des paléofluides, à la modélisation des aquifères actuels, à l'exploitation des ressources en eau et en hydrocarbures (Mascle et Puigdefàbregas, 1998), ainsi qu'aux problèmes associés au stockage des hydrocarbures.

Les écailles parautochtones sont susceptibles d'enregistrer une grande variété d'événements géologiques, ce qui fait leur intérêt et leur complexité. Il s'agit avant tout de roches sédimentaires déposées sur la plate-forme (figure 2), de sorte qu'elles ont pu conserver l'histoire diagénétique et tectonique ainsi que l'évolution thermique de la plate-forme avant son écaillage. Elles ont aussi pu enregistrer la réactivation de failles normales héritées de l'ouverture de l'océan Iapetus, puis l'influence tectonique et diagénétique du bombement périphérique développé en avant des nappes taconiennes. Les écailles ont ensuite subi une compression en avant des nappes à mesure que celles-ci progressaient vers la plate-forme, avant d'être imbriquées à leur tour et de connaître la même histoire tectonique et thermique que les nappes. Plusieurs événements ultérieurs ont pu laisser leur marque dans les écailles : des déformations siluriennes, l'orogenèse acadienne, l'ouverture du rift du Saint-Laurent et de l'océan Atlantique et l'intrusion des collines montérégiennes.

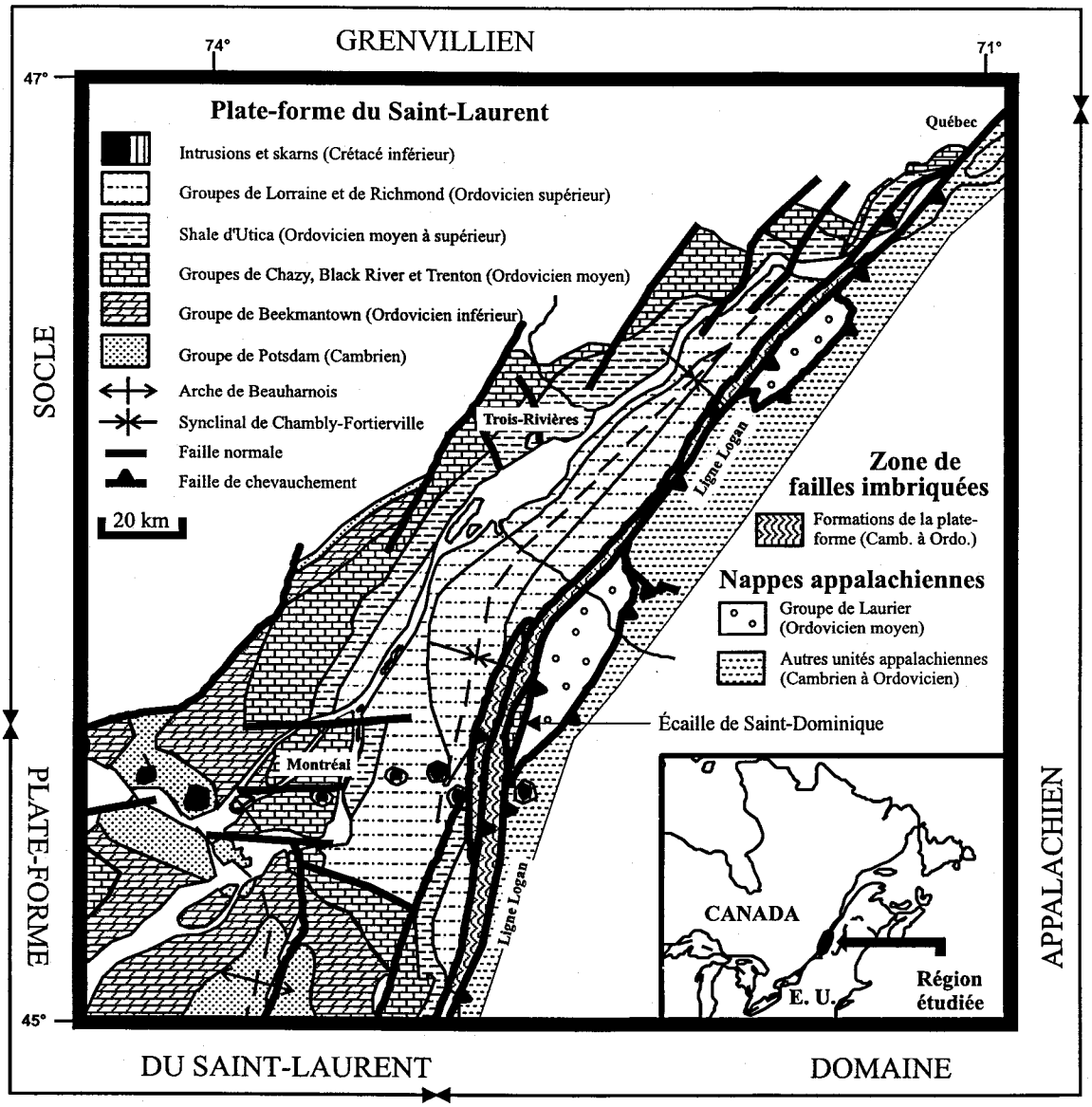


Figure 1: Géologie générale des Basses-Terres du Saint-Laurent. Figure adaptée de Héroux et Bertrand (1991).

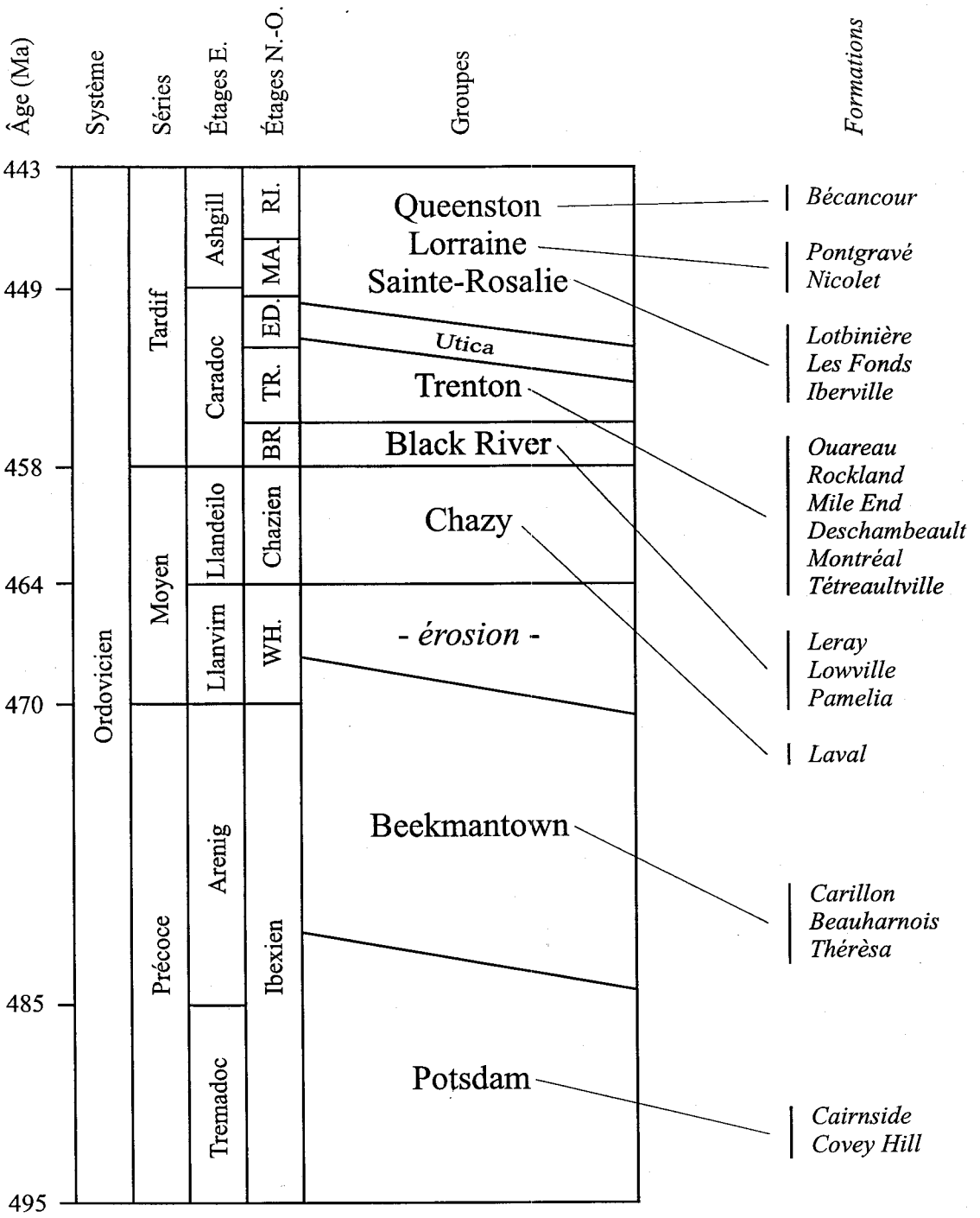
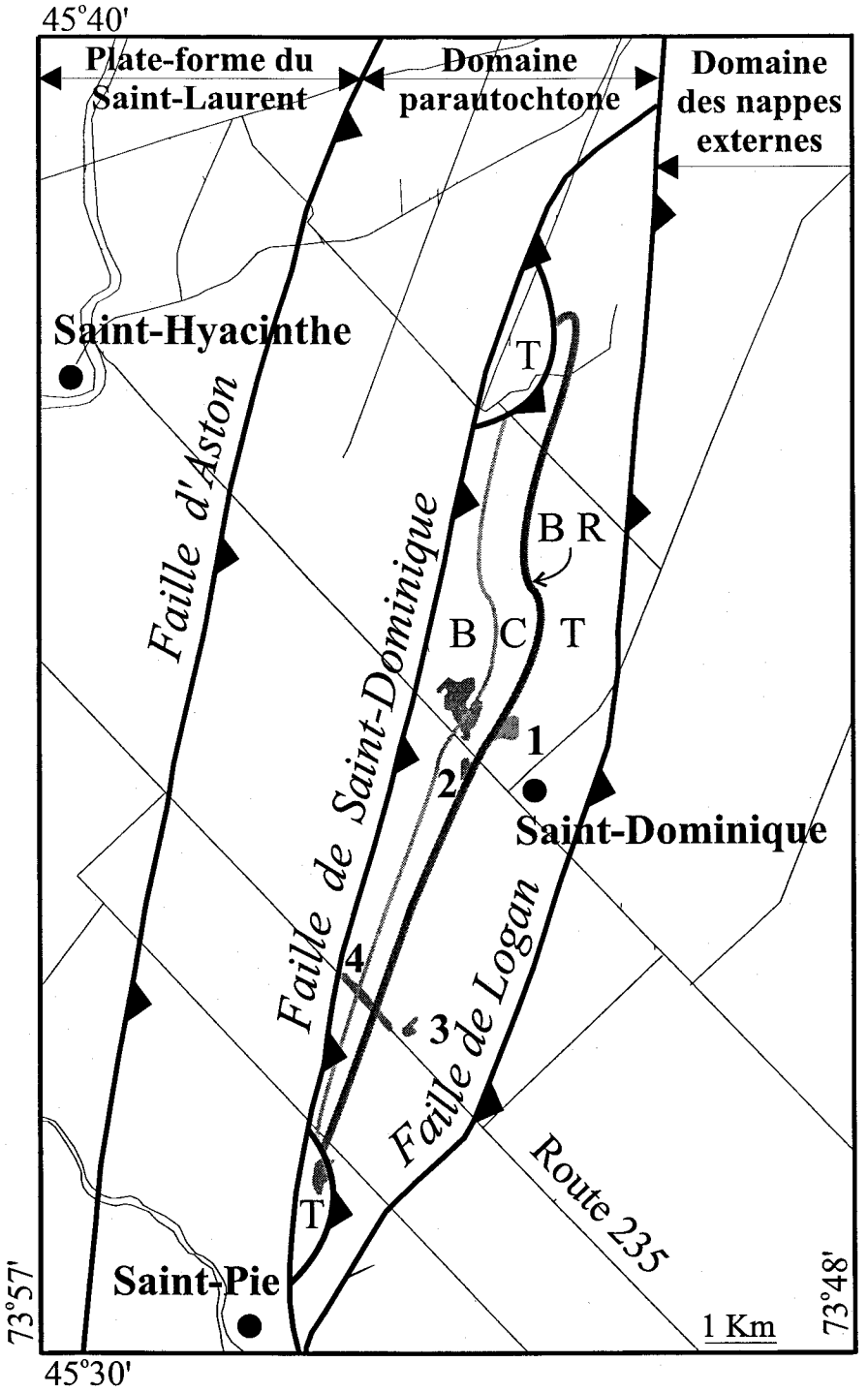


Figure 2: Stratigraphie de la plate-forme du Saint-Laurent pour la région de Montréal. E.: européens, N.-O.: nord-américains, WH.: Whiterockien, BR: Black Riverien, TR.: Trentonien, ED.: Edenien, MA.: Maysvillien, RI.: Richmondien. Figure adaptée de Lavoie (1994).



Affleurements visités: (1) Carrière Saint-Dominique (fig. 5A),
(2) et (3) carrières abandonnées (fig. 6A et 6B respectivement),
(4) coupe de la route 235 (fig. 5B).
Groupes: (B) Beekmantown, (C) Chazy, (B R) Black River, (T) Trenton.

Affleurements dans l'écaille de Saint-Dominique
● Ville et village
Route

Figure 3: Géologie de l'écaille de Saint-Dominique.
Figure adaptée de Chalaron et Malo (1998).

Nous nous sommes intéressés à l'écaille de Saint-Dominique (figure 3) parce qu'on y observe deux types de veines controversés : des veines parallèles au litage et des veines parallèles au front de l'orogène. Les veines parallèles au litage (VPL) sont de loin celles qui ont fait couler le plus d'encre. En dépit de nombreuses études dans le monde entier, il n'existe toujours aucun consensus sur les mécanismes qui président à leur formation, et il arrive même que deux auteurs tirent des conclusions opposées de l'examen des mêmes affleurements (Nicholson, 1995). Certains estiment que les VPL peuvent se former dans un contexte distensif très tôt dans l'histoire d'un bassin (Fitches *et al.*, 1986) ou par circulation tardive de fluides hydrothermaux (Mawer, 1987), mais la plupart des auteurs les associent systématiquement à un contexte tectonique en compression (figure 4). Le tableau 1 résume les différents mécanismes proposés dans la

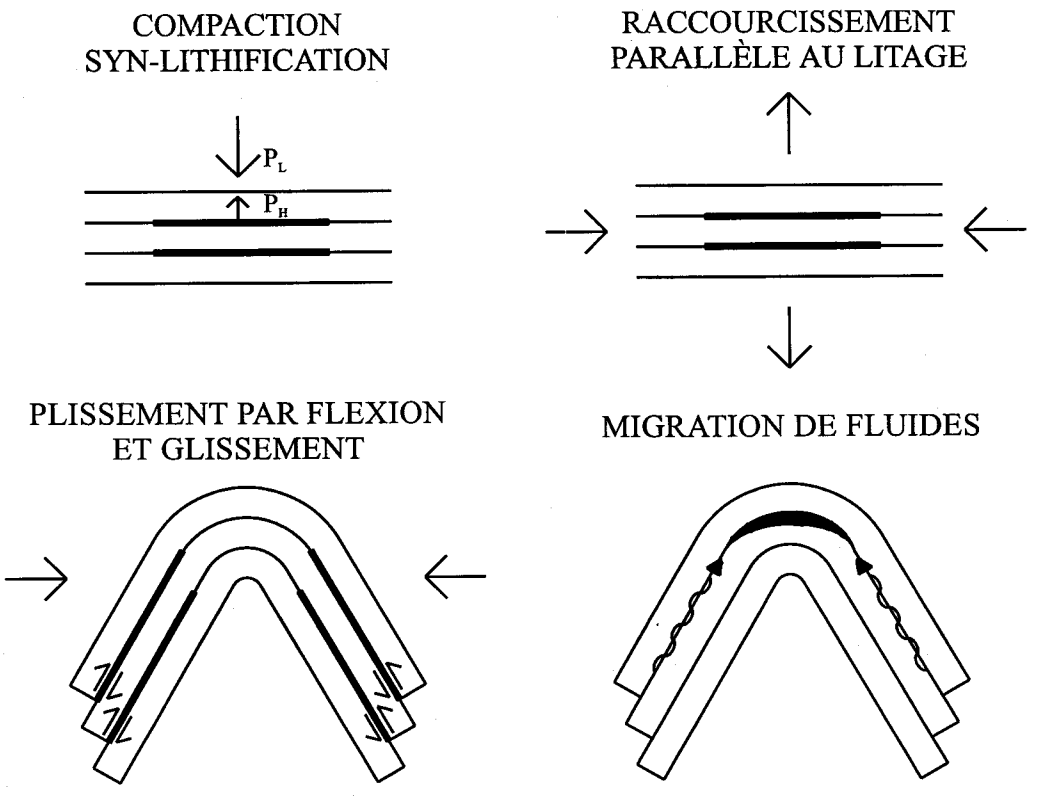


Figure 4: Principaux modèles de formation des VPL (adapté de Henderson, Wright et Henderson, 1989). P_L = pression lithostatique, P_H = pression hydrostatique.

Contexte	Chronologie		Mécanisme	Référence
Extension	Post-lithification, durant l'enfouissement		Accumulation d'eaux de formation sous des niveaux moins perméables et ouverture par fracturation hydraulique.	Fitches *et al.* (1986)
Compression	Pré-plissement, syn-clivage (RPL)	Réactivation durant le plissement	Développement de zones de surpression au cours du RPL dans les bancs imperméables non-lithifiés.	Henderson, Wright et Henderson (1986, 1989) Henderson et Henderson (1990)
			Développement de zones de surpression au cours du RPL dans les bancs imperméables.	Fyson (1986)
			Développement cyclique de zones de surpression hydraulique au cours du RPL.	Jessell, Willman et Gray (1994)
			Formation des veines lors du glissement développé parallèlement au litage à la faveur du RPL.	Windh (1995)
	Syn-chevauchement		Réactivation progressive des plans de glissement parallèles au litage.	Cosgrove (1993)
			Individualisation et connexion de petits pull-aparts dans les plats de duplex. Réactivation dans les plis de rampes.	Ohlmacher et Aydin (1995, 1997)
			Individualisation et connexion de fentes de tension parallèles au litage	Teixell, Durney et Arboleya (2000)
	Syn- à post-clivage (RPL), syn-plissement		Circulation des fluides et cimentation le long des plans de faiblesse développés lors du plissement par glissement et flexion.	Fowler (1996) Fowler et Winsor (1997) Tanner (1989, 1990) Ramsay et Huber (1987)
			Accumulation de fluides dans les charnières anticlinales au début du plissement.	Williams et Hy (1990)
	Post-clivage (RPL et de plan axial), tardi- à post-plissement		Les VPL sont le prolongement dans les flancs de plis de failles inverses qui coupent à travers les charnières de ces plis.	Cox *et al.* (1995)
Hydrothermalisme			Accumulation de fluides hydrothermaux dans les charnières anticlinales.	Mawer (1987)

Tableau 1 : Les différents mécanismes de formation des VPL (RPL = raccourcissement parallèle au litage).

littérature pour expliquer la formation des VPL. Certains auteurs reconnaissent aussi qu'une même veine peut être réactivée à la faveur de plusieurs mécanismes successifs (Ohlmacher et Aydin, 1995 et 1997; Windh, 1995) ou qu'un même affleurement peut contenir plusieurs populations de VPL formées à des moments différents par des mécanismes parfois incompatibles (Jessell, Willman et Gray 1994; Ohlmacher et Aydin, 1995 et 1997). La genèse des veines parallèles au front de l'orogène dans l'écaille de Saint-Dominique a été, quant à elle, associée tour à tour à la formation de failles normales tardives et postérieures au plissement (Prichonnet et Raynal, 1977), et à la réactivation de failles normales ancestrales lors de la migration du bombement périphérique en avant des nappes avant le plissement (Chalaron et Malo, 1998). Si l'hypothèse de Chalaron et Malo est valide, on peut se demander s'il existe un lien entre les veines parallèles au front et les VPL, et si ces dernières se sont formées à la faveur des mêmes contraintes normales qui auraient présidé à la formation des premières. La complexité de l'histoire tectonique de l'écaille de Saint-Dominique laisse en outre présumer que si des VPL se sont formées de façon précoce dans l'histoire du bassin, elles ont pu être réactivées tout au long de l'histoire de l'écaille et ont donc conservé la trace de plusieurs mécanismes. Il n'est donc pas possible d'appliquer ici l'un ou l'autre des modèles suggérés dans la littérature : une étude minutieuse des caractères et de la déformation des VPL est donc nécessaire.

1.2 Objectifs

Nous proposons de caractériser la structure, la microstructure, la pétrographie et la géochimie ($\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$) des veines que l'on retrouve dans quatre affleurements très bien exposés de l'écaille de Saint-Dominique (figure 3). Une attention particulière sera apportée à l'étude des mécanismes qui ont présidé à la formation des VPL et des veines parallèles au front de l'orogène.

Notre objectif est d'évaluer comment et jusqu'à quel point l'analyse des veines peut contribuer à améliorer la compréhension des mécanismes de déformation et la connaissance de l'histoire structurale de l'écaille de Saint-Dominique. La possibilité de déceler des indices d'extension de la plate-forme avant son écaillage sera ainsi examinée et l'interprétation des structures sera confrontée à l'histoire tectonique, diagénétique et

thermique de la zone de failles imbriquées telle qu'on la conçoit aujourd'hui.

1.3 Méthodologie

Un problème d'analyse structurale se résout en principe au moyen d'observations structurales. Ici le remplissage des fractures est également exploité, de sorte qu'il devient possible d'obtenir des informations sur l'histoire de la déformation à partir de la pétrographie et de la géochimie des ciments des veines.

L'examen structural des affleurements permettra de caractériser différentes familles de veines et de failles sur la base de leur orientation et des relations de recoupement, l'examen pétrographique et géochimique des ciments viendra ensuite raffiner ces observations en permettant de distinguer des variations dans la nature du fluide parent au sein d'une même famille structurale.

1.3.1 Analyse structurale et pétrographique

L'attitude du litage et de tous les éléments structuraux observés le long des affleurements n° 1 à 4 a été reportée sur des stéréogrammes. Les relations de recoupement et les indicateurs cinématiques ont fait l'objet d'une attention particulière afin de reconnaître des subdivisions au sein des familles de veines de même orientation, et afin d'établir l'histoire structurale de la région.

Les failles et les veines ont ensuite fait l'objet d'une étude pétrographique au microscope optique et par cathodoluminescence qui a permis d'identifier différentes phases de ciments ainsi que les relations chronologiques entre ces phases. Les échantillons ont été testés à l'Alizarin rouge S et au ferricyanure de potassium afin de vérifier la présence de magnésium et de fer dans les carbonates. L'analyse de la luminescence a été réalisée sous un vide de 10 millitorr avec une tension de 13 Kv et une intensité de 0,5 mA. La description des ciments épouse la nomenclature et la systématique proposées par Savard et Bourque (1989).

La terminologie la plus couramment employée pour décrire des réseaux de

fractures symétriques par rapport aux plis est celle de Turner et Weis (1963), qui utilise un repère orthogonal *abc*. Dans l'écaille de Saint-Dominique, la problématique associée aux veines parallèles aux axes de plis repose sur le fait que ces veines ont pu se former avant, pendant, ou après le plissement, et peuvent être liées à des failles normales ancestrales, au plissement, ou encore à la relaxation des contraintes après la compression. Cette terminologie ne sera pas employée tant que la formation des veines n'a pas été clairement associée au plissement.

Par ailleurs, dans des zones où l'orientation des structures tectoniques est relativement constante comme c'est le cas dans les zones de failles imbriquées, il peut être profitable d'étudier la fracturation à une échelle plus grande que celle d'un seul pli. Vann, Graham et Hayward (1986) ont introduit une terminologie très simple qui permet de rapporter les fractures à la direction générale du front orogénique et qui fait référence à des « fractures parallèles ou perpendiculaires au front de l'orogène ». Ceci permet en outre d'observer comment la fracturation se développe dans l'avant-pays peu déformé par rapport au domaine allochtone, ainsi que la relation entre les systèmes de fractures et les chevauchements. Il sera donc fait référence aux veines étudiées en termes de « veines parallèles ou perpendiculaires au front orogénique » lorsque celles-ci sont respectivement sub-parallèles ou sub-perpendiculaires aux plis et aux failles directionnelles.

De nombreux termes ont été proposés pour faire référence aux VPL, et elles sont même considérées comme des failles parallèles au litage lorsqu'elles sont associées à des duplex (Ohlmacher et Aydin, 1995). Ces termes ayant souvent un caractère génétique plutôt que descriptif, l'expression « veine parallèle au litage », ou VPL, leur est préférée ici. Il convient de noter enfin que le mot « clivage » est ici employé au sens de Ramsay et Huber (1987a), et correspond à la « schistosité » de Gidon (1987).

1.3.2 Analyse isotopique

Les analyses ont été réalisées au sein du Laboratoire de géochimie isotopique Delta Lab de la Commission Géologique du Canada (CGC-Québec). Les échantillons de poudre à analyser (0,3 mg au minimum) ont été sélectionnés d'après l'étude des lames minces en microscopie optique et en cathodoluminoscopie. Les ciments présentant des

évidences de recristallisation (texture composite) ont été écartés de l'analyse isotopique chaque fois que cela a été possible. Les échantillons de poudre ont été obtenus par micro-forage sur les contreparties des lames minces préalablement polies, lavées à l'eau « des-ionisée » et séchées à l'étuve. La qualité de l'échantillonnage a ensuite été vérifiée minutieusement par examen en cathodoluminescence de la position des prélèvements sur les contreparties. Un grand soin a été apporté à la manipulation des échantillons de poudre avant l'extraction, et leur manipulation sur la rampe d'extraction des gaz a été faite sous vide afin d'éviter toute contamination par le CO_2 atmosphérique. Le carbone et l'oxygène à doser ont été extraits sous forme de CO_2 par digestion à l'acide orthophosphorique à 100 % à 25°C pendant plus de douze heures, afin que la réaction soit la plus complète possible ($CaCO_3 + H_3PO_4 \leftrightarrow CaHPO_4 + CO_2 + H_2O$; Hoefs, 1987). L'analyse a ensuite été conduite sur un spectromètre de masse de type SIRA-12.

Le standard international utilisé est une nouvelle calcite calibrée relativement à la Belemnite de la Formation de Pee Dee (PDB). Les résultats $\delta^{18}O$ et $\delta^{13}C$ sont donc normalisés par rapport au Vienna PDB (VPDB) : le marbre NBS-19. Le lecteur intéressé à convertir ces résultats par rapport au Standard Mean Ocean Water (SMOW) pourra utiliser l'équation suivante :

$$\delta_{SMOW} = 1{,}03086 * \delta_{PDB} + 30{,}86 \text{ ‰}.$$

La qualité des résultats a été vérifiée régulièrement en répétant l'analyse de certains échantillons (un sur dix), la comparaison des résultats permettant d'établir le degré de reproductibilité de la technique au sein du laboratoire. La précision a toujours été meilleure que 0,13 ‰ (avec une exception à 0,25 ‰) pour $\delta^{18}O_{PDB}$ et à 0,05 ‰ pour $\delta^{13}C$. Les appendices A et B présentent respectivement la liste des analyses en PDB et les erreurs réelles et statistiques.

1.3.3 La représentativité des affleurements et des échantillons

Le problème de la représentativité des affleurements mérite d'être soulevé quand il est question d'étudier un phénomène de déformation. On peut concevoir en effet que les zones les plus intensément fracturées sont aussi les plus sujettes à l'érosion : ces affleurements sont plus souvent que les autres inutilisables car trop friables ou recouverts

par des horizons de sol ou du ravinement. Les affleurements disponibles ne reflètent donc souvent qu'une partie de la déformation. Ceci risque aussi de masquer certaines familles de fractures par manque d'affleurements ou de clarté dans les relations de recoupement observées. Ce problème est en grande partie levé dans le cas de la présente étude puisque les affleurements ont été choisis le long d'une coupe de route et d'un front de taille de carrière. Le jeu de l'érosion est ainsi réduit au minimum. Les quatre affleurements ont en outre été choisis pour la qualité de leur exposition, leur accessibilité, leur orientation sub-perpendiculaire aux structures dominantes de l'écaille et leurs dimensions (plus de 900 m^2 et plus de 5500 m^2 en surfaces verticales pour les affleurements n° 1 et 4 respectivement).

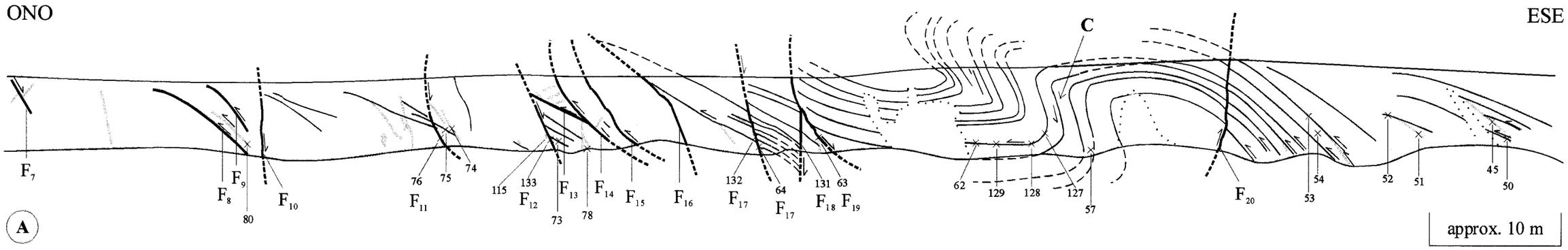
Il faut aussi questionner la représentativité des veines étudiées et des échantillons choisis. Une bonne répartition géographique et stratigraphique permet de cerner au mieux la variabilité qui peut exister au sein d'une même famille de veines et aussi tout au long d'une même veine. On s'attachera donc à échantillonner une famille de veines sur la plus grande aire d'affleurement possible, et à échantillonner une même veine en plusieurs endroits sur la plus grande longueur possible. Ce dernier point est d'ailleurs problématique, dans la mesure où très peu de veines, ici, offrent la possibilité d'un tel échantillonnage, à l'exception des VPL. L'analyse d'un seul échantillon par veine peut constituer une faiblesse importante de cette étude.

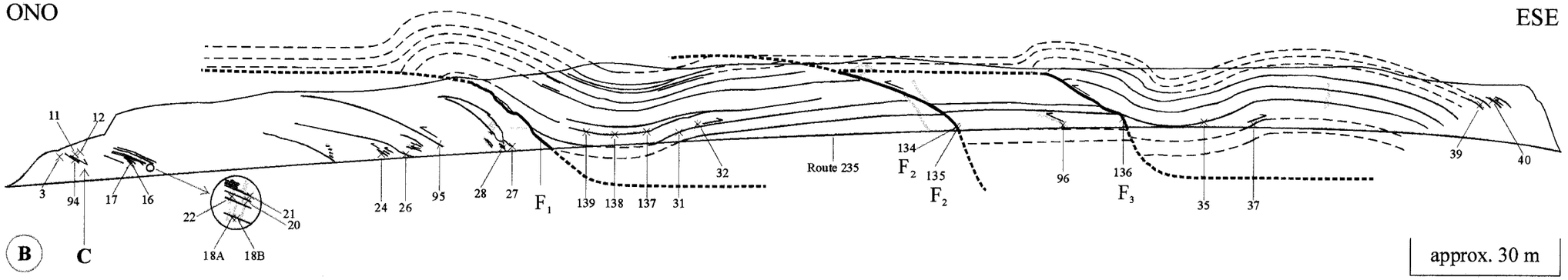
Par ailleurs, l'intrusion d'un dyke mésozoïque dans les roches du Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique (figure 5) a pu entraîner la recristallisation des ciments. Le degré de préservation de ces échantillons est donc contrôlé en les comparant avec ceux prélevés dans le Groupe de Trenton qui affleure au long de la Route 235.

1.4 Géologie régionale

1.4.1 Les zones tectonostratigraphiques

Quatre zones tectonostratigraphiques sont présentes dans le sud du Québec (figure 1). Du nord-ouest vers le sud-est on reconnaît tour à tour le socle grenvillien, la plate-forme du Saint-Laurent, le domaine allochtone des Appalaches et finalement la ceinture de Gaspé.





Veine parallèle au litage

Veine d'extension ou de cisaillement

Faille F_{15}

Dyke

27 Échantillon pour analyse isotopique

C Sens de cisaillement incompatible avec le plissement par glissement et flexion

Figure 5: Principaux éléments structuraux de l'affleurement 1, dans la Carrière Saint-Dominique (A) et de l'affleurement 4, le long de la route 235 (B). Le dyke est orienté parallèlement à la paroi de l'affleurement 1. Son relief sur la paroi lui donne une allure plissée.

par des horizons de sol ou du ravinement. Les affleurements disponibles ne reflètent donc souvent qu'une partie de la déformation. Ceci risque aussi de masquer certaines familles de fractures par manque d'affleurements ou de clarté dans les relations de recoupement observées. Ce problème est en grande partie levé dans le cas de la présente étude puisque les affleurements ont été choisis le long d'une coupe de route et d'un front de taille de carrière. Le jeu de l'érosion est ainsi réduit au minimum. Les quatre affleurements ont en outre été choisis pour la qualité de leur exposition, leur accessibilité, leur orientation sub-perpendiculaire aux structures dominantes de l'écaille et leurs dimensions (plus de 900 m^2 et plus de 5500 m^2 en surfaces verticales pour les affleurements n° 1 et 4 respectivement).

Il faut aussi questionner la représentativité des veines étudiées et des échantillons choisis. Une bonne répartition géographique et stratigraphique permet de cerner au mieux la variabilité qui peut exister au sein d'une même famille de veines et aussi tout au long d'une même veine. On s'attachera donc à échantillonner une famille de veines sur la plus grande aire d'affleurement possible, et à échantillonner une même veine en plusieurs endroits sur la plus grande longueur possible. Ce dernier point est d'ailleurs problématique, dans la mesure où très peu de veines, ici, offrent la possibilité d'un tel échantillonnage, à l'exception des VPL. L'analyse d'un seul échantillon par veine peut constituer une faiblesse importante de cette étude.

Par ailleurs, l'intrusion d'un dyke mésozoïque dans les roches du Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique (figure 5) a pu entraîner la recristallisation des ciments. Le degré de préservation de ces échantillons est donc contrôlé en les comparant avec ceux prélevés dans le Groupe de Trenton qui affleure au long de la Route 235.

1.4 Géologie régionale

1.4.1 Les zones tectonostratigraphiques

Quatre zones tectonostratigraphiques sont présentes dans le sud du Québec (figure 1). Du nord-ouest vers le sud-est on reconnaît tour à tour le socle grenvillien, la plate-forme du Saint-Laurent, le domaine allochtone des Appalaches et finalement la ceinture de Gaspé.

La plate-forme du Saint-Laurent, constituée de roches cambro-ordoviciennes (figure 2) est limitée par des failles normales, au nord-est, et inverses, au sud-ouest. Le domaine allochtone est constitué de roches cambro-ordoviciennes qui ont enregistré l'édification et la destruction de la marge passive de Laurentia (la zone de Humber) et du domaine océanique de Iapetus (la zone de Dunnage). La zone de Humber externe est en contact tectonique avec la plate-forme du Saint-Laurent au nord-ouest, le long de la Ligne de Logan, et avec la zone de Humber interne au sud-est, le long de la faille de Richardson ou son équivalent. La zone de Humber interne est séparée de la zone de Dunnage au sud-est par la Ligne Baie Verte-Brompton. Enfin les roches d'âges Silurien et Dévonien de la ceinture de Gaspé reposent sur les roches de la zone de Dunnage selon un contact discordant ou tectonique (faille de La Guadeloupe).

Les orogenèses taconienne (Ordovicien moyen à tardif) et acadienne (Dévonien moyen) ont dominé l'histoire tectonique des Appalaches dans le sud du Québec (St-Julien et Hubert, 1975). Les roches de la zone de Humber externe sont principalement affectées par les déformations taconiennes, tandis que celles de la zone interne ont connu une superposition des orogenèses taconienne et acadienne. La zone de Humber interne est également affectée par des rétrochevauchements et des mouvements normaux tardi-taconiens au Silurien (Castonguay *et al.*, 1997). La déformation des roches de la zone de Dunnage et du bassin successeur de Gaspé est reliée à l'orogenèse acadienne. Enfin au Mésozoïque les intrusions montérégiennes se mettent en place au sein de la zone de Humber.

1.4.2 La stratigraphie de la plate-forme du Saint-Laurent

Le lecteur intéressé à lire une description précise des caractères lithologiques de chacun des groupes présents dans la plate-forme du Saint-Laurent (figure 2) pourra se référer à Globensky (1987). Des études beaucoup plus fines sont aussi disponibles pour les groupes de Beekmantown (Bernstein, 1992) et de Trenton (Lavoie, 1994). Seuls les groupes de Beekmantown, de Chazy, de Black River et de Trenton ont été visités lors de nos travaux : le lecteur trouvera donc ci-dessous un résumé de leurs principaux faciès tels que les ont observés Clark (1964) et Prichonnet et Raynal (1977) dans l'écaille de Saint-

Dominique.

1.4.2.1 Le Groupe de Beekmantown

Les affleurements du Groupe de Beekmantown décrits par Clark (1964) représentent une seule formation, appelée Formation de Beldens (Cady, 1945). La séquence stratigraphique qu'il décrit à l'écaille de Saint-Dominique ne comprend pas le contact entre les groupes de Beekmantown et de Chazy, bien qu'il suppose son existence. La limite inférieure du Groupe de Beekmantown n'est pas observée non plus, et elle est très vraisemblablement absente en surface puisque le Groupe de Potsdam n'affleure nulle part. Les calcaires dominent à la base (avec quelques interlits dolomitiques) et passent graduellement à une alternance de lits calcaires et dolomitiques (avec de plus en plus de dolomies vers le sommet).

D'après ces indices, il semble que les affleurements du Groupe de Beekmantown connus dans l'écaille de Saint-Dominique correspondent aux termes supérieurs de ce groupe : formations de Beauharnois ou de Carillon selon Bernstein (1992). Il est à noter toutefois que le terme argileux de l'alternance calcaire-dolomie-shale décrite par Bernstein (1992) au sommet du Carillon n'est jamais mentionné ici.

1.4.2.2 Le Groupe de Chazy

Clark (1964) reconnaît deux membres dans le Groupe de Chazy : le Grès de Saint-Dominique à la base, qui passe graduellement au Membre du Calcaire de Saint-Dominique. Le premier est un grès à grains fins avec quelques passées plus calcareuses et des bancs de calcaires et de shales siliceux. Le dernier est très fossilifère, essentiellement massif et cristallin, parfois interstratifié avec de la dolomie et du calcaire dolomitique, et est de plus en plus dolomitique vers le sommet. Prichonnet et Raynal (1977) observent aussi le contact entre les groupes de Beekmantown et de Chazy. Celui-ci est concordant, peut-être érosif.

1.4.2.3 Le Groupe de Black River

Clark (1964) reconnaît trois formations lithologiquement comparables aux dolomies et aux calcaires cristallins et oolithiques décrits dans la plate-forme du Saint-Laurent par Globensky (1987) pour les formation de Pamelia, Lowville et Leray. L'absence de fossiles empêche malheureusement de relier avec certitude les formations de l'écaille à celles des Basses-Terres. Clark (1964) ne décrit pas la karstification signalée par Lavoie (1994) au sommet des roches du Groupe de Black River dans le reste de la plate-forme du Saint-Laurent.

1.4.2.4 Le Groupe de Trenton

Clark (1964) reconnaît le contact entre la Formation de Leray du Groupe de Black River et des roches appartenant probablement aux formations de Mile End et de Deschambeault du Groupe de Trenton. Au-dessus, il décrit la Formation de Montréal, dont la lithologie ressemble à celle de la Formation de Tétreaultville mais qu'il rattache cependant à la première sur la base des faunes observées. Les dernières strates décrites ne sont attribuées à aucune formation. Elles sont régulièrement rubanées avec des lits fins de calcaires cristallins pâles alternant avec des lits plus minces de calcaires non-cristallins ou argileux plus foncés. Sur la base d'observations lithologiques, Prichonnet et Raynal (1977) attribuent à la Formation de Tétreaultville les dernières couches décrites par Clark (1964).

1.4.3 La zone de Humber externe et le domaine parautochtone

À la limite entre le domaine autochtone de la plate-forme du Saint-Laurent et le domaine allochtone de la zone de Humber, on reconnaît un certain nombre d'écailles arrachées à la plate-forme et qui constituent le domaine parautochtone, ou domaine de failles imbriquées (St-Julien, Slivitsky et Feininger, 1983). À l'affleurement, il s'agit, du nord-est vers le sud-ouest, des écailles de Sainte-Pétronille et de La Pointe-de-Lévy, d'Upton, de Saint-Dominique, et de Phillipsburg. En profondeur, des sondages révèlent

l'existence de plusieurs autres écailles (sondages de Saint-Flavien #4 et #8, de Notre-Dame-Du-Bon-Conseil #185, de Du-Chêne #1, de Saint-Simon #152, Ministère des Richesses Naturelles, 1974). Les données de forages révèlent que tous les groupes stratigraphiques de la plate-forme sont représentés au sein de ces écailles, depuis le Groupe de Potsdam jusqu'au Groupe de Lorraine, et qu'il existe de nombreuses répétitions tectoniques dans les écailles elles-mêmes. Ceci laisse à penser que les mêmes mécanismes qui ont contrôlé la mise en place des nappes ont aussi présidé à celle des écailles. L'originalité de ces écailles par rapport aux nappes réside donc surtout dans leur histoire, puisqu'elles ont enregistré non seulement le style de déformation dominant dans la zone de Humber externe, mais aussi l'histoire de la sédimentation, de la diagenèse et de la déformation de la plate-forme jusqu'à son écaillage.

La zone de Humber externe est un domaine de nappes dans lesquelles on retrouve des unités tectonostratigraphiques ayant des caractères sédimentaires, stratigraphiques et structuraux distincts de ceux de la plate-forme. Chaque unité est séparée des autres par des plans de chevauchement majeurs.

Le qualificatif de « nappe » introduit par St-Julien et Hubert (1975) pour ces unités ne sert plus à souligner un mode de mise en place par glissement gravitaire comme on le pensait alors, mais a été conservé pour illustrer l'importance des différences que l'on observe d'une unité à l'autre, et qui rendent les corrélations difficiles. On admet aujourd'hui que le mode de mise en place des unités correspond à l'empilement de nappes de charriage en séquence, les unités les plus vieilles se retrouvant au sommet et les plus jeunes à la base de l'empilement (Stanley et Ratcliffe, 1985). Seule la Nappe de la Chaudière pourrait encore être interprétée comme une nappe de gravité. L'attitude des éléments structuraux (plis, failles et clivage) est constante au sein de chaque nappe mais varie d'une nappe à l'autre, ce qui fait dire à St-Julien et Hubert (1975) que chacune a été déformée indépendamment des autres au moment de sa mise en place. Il n'entre pas dans le cadre de la présente étude de décrire plus avant chacune des nappes. Le lecteur peut se référer à Slivitzky et St-Julien (1987) pour une description de la lithologie et une simplification de la nomenclature de ces nappes, à St-Julien et Hubert (1975) pour une description de la déformation au sein de chaque nappe et à Lebel et Kirkwood (1998)

pour une présentation des nappes autour de la ville de Québec.

1.4.4 L'évolution tectonique et paléoenvironnementale de la plate-forme du Saint-Laurent et de la zone de Humber externe

Le continent Laurentia (socle grenvillien) est affecté par une tectonique en distension au Précambrien tardif, qui marque l'ouverture de l'océan Iapetus. L'assemblage stratigraphique de la plate-forme du Saint-Laurent, qui se développe sur sa marge, reflète un cycle de trangression-régression majeur (Globensky, 1987) entre l'ouverture de l'océan (Précambrien tardif à Cambrien précoce) et sa fermeture (Ordovicien tardif à Silurien précoce). Plusieurs cycles de plus faibles amplitudes se superposent à celui-ci.

La même séquence de sédimentation est corrélative depuis l'Ontario jusqu'à Terre-Neuve, mais l'irrégularité de la marge et la tectonique en horsts et grabens qui se perpétue à travers toute la colonne stratigraphique depuis le Cambrien font que les puissances des séries varient latéralement et que les événements sont enregistrés de façon diachronique entre les différentes plates-formes et même à l'échelle d'une seule plate-forme.

Au Cambrien tardif, se déposent les grès du Groupe de Potsdam, dont la base est soulignée par des grès fluviatiles de la Formation de Covey Hill discordants sur le Précambrien, auxquels succède la Formation de Cairnside. L'environnement de dépôt est de plus en plus marin et deltaïque, et la sédimentation du groupe est arrêtée par un épisode régressif.

À l'Ordovicien précoce et moyen, l'établissement d'une plate-forme marine en concordance sur le Groupe de Potsdam et en discordance sur le bouclier grenvillien marque le début d'une trangression d'origine eustatique (Bernstein, 1992). Le premier groupe à se déposer est celui de Beekmantown, qui correspond à un environnement marin peu profond. Un épisode de régression-transgression se superpose ensuite à l'effet du bombement périphérique en avant des nappes (Jacobi, 1981, Quinlan et Beaumont, 1984; Bradley et Kusky, 1986). L'effet cumulé est enregistré très loin du front orogénique, au-delà de l'Arche de Beauharnois (figure 1), sous la forme d'une discordance entre les

groupes de Beekmantown et de Chazy (Dix et Molgat, 1998; Dix, Robinson et McGregor, 1998). Cette discordance marque aussi la limite entre les séquences de Sauk et Tippecanoe. Le Groupe de Black River sus-jacent est en contact transitionnel avec le Groupe de Chazy et indique des conditions lagunaires littorales à supratidales. Lorsque la subsidence devient suffisamment importante, le Groupe de Trenton commence à se déposer – en concordance ou non – sur les roches du Groupe de Black River. Latéralement et au-dessus du Groupe de Trenton (transition abrupte ou graduelle), le Shale d'Utica se dépose dans un milieu marin profond. Il est constitué d'argiles issues de l'érosion de la chaîne appalachienne au sud, et non plus de sédiments provenant du craton comme c'était le cas pour les groupes précédents. Le Shale d'Utica marque donc le début de l'influence de l'orogenèse taconienne.

À l'Ordovicien tardif, la régression finale débute et le bassin se comble. On observe d'abord une séquence de flysch syn-orogénique avec le Groupe de Sainte-Rosalie. Le Groupe de Lorraine sus-jacent, qui est aussi un flysch, souligne le comblement final du bassin. Il est en contact transitionnel avec le Shale d'Utica et la Formation de Lotbinière (Groupe de Sainte-Rosalie). Le Groupe de Queenston (faciès molassique) est le dernier à se déposer sur la plate-forme à l'Ordovicien tardif.

La collision entre le continent Laurentia et des arcs volcaniques crée une chaîne taconienne d'avant-pays dont les nappes recouvrent et inversent une partie de la plate-forme du Saint-Laurent (définissant ainsi le domaine parautochtone). La limite entre la plate-forme autochtone peu déformée et les nappes est matérialisée par la Ligne de Logan dans les Appalaches du Québec, mais localement l'érosion a fait reculer cette ligne au-delà du parautochtone, de sorte que la limite entre les Appalaches et les Basses-Terres est matérialisée par la faille de Saint-Dominique dans la région étudiée.

L'orogenèse taconienne est le seul épisode dans l'histoire des Appalaches du Québec qui ait affecté de façon significative les roches cambro-ordoviciennes de la plate-forme et de la zone de Humber externe (Tremblay et Pinet, 1994). Les études géochronologiques de Castonguay *et al.* (1997) révèlent que la zone de Humber interne a quand à elle enregistré des rétrochevauchements et des mouvements normaux au Silurien. Cet épisode peut être interprété soit comme tardi-taconien, soit comme la conséquence de

l'épaississement crustal associé à l'orogenèse taconienne.

Le Dévonien basal n'affleure nulle part excepté dans la brèche de l'Île Sainte-Hélène à Montréal. L'existence de cette brèche indique qu'il y a eu sédimentation marine à cette époque, mais ne renseigne pas sur l'étendue géographique du Dévonien ni sur sa continuité stratigraphique avec les dépôts ordoviciens.

Au Dévonien moyen, un nouvel épisode orogénique survient à la faveur de la collision entre Gondwana et Laurentia : c'est l'orogenèse acadienne, dont l'influence ne va pas au-delà de la zone interne de Humber (Tremblay et Pinet, 1994). Vers la fin du Permien et au début du Trias, un nouvel épisode distensif survient lors de la séparation de l'Amérique du Nord avec l'Afrique. Au Jurassique, l'ouverture de l'océan Atlantique réactive certaines fractures lithosphériques auxquelles on associe les intrusions montérégiennes du Crétacé précoce et les filons-couches et dykes associés. L'encaissant sédimentaire est métamorphisé sur quelques centaines de mètres autour de ces intrusions.

CHAPITRE 2
LITHOSTRATIGRAPHIE DE L'ÉCAILLE DE SAINT-DOMINIQUE

2.1 Le Groupe de Beekmantown

Ce groupe affleure le long de la Route 235 (affleurement n° 4, figures 3, 5B et 6B). Le faciès dominant est un calcaire micritique gris-clair à gris-foncé à patine grise ou orangée, accompagné moins de 20 % de bioclastes et de moins de 10 % de ciment calcitique. Ce dernier se retrouve essentiellement dans les bioclastes et dans la matrice, sous forme de microsparite. La coloration des échantillons macroscopiques par l'Alizarin rouge S et le ferricyanure de potassium a révélé la présence de quartz et le caractère magnésien des calcaires (coloration rouge-violacé), mais n'a pas permis de déceler la présence de dolomite. La cathodoluminescence, en revanche, a révélé l'existence de petits cristaux de dolomite euédriques zonés, fortement luminescents dans les tons rouges et jaunes. Le calcaire micritique et le ciment calcitique sont ternes et dans les tons orange-sombre. Les bioclastes sont ternes et dans les tons brun-orangé. Le quartz est fortement luminescent dans les tons bleus.

Interstratifié avec ce calcaire micritique, on observe également des bancs à calcaires coquilliers (bivalves) et oolithiques. Les oolithes sont rondes et d'un diamètre inférieur à 4 mm, ou ovoïdes, plus petites (dimensions inférieures à 2 mm) et dépourvues d'orientation préférentielle. Des bancs de calcarénite plus compétents servent localement de niveaux marqueurs et renferment de petites géodes de 1 à 3 mm de diamètre tapissées de cristaux de calcite. Les sulfures sont omniprésents dans les lames minces étudiées. Ils sont disposés en petits amas dans la matrice de façon aléatoire, ou sont concentrés dans les cavités à l'intérieur des bioclastes.

En parcourant l'affleurement d'ouest en est, il est possible de reconnaître une évolution dans la nature des faciès qui accompagnent le calcaire micritique sus-décrit. On observe au début de la coupe (extrémité ouest) une alternance de bancs dolomitiques, calcaires et gréseux. Les bancs de grès ont une matrice de quartz et de feldspath en grains

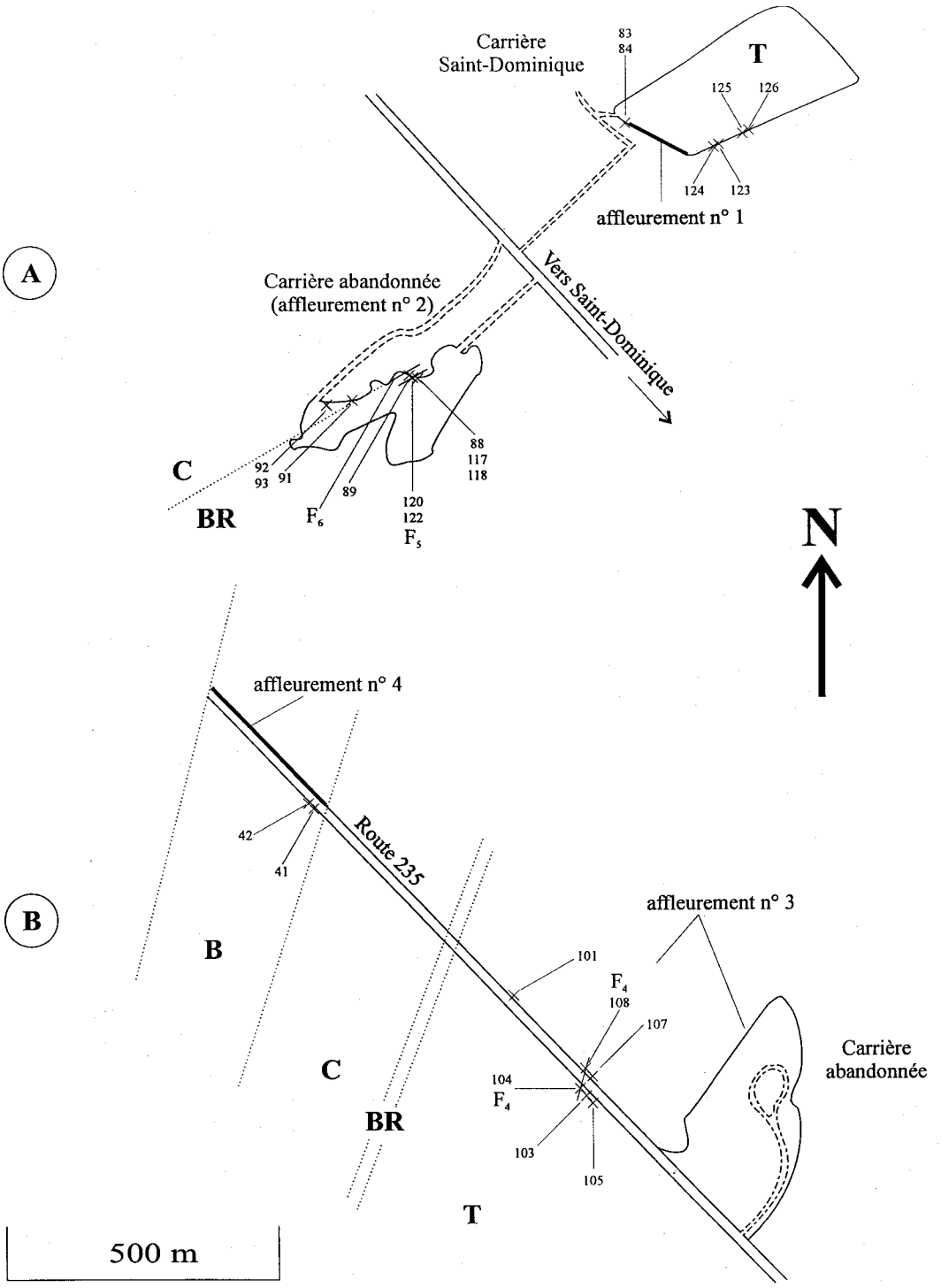


Figure 6: Localisation des échantillons prélevés dans les affleurements n° 2 (A) et 3 (B). B: Groupe de Beekmantown, C: Groupe de Chazy, BR: Groupe de Black River, T: Groupe de Trenton.

fins et arrondis, luminescents, et un ciment de quartz non-luminescent. Les bancs carbonatés contiennent parfois des laminites alguaires. Des cristaux euédriques de dolomite fortement luminescente dans les tons rouges accompagnent le ciment de quartz (1%). À mesure que l'on se déplace vers l'est, le quartz et la dolomite disparaissent au profit des faisceaux argileux anastomosés et disposés parallèlement au litage, et quelques niveaux à entroques et bryozoaires apparaissent à l'extrémité est de la coupe. Les failles inverses à vergence vers le nord-ouest qui traversent l'affleurement contribuent à masquer la puissance réelle des calcaires argileux de l'unité supérieure, mais l'évolution d'un faciès de moins en moins gréseux à un calcaire argileux a été préservée.

2.2 Le Groupe de Chazy

Les échantillons prélevés dans le Groupe de Chazy proviennent de la carrière abandonnée (affleurement n° 2, figures 3 et 6A). On y observe une microsparite à pelletoïdes avec des passées micritiques. Quelques cristaux de dolomite sont disséminés dans la matrice. La porosité de ces échantillons est visible à l'œil nu.

2.3 Le Groupe de Black River

Tous les échantillons prélevés dans le Groupe de Black River proviennent de la carrière abandonnée (affleurement n° 2, figures 3 et 6A). Ils sont de nature essentiellement calcaire, avec des passées gréseuses et des horizons de sulfures de quelques millimètres d'épaisseur. Les ciments sont non-luminescents.

2.4 Le Groupe de Trenton

Les affleurements de la Carrière Saint-Dominique et de la Route 235 (affleurements n° 1 et 3, figures 3, 5A et 6) sont caractérisés par une alternance régulière de bancs pluri-centimétriques de calcaires argileux et de mudstones. Ce litage semble être de nature stylolitique. Le calcaire argileux est gris-noir et comporte moins de 20 % d'allochèmes (oolithes, brachiopodes, coquilles univalves et entroques) flottants et

granoclassés. Ce pourcentage diminue progressivement jusqu'au sommet du banc où la transition avec le mudstone noir est progressive. Les cavités au coeur des coquilles sont dépourvues d'argiles et ne renferment que des cristaux de calcite euédriques et des sulfures.

La coloration des échantillons macroscopiques par l'Alizarin rouge S et le ferricyanure de potassium n'a pas révélé la présence de quartz ni de dolomite, et indique que la calcite n'est que faiblement magnésienne (couleur rouge sombre). L'examen des ciments en cathodoluminescence a mis en évidence la présence de petits cristaux euédriques de dolomite fortement luminescents. Ces cristaux montrent une zonation dans la luminescence : le coeur non-luminescent est entouré par un ciment fin et orange-sombre, et finalement par une bordure épaisse brun-orangé.

Un dyke de diabase (dolérite de couleur vert sombre) traverse l'affleurement dans sa partie est.

La finesse des bancs, la régularité de leur alternance et leur nature lithologique rappellent la description faite par Clark (1964) pour les niveaux supérieurs du Groupe de Trenton, et que Prichonnet et Raynal (1977) attribuent à la Formation de Tétreaultville.

CHAPITRE 3

ANALYSE STRUCTURALE DE L'ÉCAILLE DE SAINT-DOMINIQUE

L'écaille de Saint-Dominique est bordée par la faille de Saint-Dominique, à l'ouest, et la Ligne de Logan, à l'est (figure 3). Dans le sud du Québec la Ligne de Logan marque communément la limite entre les Appalaches et la plate-forme du Saint-Laurent mais dans la région de Saint-Dominique cette ligne n'est que la trace reculée de la limite avec la plate-forme. En dépit de sa localisation à l'ouest de la Ligne de Logan, l'écaille n'appartient donc pas au domaine autochtone. De l'ouest vers l'est, on rencontre successivement au sein de l'écaille les groupes de Beekmantown, de Chazy, de Black River et de Trenton (figure 3). Au-delà des deux failles sus-décrites, on retrouve au nord-ouest le domaine autochtone de la plate-forme du Saint-Laurent avec le Groupe de Sainte-Rosalie, et au sud-est la zone des nappes externes des Appalaches avec la Formation de Bourret du Groupe de Laurier et la Nappe de Granby (Groupe de Shefford).

Le relief reculé de la faille de Saint-Dominique est matérialisé par la crête dite de Saint-Dominique. Plusieurs hypothèses ont été émises quant à la nature de cette faille. S'appuyant sur sa proximité avec la Ligne de Logan, Clark (1964) est le premier à proposer une cinématique inverse et une vergence vers le nord-ouest. Kumarapeli (1969) s'appuie ensuite sur la proximité des failles normales mésozoïques associées au rift du Saint-Laurent pour l'interpréter comme une faille normale à pendage vers le sud-est. Prichonnet et Raynal (1977) proposent enfin une cinématique inverse et une vergence vers le nord-ouest à l'instar de Clark (1964), mais insistent aussi sur le redressement progressif du plan de faille vers l'avant du front orogénique (figure 7).

La structure de l'écaille correspond à un grand pli nord-est/sud-ouest, ennoyé à ses extrémités (figures 3 et 7), et auquel se superposent un grand nombre de failles directionnelles et de plis de plus faible amplitude (figures 3 et 7). Prichonnet et Raynal (1977) ont divisé l'écaille en trois domaines structuraux : la terminaison périclinale nord où les axes de plis sont orientés N028° à N057°, la terminaison périclinale sud où les axes

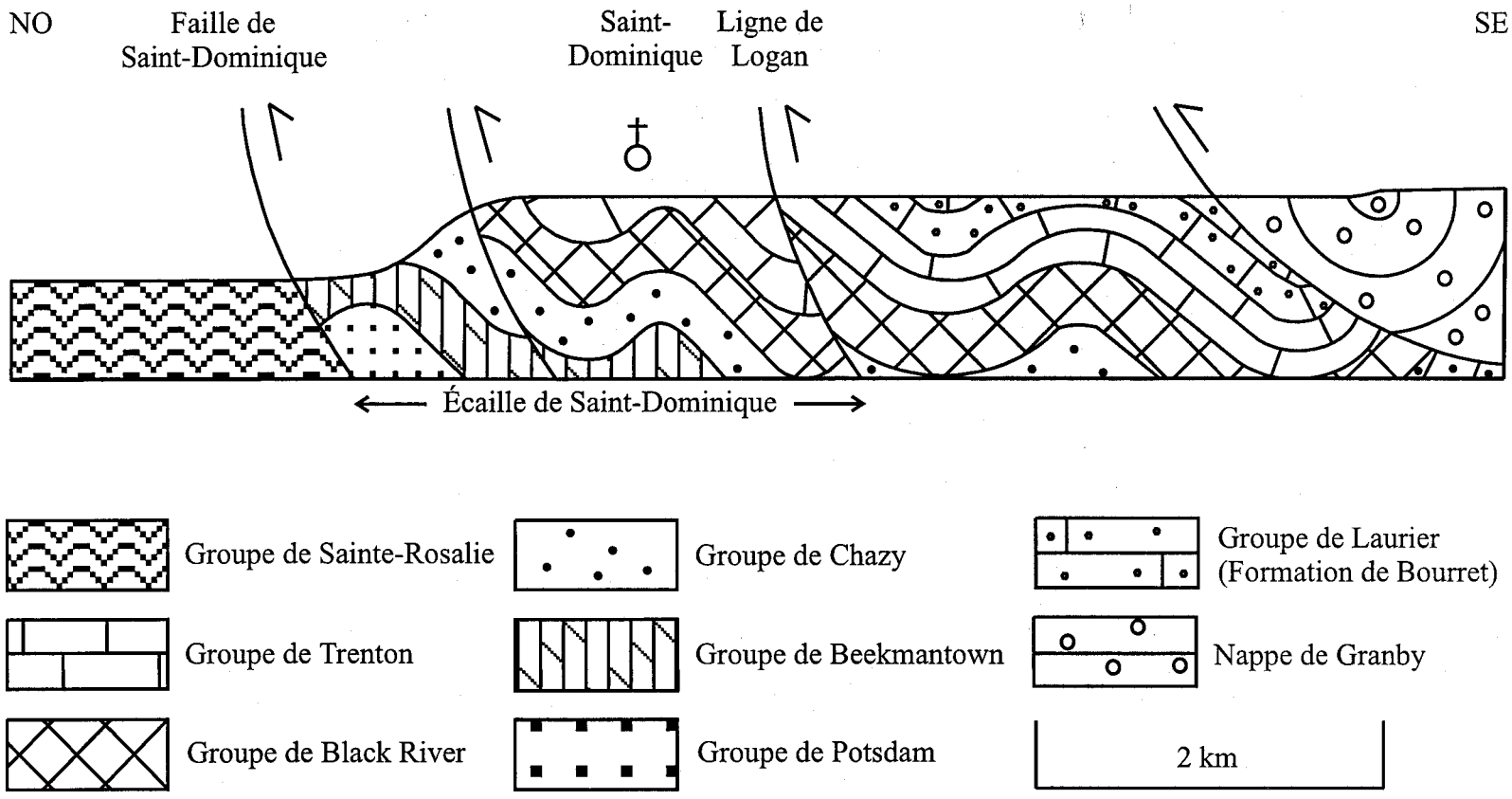


Figure 7: Coupe structurale dans l'écaille de Saint-Dominique (adaptée de Prichonnet et Raynal 1977).

de plis sont orientés N175° à N191°, et le domaine intermédiaire où les plongées axiales se font vers le nord-est (N015° à N026°) et vers le sud-ouest (N191° à N202°). Clark (1964) constate à l'affleurement un décalage des unités stratigraphiques, qu'il explique par le jeu de failles transversales nord-ouest/sud-est. Ces failles n'ont toutefois jamais été observées sur le terrain, et les travaux de Prichonnet et Raynal (1977) établissent l'existence de plis en échelon de dimensions variables, dont la présence permettrait d'expliquer le décalage apparent des unités sans nécessiter la présence des failles.

Le mode de plissement tel que le décrivent Prichonnet et Raynal (1977) est de type flexion et glissement (*flexural slip folding* selon Ramsay et Huber, 1987b) et se produit de façon discontinue. La première étape correspond selon ces auteurs à un cisaillement principal parallèle à la stratification, avec formation d'enduits inter-couches de calcite de recristallisation striés perpendiculairement à l'axe des plis (et appelées ici des VPL). Des plans de cisaillement directionnels, obliques par rapport à la stratification, apparaissent ensuite lorsque les plis deviennent déjetés ou déversés. Des failles directionnelles sont présentes, qui soulignent une variation du nord vers le sud dans l'orientation des structures de l'écaille. Prichonnet et Raynal (1977) signalent aussi un système de failles normales conjuguées définissant un petit graben dans une carrière abandonnée près de la Crête de Saint-Dominique. Ce graben ainsi que des fractures subverticales et des failles normales retrouvées en différents endroits de l'écaille illustreraient un événement distensif tardif, survenant à la fin du plissement ou après celui-ci.

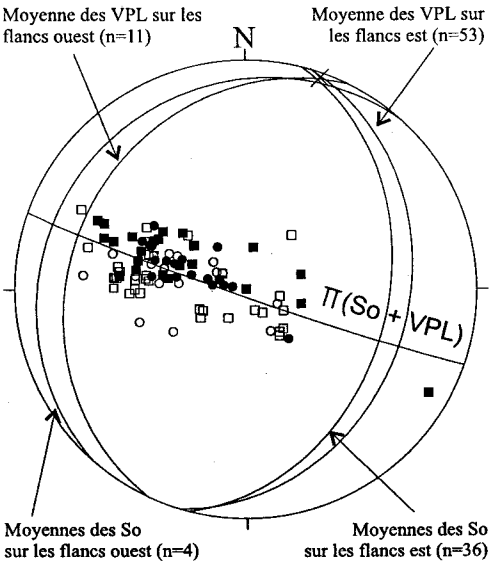
Chalaron et Malo (1998) proposent une révision de l'histoire structurale de l'écaille en suggérant une cinématique d'abord normale puis inverse pour certaines failles à fort pendage observées dans la Carrière Saint-Dominique et la coupe de la Route 235. Ces failles seraient au moins contemporaines de l'inversion tectonique, voire plus vielles encore, et les veines parallèles au front orogénique seraient très précoces, contemporaines du mouvement normal des failles avant leur inversion. Cet épisode distensif précoce est interprété comme la conséquence du passage du bombement périphérique sur la plate-forme lors de l'avancée des nappes.

3.1 Plissement et clivage

Nos observations révèlent que le plissement est exprimé de façon différente dans le Groupe de Beekmantown le long de la Route 235 (affleurement n° 4) et dans le Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique (affleurement n° 1). On observe dans les calcaires dolomitiques du Groupe de Beekmantown un anticlinal ondulant à ouvert, de longueur d'onde décamétrique et d'amplitude métrique, ainsi que deux plis de rampe droits et ouverts (figure 5B, planche 1). Un seul pli est visible dans les calcaires argileux de la Carrière Saint-Dominique : il s'agit d'un anticlinal ouvert à fermé et déversé vers le nord-ouest (figure 5A). L'observation des étages inférieurs de la carrière révèle que ce pli repose sur un important système de failles inverses, dont la cinématique est compatible avec le sens de déversement du pli vers l'ouest-nord-ouest. Sans préjuger de l'origine de cet anticlinal, nous pouvons donc affirmer qu'il s'agit d'un pli par propagation de faille dont l'amplification est directement reliée au développement du système de failles.

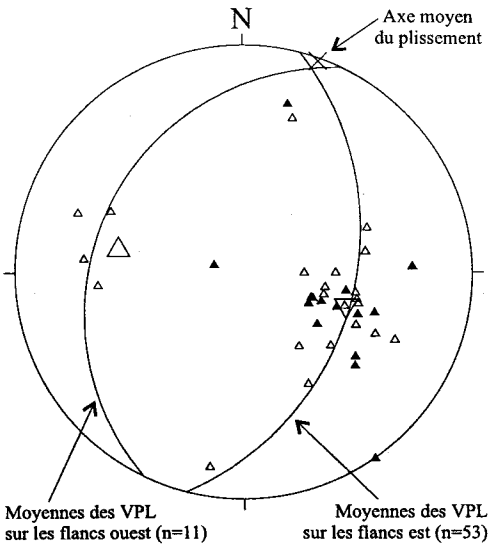
L'attitude moyenne du litage le long de la Route 235 et dans la Carrière Saint-Dominique (figure 8) a été calculée séparément pour les deux flancs des plis : N017/30 (n=36) pour les flancs est et N222/13 (n=4) pour les flancs ouest. Des résultats identiques ont été obtenus pour les VPL (figure 8) : N014/38 (n=53) pour les flancs est et N206/24 (n=11) pour les flancs ouest. Toutes ces mesures ont donc été regroupées pour calculer un axe moyen du plissement égal à N019/03 à partir du grand cercle
(So+VPL) passant par les pôles du litage et des VPL (n=104). Des stries ont été observées sur les VPL avec une orientation orthogonale à l'axe des plis (figure 9) : N110/39 (n=29) dans les flancs est et N282/32 (n=5) dans les flancs ouest, à comparer avec l'axe moyen du plissement. Une telle orientation est compatible avec un mode de plissement par glissement et flexion (Tanner, 1989; Ramsay et Huber, 1987b), de même que le sens du glissement, qui est inverse vers les charnières anticlinales et change de direction au passage de celles-ci.

Un clivage de plan axial (N021/58, n=25, figure 10) de type pression-dissolution est observé dans les affleurements n° 1 et 4 (Carrière Saint-Dominique et coupe de la Route 235, figures 5 et 6). Il est très peu exprimé dans les calcaires et les dolomies du



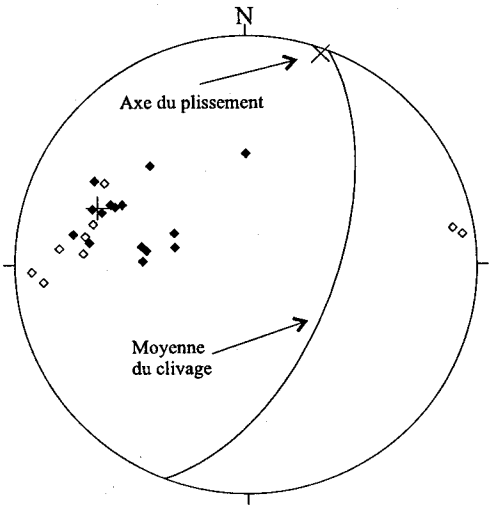
○ Pôles de So, Route 235 (n=20)
● Pôles de So, Carrière Saint-Dominique (n=20)
□ Pôles de VPL, Route 235 (n=39)
■ Pôles de VPL, Carrière Saint-Dominique (n=25)
╳ Pôle du grand cercle So + VPL (n=104)

Figure 8: Attitude des ΠS0 et ΠVPL.



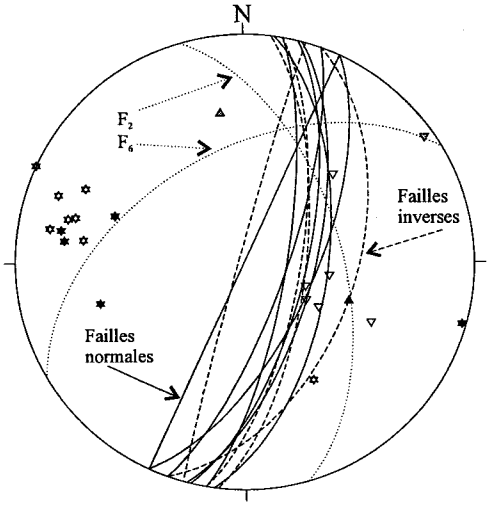
△ Stries sur les VPL, Route 235 (n=23)
▲ Stries sur les VPL, Carrière Saint-Dominique (n=15)
▽ Moyenne des stries, flancs est (n=29)
△ Moyenne des stries, flancs ouest (n=5)

Figure 9: Attitude des stries sur les VPL.



◇ Pôles du clivage, Route 235 (n=10)
◆ Pôles du clivage, Carrière Saint-Dominique (n=15)
┼ Moyenne des pôles du clivage (n=25)

Figure 10: Attitude du clivage.



✱ Pôles de failles inverses (n=4)
✲ Pôles de failles normales (n=8)
▲ Stries sur faille inverse
△ Stries sur failles normales
▲ Stries sub-horizontales sur F_2
▽ Stries sub-horizontales sur F_6

Figure 11: Attitude des plans de failles et des stries. Les stries sont mesurées indépendamment des plans de faille.

Groupe de Beekmantown, essentiellement sous forme de stylolites sub-verticaux d'amplitude millimétrique. Le clivage est en revanche beaucoup mieux développé dans les calcaires argileux du Groupe de Trenton, où il prend la forme de faisceaux argileux réfractés dans les bancs les plus calcareux et à proximité des veines.

Aucune différence notable n'a été relevée entre les affleurements n° 1 à 4 dans les attitudes moyennes du litage, des VPL et du clivage. Ces affleurements appartiennent donc au même domaine structural. Ceci est en accord avec les travaux de Prichonnet et Raynal (1977), qui reconnaissent pour le domaine intermédiaire des plongées axiales sub-horizontales vers le nord-est et le sud-ouest.

3.2 Les failles

3.2.1 Distribution et attitude

Si la distribution des failles est différente le long de la Route 235, dans la Carrière Saint-Dominique et dans la carrière abandonnée (affleurement n° 2, figure 3), leur attitude est en revanche homogène et orientée nord-est/sud-ouest (figure 11), la vergence étant toujours vers l'avant-pays. La seule exception notable est la faille F_2, qui est orientée nord/sud.

Quatre failles sont observables le long de la Route 235 (F_1 à F_4 du nord-ouest vers le sud-est, figures 5 et 6). Dans le Groupe de Beekmantown, F_1 à F_3 ont des pendages vers l'est de 50° environ. F_2 sépare deux compartiments à litage tabulaire tandis que des plis de rampe sont développés dans le toit de F_1 et de F_3 (planche 1). Dans le Groupe de Trenton, F_4 est inclinée à 85° et 70° de part et d'autre de la route (figure 6B) et met en contact une unité peu déformée dans le toit avec une unité argileuse dans laquelle le clivage est beaucoup plus développé. Dans le cas des failles F_2, F_3, et F_4, le dernier rejet apparent indique une cinématique inverse avec un chevauchement vers le nord-ouest. Ce rejet est confirmé par les stries et marches de calcite, mais l'absence de marqueurs lithologiques ne permet pas de le quantifier. F_2 présente de surcroît deux générations de stries orientées perpendiculairement et parallèlement au front orogénique (soit N110/50 et N352/35

respectivement), ce qui révèle que les derniers mouvements de certaines failles n'ont pas tous été inverses et qu'une composante décrochante dextre est à prendre en compte. Ces quatre failles recoupent les VPL. Il existe peut-être d'autres failles le long de la Route 235, mais la qualité de l'affleurement à cet endroit ne permet pas de les observer.

Deux failles normales conjuguées (F_5 et F_6) dessinent un petit graben dans l'affleurement n° 2 (figure 6A). La faille F_5 est sise dans le Groupe de Black River. La faille F_6 met en contact des unités du Groupe de Chazy (dans le mur) avec des unités du Groupe de Black River (dans le toit); une carrière de chaux en masque la majeure partie. En dépit du mouvement apparent normal de ces failles et de leur association avec des veines en échelon indiquant une contrainte principale maximale sub-verticale (Chalaron et Malo, 1998), une seule génération de stries a été observée, sur la faille F_5 : ces stries indiquent un mouvement décrochant senestre (N055/05 sur le plan N240/50).

Quatorze failles d'importances variables (F_7 à F_{21}) sont observables dans la Carrière Saint-Dominique (figure 5A). Une seule se trouve isolée sur le flanc long de l'anticlinal (F_{20}), les autres sont toutes concentrées dans la partie ouest de l'affleurement. Chaque fois qu'une relation de recoupement peut être établie, il s'avère que les failles recoupent les VPL.

3.2.2 Caractères pétrographiques

Les ciments qui scellent les failles des groupes de Beekmantown et de Trenton présentent des caractéristiques comparables (tableau 2). Ils sont essentiellement calcitiques, en cristaux fins à moyens et subeuédriques, ou bien larges et anédriques. Le quartz peut-être associé ou non à la calcite subeuédrique, il est très rarement associé à la calcite anédrique (et ne se retrouve qu'en grains fins dans les fractures à l'intérieur des grands cristaux de calcite). Trois structures différentes peuvent coexister :

- Une structure laminée associée aux surfaces striées.
- Une structure bréchique dans laquelle des fragments d'encaissant clivé sont inclus dans un ciment de calcite non bréchique et dépourvu d'orientation particulière.

	Élément structural	Microscopie optique		Cathodoluminoscopie		Cathodoluminoscopie (encaissant)
		Calcite	Quartz	Calcite	Quartz	
Groupe de Beekmantown	Veines parallèles au front orogénique	anédrique fin subeuédrique à euédrique large xénomorphe (veines cisaillantes)	euédrique fin à large	terne parfois composite	non-luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents dolomite zonée et luminescente
	Veines perpendiculaires au front orogénique	anédrique large	pyramidal triangulaire perpendiculaire aux épontes	luminescente parfois composite	non-luminescent	quartz luminescent dans la matrice quartz non-luminescent dans le ciment
	Veines parallèles au litage	anédrique à euédrique fin à moyen pyramidale triangulaire lamellaire	subeuédrique à euédrique parfois fibreux	terne parfois zonée parfois composite	non-luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents dolomite zonée et luminescente
	Failles normales	subeuédrique fin à moyen anédrique large		très terne et composite cristaux isolés non-luminescents	luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents
	Failles inverses	euédrique large		terne	luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents
Groupe de Trenton	Veines parallèles au front orogénique	anédrique fin subeuédrique à euédrique large xénomorphe (veines cisaillantes)	euédrique fin à large	terne parfois composite	non-luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents dolomite zonée et luminescente
	Veines perpendiculaires au front orogénique	anédrique large		luminescente parfois composite	non-luminescent	calcite terne
	Veines parallèles au litage	anédrique à euédrique fin à moyen lamellaire	subeuédrique à euédrique parfois fibreux	terne, parfois zonée parfois composite	non-luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents dolomite zonée et luminescente
	Failles normales	subeuédrique fin à moyen anédrique large		très terne et composite cristaux isolés non-luminescents	luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents
	Failles inverses	euédrique large		terne	luminescent	calcite et quartz ternes à luminescents

Tableau 2: Caractères pétrographiques des ciments des veines et des failles pour les groupes de Beekmantown et de Trenton. Les dimensions des cristaux fins, moyens et larges sont respectivement < 1mm, entre 1 et 5 mm et > 5 mm.

- Une structure dans laquelle des bandes d'encaissant sont séparées par un ciment de calcite dépourvu d'orientation particulière. Les bandes d'encaissant sont bordées d'un seul côté par une frange de cristaux de quartz perpendiculaires.

3.3 Les veines parallèles au litage

3.3.1 Caractères structuraux et relation avec le plissement

Ces veines sont par définition parallèles à la stratification (figure 8), ce qui n'implique pas qu'elles soient systématiquement à la limite entre deux unités sédimentologiques. Dans les roches du Groupe de Beekmantown, on les trouve indifféremment entre les bancs calcaires ou dolomitiques, et dans les roches du Groupe de Trenton elles peuvent être : 1) à l'intérieur d'un banc de calcaire argileux, 2) à la limite entre un calcaire argileux et un mudstone, 3) à l'intérieur d'un banc de mudstone, ou 4) peuvent recouper une stratification légèrement plissée à l'échelle décimétrique, en décrivant une courbure de plus grand rayon, sans respecter exactement la trace ondulante du plan inter-couches.

La présence d'une charnière anticlinale ou synclinale ne semble pas avoir d'influence sur les caractéristiques macroscopiques des VPL: les VPL sont régulières, d'épaisseur constante tout au long d'une même veine et aussi bien dans les flancs que dans les charnières synclinales et anticlinales. Les structures massive et laminée (voir ci-dessous) coexistent dans les échantillons provenant de ces charnières. Aucune charnière anticlinale n'étant malheureusement accessible, les seules informations qui s'y rapportent ont été obtenues à la jumelle. C'est pourtant dans le flanc d'un pli de rampe de la Route 235 que l'on peut reconnaître les seules VPL qui s'interrompent avant une charnière anticlinale (figure 5B). On observe aussi de rares cas où la veine quitte son plan inter-couches pour couper à travers un ou plusieurs bancs et rejoindre une autre VPL (figure 5B), et d'autres cas où la veine s'amincit graduellement avant de disparaître complètement. L'épaisseur des bancs semble en revanche jouer un rôle dans la densité des veines. Le nombre de VPL par unité de longueur, mesuré perpendiculairement au

litage, est en effet plus élevé dans les roches argileuses finement litées du Groupe de Trenton (14 à 18 VPL pour 10 mètres) que dans les calcaires dolomitiques massifs du Groupe de Beekmantown (5 à 6 VPL pour 10 mètres).

Les stries observées sur les VPL sont le plus souvent situées aux épontes des veines, mais il est parfois possible d'en observer à l'intérieur des veines. Elles sont alors disposées parallèlement aux épontes et bordées par des fragments d'encaissant et des faisceaux argileux. Le relief des stries indique invariablement un sens de mouvement inverse vers les charnières anticlinales. Trois VPL présentent également des stries orientées parallèlement à l'axe du plissement (figure 9). Les veines d'extension parallèles au front orogénique (voir plus loin) sont recoupées par les VPL et décalées selon le même mouvement inverse (décalage centimétrique). Dans les lithologies les plus argileuses (Groupe de Trenton, affleurements n° 1 et 3), les VPL sont associées à des veines sigmoïdales (planche 2) dont l'orientation indique également que l'ouverture s'est produite selon un mouvement inverse vers les charnières anticlinales. Les stries, le décalage des veines d'extension parallèles au front orogénique et l'orientation des veines sigmoïdales indiquent qu'au moins les derniers mouvements enregistrés par les VPL correspondent au plissement par glissement et flexion. Seules deux VPL font exception à cette norme, et présentent des stries indiquant un mouvement apparemment incompatible avec le plissement par glissement et flexion. Les stries observées sur l'échantillon 94 (figure 5B) montrent ainsi un mouvement normal en direction de l'arrière-pays. L'examen d'une VPL dans le flanc est-sud-est de la charnière synclinale d'un pli par propagation (figure 5A) a par ailleurs révélé un sens de cisaillement opposé à celui correspondant au plissement par glissement et flexion qui contrôle la formation des plis par propagation (Suppe, 1985; Erslev et Mayborn, 1997). Des stries sont également observables dans les charnières synclinales, mais leur sens de mouvement n'a pas pu être identifié. Quand un clivage est présent dans l'encaissant (Groupe de Trenton), celui-ci est réfracté dans l'encaissant proche des VPL et est également observé dans les fragments d'encaissant à l'intérieur des veines. À l'échelle macroscopique, il recoupe aussi clairement les VPL de l'affleurement n° 3 (planche 2).

Dans certains échantillons on observe que les faisceaux argileux soulignant le

clivage dans l'encaissant se prolongent dans la veine parallèlement aux laminations (planche 3). La relation entre le clivage et les faisceaux argileux ne fait aucun doute dans l'encaissant, car ces faisceaux sont parallèles au clivage et réfractés à proximité des VPL. À l'intérieur des veines en revanche, les faisceaux argileux peuvent être interprétés comme la prolongation du clivage ou comme des inclusions solides marquant la trace de l'ouverture de la veine (Cox, 1987; Fowler, 1996). La première hypothèse implique que le clivage soit postérieur à l'ouverture de la VPL. La continuité optique des cristaux de calcite ne devrait donc pas être affectée par le clivage lorsque celui-ci est réfracté à l'intérieur de la veine. Toutefois, dans les échantillons examinés en lumière polarisée, les cristaux de calcite ne montrent aucune continuité optique de part et d'autre de la trace du clivage. Par ailleurs, le modèle développé par Fowler (1996), dans lequel le clivage est antérieur à la veine, implique que les inclusions solides soient disposées en échelon selon des sens différents dans la veine et l'encaissant. L'échelle des observations ne permet pas ici de vérifier cette géométrie. Les structures observées sont donc ambiguës et ne permettent pas de trancher en faveur de l'une ou l'autre des deux hypothèses.

Les caractères pétrographiques et microstructuraux sont identiques d'un affleurement à l'autre. Les observations faites à partir des échantillons des groupes de Beekmantown et de Trenton sont donc présentées ensemble.

3.3.2 Structure interne

La structure interne des VPL peut être "laminée", "massive", ou les deux. Bien que ce terme soit ambiguë, la structure est dite "laminée" lorsque le ciment est individualisé en bandes parallèles aux épontes (planches 4 et 5) alternant avec, par ordre décroissant de fréquence :

- Des fragments (faisceaux) d'encaissant argileux irréguliers, souvent continus et pouvant renfermer de la pyrite.
- Des fragments d'encaissant micritiques ou argileux allongés et réguliers, arrachés aux épontes (planche 6).

- Des laminations de minéralogies et/ou de luminescences différentes.

Observée en section perpendiculaire à la direction des stries, la structure laminée demeure parfois reconnaissable mais devient plus irrégulière, mais dans la plupart des cas les laminations prennent une forme lenticulaire et sont anastomosées.

La structure interne de la veine est dite "massive" si aucun de ces éléments n'est présent ou s'ils ne sont pas disposés de façon régulière et parallèle aux épontes (planche 5).

Il est parfois difficile de discerner à première vue une bande massive d'un ensemble de laminations, car l'un comme l'autre peuvent être recoupés parallèlement aux épontes par :

- Des stylolites.
- De fines bandes régulières de quartz, parfois accompagnées de pyrite.
- Des plans de cisaillement qui traversent les cristaux de calcite (planche 7).

3.3.3 Caractères pétrographiques

3.3.3.1 Caractères généraux

Les VPL ont été examinées à la loupe, au microscope optique et par cathodoluminoscopie suivant des coupes perpendiculaires aux épontes et parallèles et perpendiculaires aux stries. Elles sont essentiellement colmatées par un ciment calcitique, avec localement du quartz (planche 8), et dont les cristaux peuvent être anédriques à euédriques (tableau 2). Dans la plupart des veines où il apparaît, le quartz est tardif par rapport à la calcite. Il remplit le centre des laminations et des structures massives (voir ci-dessous) et n'inclut jamais de fragments d'encaissant. Beaucoup plus rarement on peut observer la relation inverse, avec du quartz en cristaux pyramidaux perpendiculaires aux épontes en bordure de la veine et au centre des cristaux de calcite dépourvus d'orientation préférentielle. Observés à la loupe, ces ciments sont blanc-crème ou gris.

Leur luminescence est terne et peu contrastée, les couleurs allant de l'orange-sombre au brun-orangé; il est souvent difficile d'en reconnaître les nuances. Seuls certains échantillons présentent des contrastes un peu plus prononcés (planche 9), avec parfois de fins ciments orangés. L'encaissant immédiat et les fragments d'encaissant pris dans la VPL ont une luminescence proche de celle de la veine, voire identique. Le quartz est non-luminescent dans les veines et luminescent dans l'encaissant. La texture est souvent composite. La seule différence notable entre les échantillons appartenant aux groupes de Beekmantown et de Trenton est que les premiers sont systématiquement un peu plus luminescents que les seconds, mais le même manque de contraste et les mêmes couleurs sont observées dans les deux cas. De nombreuses inclusions fluides sont présentes dans les ciments de calcite et de quartz des VPL.

3.3.3.2 La structure laminée

Les caractères pétrographiques des ciments (assemblages minéralogiques, taille et morphologie des cristaux) sont constants au sein d'une même lamination, aussi loin que l'on puisse le vérifier à l'échelle de la lame mince. Ils peuvent être identiques d'une lamination à l'autre, ou présenter de grandes variations entre deux laminations contiguës. Les différents assemblages observés sont les suivants :

1a : calcite en cristaux fins (< 1 mm) à moyens (1 à 5 mm), anédriques

1s : calcite en cristaux fins (< 1 mm) à moyens (1 à 5 mm), subeuédriques

1e : calcite en cristaux fins (< 1 mm) à moyens (1 à 5 mm), euédriques

2 : calcite de type 1a et moins de 25 % de quartz en cristaux fibreux

3 : calcite de type 1a avec moins de 50 % de quartz en cristaux subeuédriques à euédriques de 1 à 5 mm

4 : identique à 3, avec plus de 50 % de quartz

5 : calcite en cristaux moyens, en fibres perpendiculaires aux épontes, avec moins de 10 % de quartz en cristaux subeuédriques à euédriques de 1 à 5 mm.

La plupart des échantillons ne montrent qu'un ou deux de ces assemblages, mais lorsque la VPL comporte un plus grand nombre de laminations, il devient possible d'observer des associations beaucoup plus variées.

3.3.3.3 La structure massive

La structure massive est constituée de cristaux de calcite et quartz subeuédriques à euédriques, disposés sans orientation préférentielle. Les cristaux de calcite peuvent être de dimensions moyenne (1 à 5 mm) à grande (5 à 20 mm). Les cristaux de quartz, qui représentent parfois plus de 50 % de l'assemblage minéralogique, sont également de dimension moyenne (1 à 5 mm) à grande (5 à 30 mm). Des fragments arrachés à l'encaissant peuvent se trouver inclus dans la structure massive, mais ceux-ci ont des formes anguleuses plutôt que l'aspect allongé décrit pour la structure laminée.

À première vue, on peut considérer que la partie massive d'une VPL représente simplement une lamination plus épaisse que les autres et bien souvent la stylolitisation de cette partie épaisse lui donne l'apparence d'un ensemble de laminations fines. Mais la dimension des cristaux, l'abondance du quartz et la forme des fragments d'encaissant indiquent clairement que cette structure massive, quoique disposée parallèlement aux épontes, doit être considérée indépendamment de la structure laminée. Les laminations, les stylolites et les faisceaux argileux de cette structure laminée sont souvent recoupés par le ciment de la structure massive.

Très souvent les échantillons dans lesquels la structure massive domine montrent cependant une ou deux laminations près de l'éponte, qui correspondent à des stries et des cannelures observables à la surface de l'échantillon.

3.3.4 Ouverture et cimentation

3.3.4.1 Ouverture perpendiculaire aux épontes

Certaines veines contiennent des fragments d'encaissant allongés et réguliers ainsi que des faisceaux argileux. L'orientation de ces fragments arrachés aux épontes indique

que l'ouverture et la cimentation de la veine se sont produites selon un mécanisme de *crack-seal* (Ramsay, 1980) avec un mouvement perpendiculaire aux épontes. On rencontre aussi dans certaines lames minces une lamination constituée 1) en bordure de cristaux de quartz pyramidaux perpendiculaires aux épontes et 2) au centre de cristaux de calcite dépourvus d'orientation préférentielle (planche 8).

3.3.4.2 Ouverture sub-parallèle aux épontes

Les observations macroscopiques et microscopiques révèlent que dans la plupart des cas l'ouverture des VPL s'est produite selon une direction parallèle aux épontes, ou légèrement oblique (planche 10). Les coupes parallèles et perpendiculaires à la direction des stries pratiquées sur certains échantillons ont ainsi révélé que les structures laminées ne sont continues que dans la direction des stries et qu'elles prennent des formes lenticulaires dans le plan perpendiculaire. Ceci suggère que la fraction laminée des VPL est formée par plusieurs générations de stries et cannelures orientées dans la même direction. En outre les laminations sont disposées en oblique par rapport aux épontes. Les veines latéralement continues ont des épontes irrégulières et découpées en marches d'escalier (planche 11). Le parallélisme de la veine avec le litage est alors approximatif.

Les évidences microstructurales de ce cisaillement sub-parallèle aux épontes sont plus rares. Outre la géométrie des épontes en marches d'escalier, il est parfois possible d'observer au microscope des fragments d'encaissant disposés en oblique par rapport aux laminations. Ces fractions sont séparées par un ciment de calcite anédrique comme dans le cas des veines de cisaillement parallèles au front orogénique (planche 12 et page 48) ou plus rarement par des fibres de calcite orientées parallèlement ou en oblique par rapport aux épontes. Le sens de cisaillement ainsi révélé est toujours compatible avec celui observé à l'échelle macroscopique.

Certaines veines sont latéralement discontinues. Elles sont composées d'un enchaînement de cavités rhomboédriques centimétriques (échantillon 40, planche 13) séparées par des plans de glissement parallèles au litage. Nous pensons que ces veines illustrent un stade précoce de la formation des VPL, et que la continuité latérale des veines est obtenue par la connexion progressive de ces cavités rhomboédriques.

La formation de veines latéralement continues par la fusion de veines plus courtes est un mécanisme qui a déjà été décrit par Teixell, Durney et Arboleya (2000), par Ohlmacher et Aydin (1995 et 1997), ainsi que par Fowler (1996) pour les VPL. Gaviglio (1986) ainsi que Labaume, Berty et Laurent (1991) ont décrit des mécanismes similaires pour des veines non-parallèles au litage. Teixell, Durney et Arboleya (2000) observent le développement de VPL par la connexion de fentes de tension parallèles au litage et disposées en échelon. De telles structures n'étant pas présentes dans les affleurements étudiés, nous excluons ce modèle pour expliquer la formation des VPL observées. Labaume, Berty et Laurent (1991) ainsi que Ohlmacher et Aydin (1995 et 1997) décrivent un mode de fracturation par *crack-seal*. Des cavités rhomboédriques séparent des plans de cisaillement parallèles entre eux, dessinant ainsi un système en marches d'escalier (figure 12) similaire à celui que nous observons pour les VPL latéralement discontinues

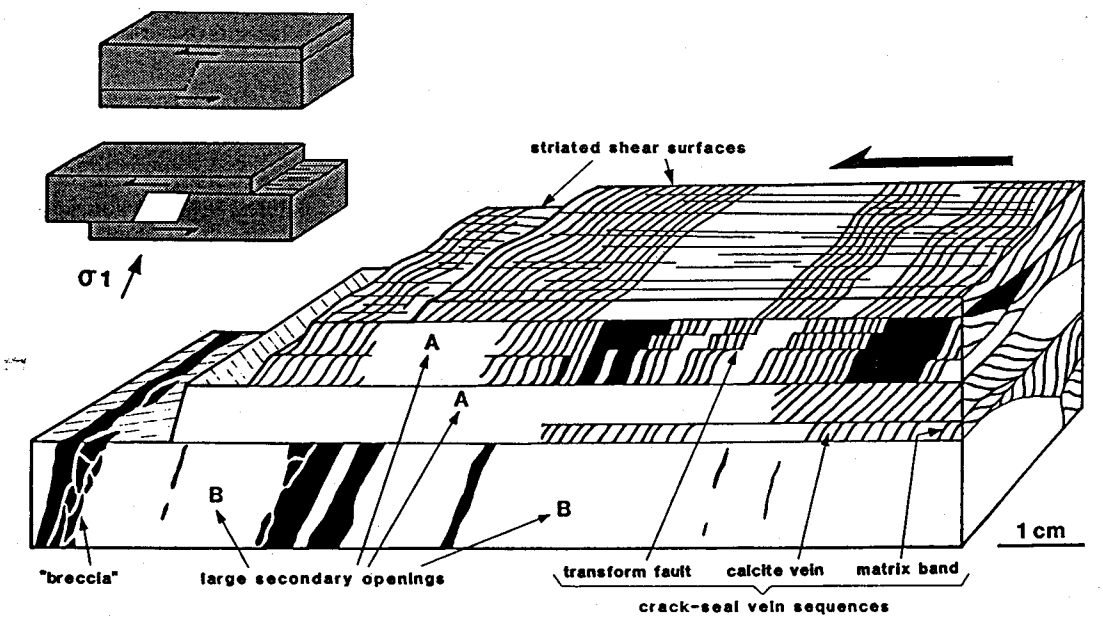


Figure 12: Schéma d'une veine de calcite tabulaire résultant de l'ouverture d'une multitude de cavités rhomboédriques entre des surfaces de cisaillement. Le sédiment est en noir et la calcite en blanc. (A) Larges ouvertures secondaires recoupant la séquence de *crack-seal* de la veine, (B) identique à (A) dans le sédiment. L'échelle verticale de la séquence *crack-seal* est exagérée. En camée: principe d'ouverture d'un rhomboèdre de calcite. Tiré de Labaume, Berty et Laurent (1991).

(échantillon 40, planche 13). Labaume, Berty et Laurent (1991) ont montré que des fragments d'encaissant de forme sigmoïdale peuvent être incorporés à la veine si la rupture se produit à l'intérieur de l'éponte plutôt que dans la veine. Sur la base du rapport épaisseur/longueur des cavités rhomboédriques, Labaume, Berty et Laurent (1991) distinguent des veines primaires caractérisées par une abondance de fragments sigmoïdaux (rapport épaisseur/longueur inférieur à 1) et des veines secondaires marquées par un rapport nettement supérieur à 1, une moindre abondance des fragments d'encaissant et l'association avec des zones de brèches (figure 12).

Des structures comparables aux veines primaires (figure 12) de Labaume, Berty et Laurent (1991) et aux veines de type I (figure 13) de Fowler (1996) sont effectivement observées dans les VPL des affleurements n° 1 et 4, mais leur présence est anecdotique en comparaison de l'abondance des fragments allongés parallèlement aux épontes (parallèlement aux plans de glissement). Nous considérons que la majorité des VPL observées ont une structure très similaire à celle des VPL, des VPL de type II (figure 13) et des veines secondaires (figure 12) respectivement décrites par Ohlmacher et Aydin (1995 et 1997), Fowler (1996) et par Labaume, Berty et Laurent (1991). Sur les planches 10 et 11 par exemple, on peut voir des cavités rhomboédriques suffisamment allongées pour que leur extrémité n'apparaisse pas à l'échelle de l'échantillon. Les zones de brèches associées aux veines secondaires de Labaume, Berty et Laurent (1991) sont également reconnues dans nos propres échantillons. La planche 10 montre ainsi une brèche dont le sens d'ouverture, révélé par la structure en marches d'escalier et la disposition des fragments d'encaissant, est compatible avec le sens de cisaillement de la VPL sus-jacente.

Nous proposons donc d'appliquer le modèle de Labaume, Berty et Laurent (1991) aux VPL ouvertes par cisaillement sub-parallèle aux épontes que nous observons aux affleurements n° 1 et 4. Dans ce modèle, les épontes des cavités rhomboédriques sont imprégnées sur une faible profondeur par le même ciment qui précipite au sein des cavités. À chaque incrément d'ouverture le cisaillement le long des marches des cavités ne se produit donc pas exactement à l'interface entre les cavités et l'encaissant mais à quelque distance à l'intérieur de l'éponte.

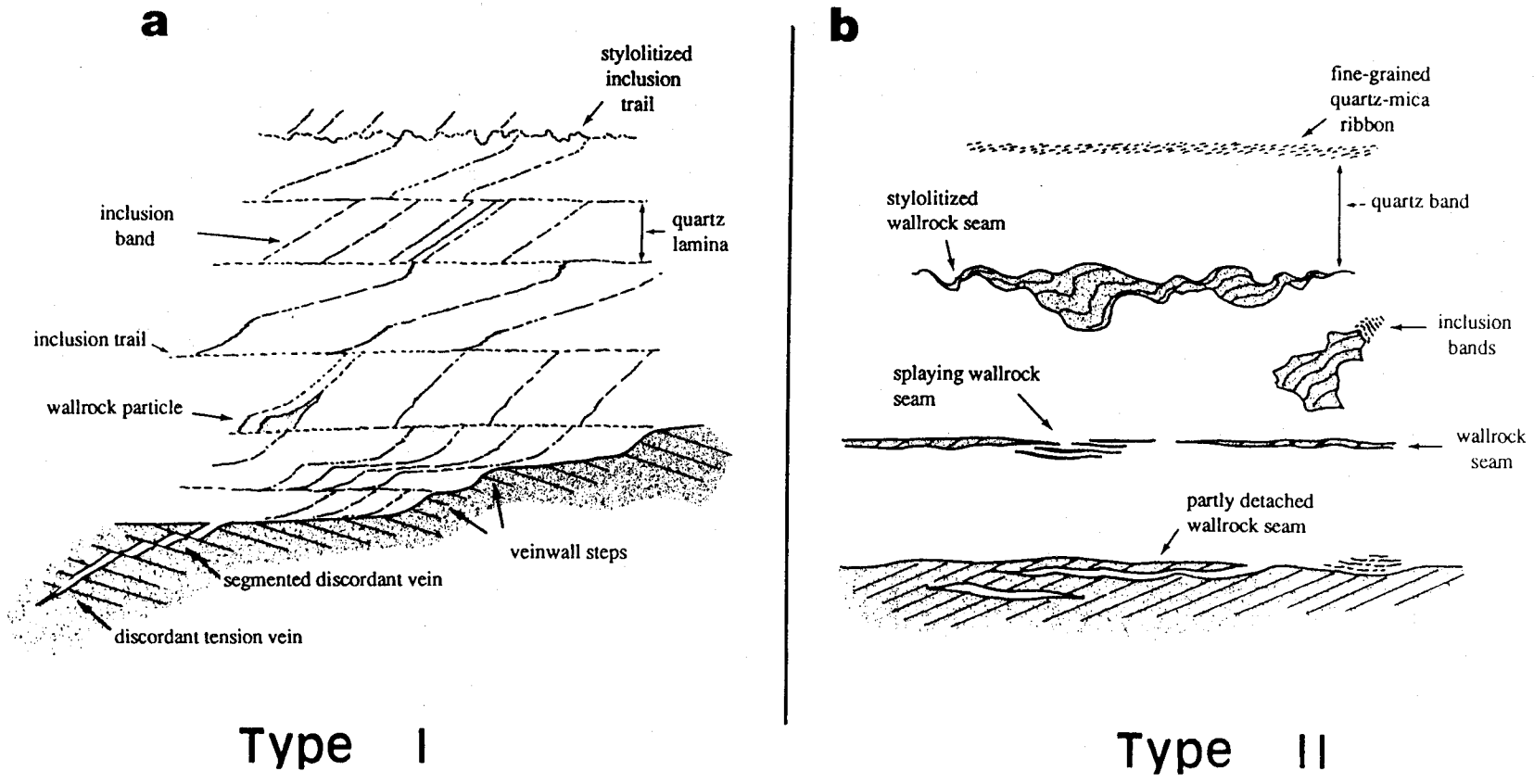


Figure 13: Schéma des caractères microstructuraux typiques des VPL de type I (A) et II (B) de Fowler (1996). Les lignes obliques dans les épontes représentent le clivage de crénulation. Tiré de Fowler (1996).

3.3.5 Déformations

Les ciments des VPL sont stylolitisés et fracturés. Ces stylolites et ces fractures montrent fréquemment des relations de recoupements mutuels (planche 5) et n'affectent pas toujours l'ensemble des ciments d'une même VPL, ce qui révèle que la cimentation et la déformation des VPL sont des processus continus et progressifs.

Les stylolites parallèles aux épontes ont des dents qui peuvent être perpendiculaires (planches 14 et 15) ou obliques (planche 14) par rapport à celles-ci, les deux directions pouvant coexister dans la même VPL. Les faisceaux argileux parallèles aux épontes sont aussi affectés par des stylolites à dents obliques. Les stylolites affectent aussi bien les structures laminée que massive des veines. Les stylolites perpendiculaires aux laminations sont rares. Ils ont des dents parallèles aux épontes et se terminent dans les faisceaux argileux qui bordent les laminations (planche 15).

Les veinules perpendiculaires ou obliques par rapport aux épontes recoupent l'encaissant et son clivage, les stylolites et les faisceaux argileux contenus dans les veines, des bandes cisaillantes de quartz parallèles aux épontes, ainsi que les structures massive et laminée des veines. Elles sont à leur tour recoupées par les stylolites et faisceaux argileux parallèles aux épontes dans les veines et l'encaissant (planches 5 et 16), et sont donc formées en même temps que ces éléments. Certaines veinules sont recoupées par des laminations montrant des évidences d'ouverture dans une direction parallèle ou oblique aux épontes. Elles contiennent des cristaux de quartz ou de calcite selon la minéralogie recoupée, la plupart du temps disposés en fibres perpendiculaires aux épontes des veinules. Des fragments d'encaissant et des faisceaux argileux sont inclus dans les veinules et indiquent une ouverture perpendiculaire à leurs épontes. Il est possible d'établir une chronologie entre les différentes laminations d'une même VPL en examinant les relations de recoupement avec les veinules : les laminations recoupées par les veinules prédatent les laminations qui sont connectées avec celles-ci et qui partagent les mêmes caractères pétrographiques et cathodoluminoscopiques.

La fracturation qui affecte les ciments des VPL peut aussi s'exprimer sous la

forme d'un cisaillement parallèlement aux épontes, comme le révèle la présence de bandes de quartz constituées de cristaux fins et anédriques (planches 7, 8 et 17). Initialement subeuédriques et de dimensions moyennes (1 à 5 mm), les cristaux ont subi une importante réduction de taille (< 10 • m).

Des fragments d'encaissant sont parfois boudinés et étirés parallèlement aux épontes. L'espace entre les fragments est rempli d'un ciment de calcite en cristaux subeuédriques dépourvus d'orientation préférentielle, et l'ensemble est entouré de faisceaux argileux indiquant une compaction importante perpendiculairement à la direction d'élongation (planche 18).

3.3.6 Relations chronologiques

L'ensemble des relations de recoupement entre les différents éléments structuraux est rarement observable à l'échelle d'une seule lame mince. La confrontation des observations disponibles a cependant permis d'établir la succession d'événements suivante (figure 14) :

1) Les laminations de calcite à cristaux fibreux et de quartz témoignent d'une ouverture des VPL perpendiculairement aux épontes.
2 et 3) Ces laminations sont affectées par un cisaillement parallèle aux épontes, qui s'exprime par des bandes de quartz en cristaux très fins et des plans de fracture affectant les cristaux de calcite et parfois soulignés par un léger déplacement. Dans le même temps, des stylolites parallèles aux épontes et à dents obliques se développent dans les laminations et de nouvelles laminations s'ouvrent suivant une direction sub-parallèle aux épontes.
4) Tous ces éléments sont ensuite recoupés par des veinules perpendiculaires ou légèrement obliques aux épontes, qui prennent naissance dans l'encaissant. Des stylolites à dents perpendiculaires se développent parallèlement aux épontes.
5) Finalement, de nouvelles laminations se développent, qui ne sont pas recoupées par les veinules.

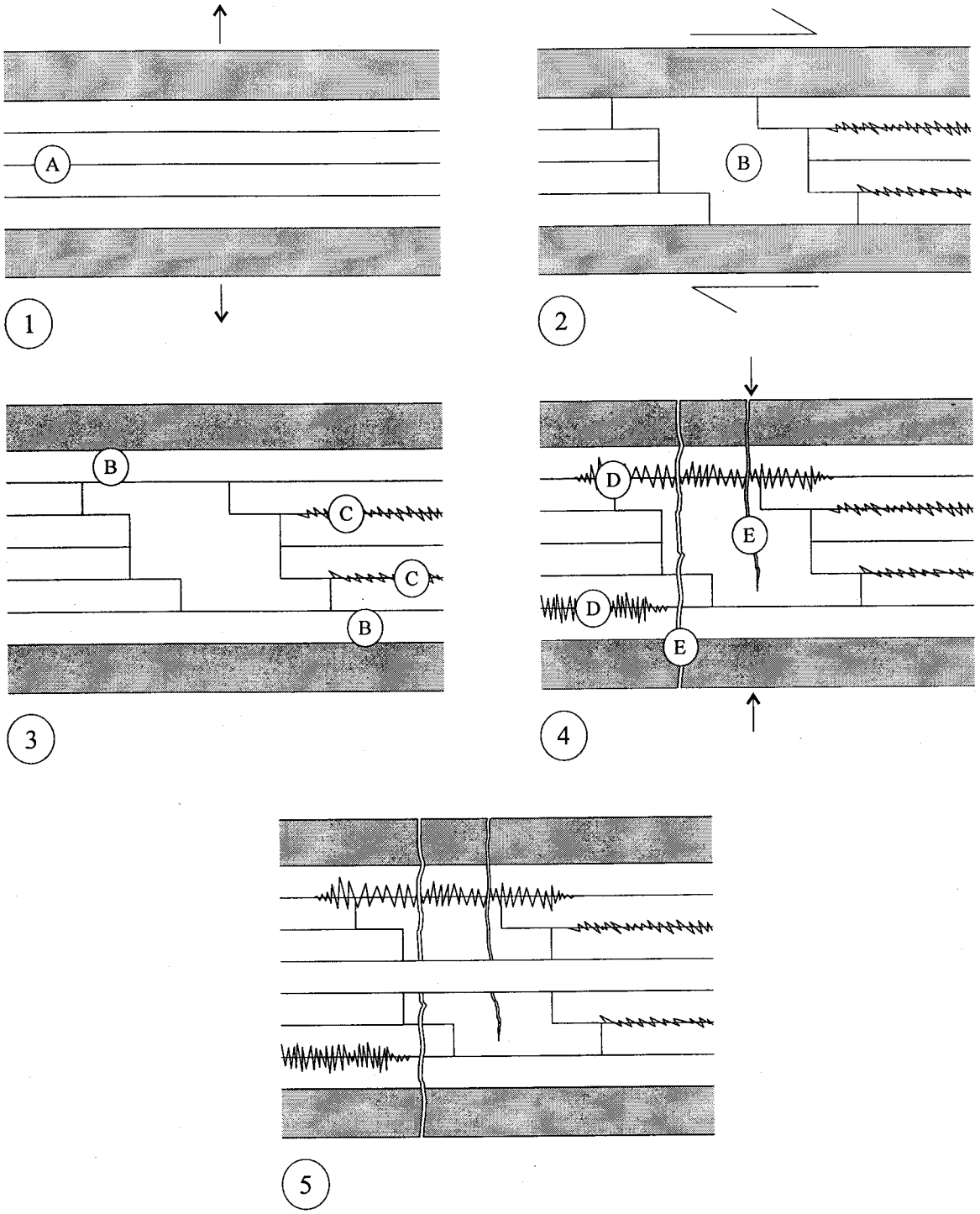


Figure 14: Relations de recoupements entre les ciments des VPL. (1) Ouverture de la veine selon un mouvement perpendiculaire aux épontes, (2) réactivation selon un mouvement cisaillant sub-parallèle aux épontes, (3) réouverture parallèlement ou perpendiculairement aux épontes, (4) compaction et ouverture de veinules perpendiculaires aux épontes de la VPL et (5) nouvelle réactivation et ouverture parallèlement ou perpendiculairement aux épontes. (A) Structure laminée, (B) structure massive, (C) stylolites à dents obliques par rapport aux épontes, (D) stylolites à dents perpendiculaires aux épontes, (E) veinules perpendiculaires aux épontes de la VPL.

Seules les étapes 2 à 4 sont clairement définies et suffisamment documentées. Il est facile d'établir la relation entre les veinules et certains stylolites parallèles aux épontes et à dents perpendiculaires, grâce aux nombreux recoupements mutuels que l'on peut observer. De même, certains stylolites à dents obliques précèdent clairement les veinules puisque celles-ci les recoupent. Mais en l'absence de relations de recoupement visibles, le développement de ces stylolites ne peut être imputé systématiquement aux étapes 2 à 4.

3.4 Les veines parallèles au front orogénique

3.4.1 Caractères structuraux

On observe des veines parallèles au front orogénique dans les affleurements de la coupe de la Route 235 et de la Carrière Saint-Dominique. Leur pendage (figure 15) est vers le nord-ouest (N194/70, n=17) ou vers le sud-est (N016/61, n=49), mais ces veines ne sont jamais conjuguées à l'exception de celles observées dans l'affleurement n° 2.

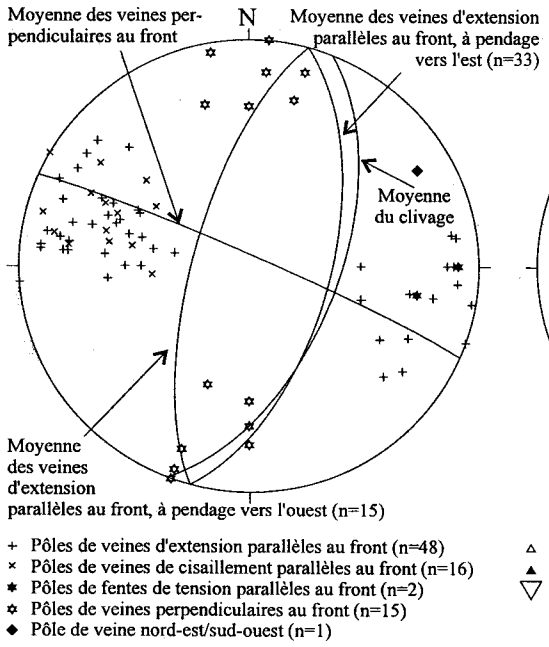


Figure 15: Attitude des veines parallèles et perpendiculaires au front orogénique.

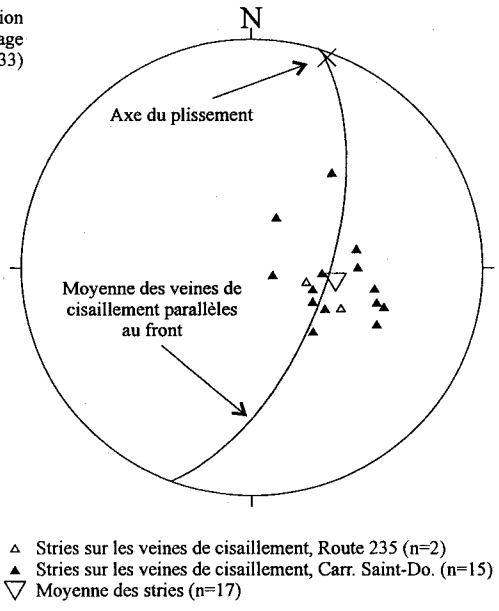


Figure 16: Attitude des stries sur les veines de cisaillement parallèles au front orogénique.

On peut distinguer quatre groupes à l'intérieur de ces veines d'attitude moyenne commune : des fentes de tension de dimensions réduites (une dizaine de centimètres au maximum) dans les roches du Groupe de Trenton de la Route 235 et de la Carrière Saint-Dominique, des veines centimétriques d'extension dans le Groupe de Beekmantown, des veines décimétriques à métriques d'extension, surtout présentes dans les roches du Groupe de Beekmantown de la Route 235 et plus rarement dans le Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique, et enfin des veines métriques de cisaillement, surtout visibles dans les roches du Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique, plus rarement dans le Groupe de Beekmantown de la Route 235. Dans la classification de Atkinson (1987), l'ouverture des trois premières familles de veines correspond au mode I (ouverture perpendiculairement aux épontes sans composante cisaillante) et l'ouverture des veines de cisaillement correspond au mode II (ouverture avec glissement).

3.4.1.1 Les fentes de tension

Ces veines sont contenues dans certains bancs calcaires compétents de l'affleurement n° 3 et de la Carrière Saint-Dominique. Leur attitude moyenne calculée à partir de deux de ces bancs est N187/72. Les fentes de tension sont parfois encore ouvertes et les cristaux sont fibreux et allongés perpendiculairement aux épontes. Des stylolites et des faisceaux argileux perpendiculaires aux épontes recoupent l'encaissant, la zone périphérique ainsi que les premiers millimètres du ciment de la veine. Ces relations de recoupement indiquent le lien étroit qui existe entre la dissolution du matériel par les stylolites et la cimentation dans les fentes de tension.

3.4.1.2 Les veines centimétriques d'extension

Ces veines prennent naissance au contact des VPL ou dans celles-ci. Elles s'ouvrent perpendiculairement au litage lors du glissement et du frottement des bancs pendant le plissement et s'atténuent rapidement dans le litage après quelques centimètres. Les veines de ce type sont peu nombreuses et seulement associées aux VPL discontinues à cavités rhomboédriques (planche 13).

3.4.1.3 Les veines décimétriques à métriques d'extension

Ces veines, principalement rectilignes, sont parfois disposées en échelon. Elles sont systématiquement recoupées par les VPL. Les attitudes moyennes des veines à pendage vers le nord-ouest et vers le sud-est (figure 15) sont respectivement N195/70 (n=15) et N015/61 (n=33). Les cristaux fibreux perpendiculaires aux épontes et les fragments d'encaissant parallèles aux épontes indiquent que l'ouverture s'est produite perpendiculairement aux épontes, sans composante cisaillante. On observe dans le Groupe de Black River (affleurement n° 2), à côté de deux failles normales conjuguées dessinant un graben (failles F_5 et F_6, figure 6A), une série de veines conjuguées disposées en échelon (planche 19) et qui indiquent une contrainte principale maximale sub-verticale. L'importance des veines centimétriques d'extension étant mineure, et bien que les trois types de veines ci-dessus soient des veines d'extension au sens de Ramsay et Huber (1987b), l'expression « veines d'extension » sera désormais employée pour faire référence aux veines métriques.

3.4.1.4 Les veines de cisaillement

Ces veines ne sont pas recoupées et décalées mais plutôt interrompues par les VPL, contrairement aux veines d'extension. Elles ne se prolongent jamais au-delà des VPL qui les interrompent et sont la plupart du temps circonscrites par deux VPL contiguës (figure 5). Leurs directions sont voisines de celles des VPL proches, seul leur pendage est plus fort et toujours orienté vers l'arrière-pays : N019/61 (n=16, figure 15). Outre leur relation géométrique avec les VPL, les veines de cisaillement se distinguent aussi des veines d'extension par plusieurs caractères qui mettent en évidence leur direction d'ouverture parallèle ou oblique par rapport aux épontes, et leur mouvement cisaillant compatible avec le plissement par glissement et flexion :

1) Des stries au contact avec l'encaissant, orientées perpendiculairement à l'axe de plissement : N100/60 (n=17, figure 16).
2) Une structure en dominos analogue à celle décrite pour les VPL discontinues

(cavités rhomboédriques).

3) Des laminations légèrement plissées coexistant avec des laminations régulières; ce type de structure semble illustrer un stade évolué de la structure en dominos.
4) Des fragments arrachés à l'encaissant selon une direction oblique par rapport aux épontes (planche 12). Ces fragments ont une géométrie similaire à celle des veines primaires (figure 12) de Labaume, Berty et Laurent (1991).

En dépit des quatre points énumérés ci-haut, les VPL et le litage ne sont pas déplacés par ces fractures cimentées : elles sont donc qualifiées de veines plutôt que de failles. Seules les veines du Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique contiennent des fragments d'encaissant. Ceux-ci sont toujours fortement clivés, à l'instar du matériel situé dans les épontes elles-mêmes. Le clivage est par ailleurs réfracté dans l'encaissant à l'approche des veines, et cette réfraction s'accentue à l'intérieur des veines.

3.4.2 Caractères pétrographiques

Deux types de ciment participent au remplissage des veines parallèles au front orogénique (tableau 2). Le premier type est constitué de fins cristaux (< 1 mm) anédriques de calcite (plus de 80 %) et de quartz (moins de 20 %), le second de grands cristaux (> 2 mm) subeuédriques à euédriques de calcite (40 à 60 %) et de quartz (40 à 60 %). Dans les deux cas, la calcite est peu luminescente, dans les tons brun-orangé, et montre peu de différences de luminescence par rapport à l'encaissant. Une texture composite est parfois observée en cathodoluminescence, ce qui indique que certains ciments ont pu être recristallisés. Il n'est toutefois pas possible d'associer cette texture à un type de ciment en particulier (cristaux fins et anédriques ou grands et euédriques). Le quartz est très terne voire non-luminescent dans les veines, et luminescent dans l'encaissant. La différence de la luminescence semble essentiellement contrôlée par la différence de lithologie, les ciments échantillonnés dans le Groupe de Beekmantown étant systématiquement plus luminescents que ceux provenant du Groupe de Trenton. Quand un seul type de ciment est présent dans la veine il s'agit systématiquement du ciment à larges cristaux euédriques de calcite et de quartz, sinon les deux types de ciment sont

disposés en bandes régulières et parallèles aux épontes mais les faisceaux argileux ou les fragments d'encaissant qui les séparent sont discontinus, à l'inverse des VPL, de sorte que l'on ne peut parler de laminations comme pour les VPL. En outre on retrouve fréquemment de grands cristaux de quartz et de calcite isolés dans les bandes de cristaux fins à quartz et/ou calcite, de sorte que la chronologie des deux remplissages ne peut être clairement établie sur la base de ces seules observations. Un seul ciment est non-luminescent : il s'agit de celui des veines en échelon dans le Groupe de Black River.

3.4.3 Déformations

Les *veines d'extension* sont systématiquement recoupées par les VPL. Quand leur intersection est visible, le déplacement est centimétrique. Dans les roches du Groupe de Beekmantown, aucun clivage n'est observable dans l'encaissant à proximité des veines, autant à l'échelle de l'affleurement qu'à celui de la lame mince. Un clivage semble pourtant affecter discrètement les veines : il est souligné par de fins stylolites parallèles aux épontes qui prennent naissance dans les fragments d'encaissant et se prolongent dans le ciment des veines. Dans les roches du Groupe de Trenton, où le clivage est beaucoup mieux développé, on peut voir que celui-ci pré-date l'ouverture des veines perpendiculairement aux épontes (planches 20 et 21). Il est aussi présent dans les fragments d'encaissant contenus dans les veines. Ces mêmes veines sont à leur tour affectées par un clivage concentré dans certains bancs seulement. Les assemblages sont fréquemment fracturés, de fins cristaux de quartz étant alors disposés au long des fractures intra- et inter-cristallines.

Deux déformations majeures affectent les ciments des *veines de cisaillement.* Elles coexistent dans certaines veines, et sont toutes deux absentes dans les autres. Dans certaines veines, on remarque en effet que le matériel euédrique large a été cisaillé parallèlement aux épontes pour donner des bandes de cristaux anédriques fins. Un réseau anastomosé de minces bandes de cristaux de quartz fins recoupe les cristaux de calcite euédriques. Les bandes parallèles aux épontes sont connectées entre elles par des bandes disposées en oblique (planche 22). Notons enfin que ces bandes de cristaux fins peuvent

se situer indifféremment près des épontes ou au cœur des veines. Des veinules perpendiculaires aux épontes recoupent l'encaissant, le clivage et une partie de la veine, avec laquelle elles finissent par se confondre. Le remplissage est identique à celui des veines en termes de pétrographie et de luminescence. Ces veinules soulignent une direction d'extension parallèle aux épontes.

3.5 Les veines perpendiculaires au front orogénique

3.5.1 Caractères structuraux

On n'observe les veines perpendiculaires au front orogénique qu'en deux endroits très localisés le long de la Route 235 : un petit groupe au début de la coupe dans les roches du Groupe de Beekmantown, et un autre dans celles du Groupe de Trenton. Elles sont absentes de la Carrière Saint-Dominique. Leur attitude moyenne est N294/86 (n=15, figure 15).

Dans le Groupe de Beekmantown, certaines veines recoupent des VPL, qui elles-mêmes recoupent d'autres veines perpendiculaires au front : les deux familles sont donc contemporaines dans le Groupe de Beekmantown. Les veines du Groupe de Trenton sont recoupées par le clivage, mais il n'est pas possible d'observer d'autres relations de recoupement.

3.5.2 Caractères pétrographiques

Les ciments des veines perpendiculaires au front orogénique (planche 23) sont constitués par un assemblage de grands cristaux (> 2 mm) de calcite jointifs, anédriques et fracturés, et de petits cristaux (< 1 mm) euédriques de calcite et de quartz disposés dans les fractures inter- et intra-cristallines (tableau 2). Il n'y a pas de différence dans la luminescence des deux types de ciments : elle est composite et luminescente dans les tons brun-orangé dans le Groupe de Beekmantown, et terne à très terne dans les tons brun-orangé dans le Groupe de Trenton (il en va de même pour l'encaissant micritique). Le

quartz présent dans la veine est non-luminescent, ce qui, au moins pour le Groupe de Beekmantown, contraste avec l'encaissant gréseux où des grains de quartz arrondis et luminescents coexistent avec un ciment siliceux plus tardif et non-luminescent.

Lorsque l'encaissant est gréseux (Groupe de Beekmantown), le premier ciment est constitué de cristaux fibreux de quartz disposés perpendiculairement à la veine. Ces cristaux soulignent l'ouverture de la veine selon une direction perpendiculaire aux épontes. Le ciment de calcite qui succède au quartz est quand à lui euédrique et dépourvu d'orientation préférentielle. Quand l'encaissant est une micrite (Groupe de Trenton), des fragments arrondis ou anguleux de cette micrite sont présents au coeur de la veine (planche 24) et contrastent avec les fragments allongés parallèlement aux épontes qui bordent celles-ci et soulignent la direction d'ouverture de la veine. Les fragments anguleux indiquent que le coeur de la veine a été bréchifié. On voit parfois de fines veinules de calcite perpendiculaires à la veine, qui traversent l'encaissant micritique et se prolongent dans celle-ci. L'absence de contraste dans la luminescence ne permet pas de voir avec précision où ces veinules s'interrompent, mais elles recoupent clairement les cristaux de calcite situés à proximité des épontes.

CHAPITRE 4
ANALYSE ISOTOPIQUE

Les résultats de 108 analyses isotopiques ($\delta^{13}C$ et $\delta^{18}O_{PDB}$) pratiquées sur l'encaissant micritique des veines et sur les ciments de calcite qui scellent les différentes familles de veines et de failles sont reportées dans l'appendice A. Le tableau 3 résume ces résultats et présente la signature isotopique moyenne de chaque famille structurale.

Famille structurale	Groupe stratigraphique	N	Min. $\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	Max. $\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	Moy. $\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	Min. $\delta^{13}C$‰	Max. $\delta^{13}C$‰	Moy. $\delta^{13}C$‰
Encaissant	Beekmantown	2	-4.8	-4.8	-4.8	-1.14	-1.01	-1.07
	Beekmantown	5	-9.5	-7.8	-8.6	-1.81	-0.34	-1.03
	Black River	1			-2.5			1.32
	Trenton	7	-7.3	-6.2	-6.6	1.07	1.61	1.41
VPL	Beekmantown	26	-9.7	-8.2	-8.6	-1.59	-0.08	-0.71
	Chazy	1			-7.5			-0.84
	Black River	2	-7.5	-6.9	-7.2	0.87	1.18	1.25
	Trenton	17	-8.1	-4.7	-6.5	0.60	1.96	1.20
Veines d'extension parallèles au front	Beekmantown	4	-9.5	-8.3	-8.8	-0.64	-0.23	-0.45
	Black River	2	-7.9	-7.5	-7.7	-1.32	-0.84	-1.08
	Trenton	2	-7.5	-6.5	-7.0	1.36	1.67	1.52
V. de cisaillement parallèles au front	Beekmantown	2	-10.0	-8.4	-9.2	-1.37	-0.28	-0.83
	Trenton	9	-7.0	-6.2	-6.5	1.25	1.44	1.33
Fentes de tension	Trenton	4	-7.0	-5.8	-6.5	0.89	1.37	1.08
Veines perpendi-culaires au front	Beekmantown	3	-10.5	-8.6	-9.4	-2.51	-1.06	-1.78
	Trenton	2	-7.3	-6.7	-7.0	0.61	1.29	0.95
Veines NE-SO	Black River	2	-7.9	-6.9	-7.4	-1.32	0.52	-0.40
Failles inverses	Beekmantown	5	-8.5	-6.1	-7.8	-1.03	-0.25	-0.55
	Trenton	2	-6.2	-6.0	-6.1	1.39	1.66	1.52
Failles normales	Black River	1			-7.7			0.88
	Trenton	7	-6.8	-3.4	-5.6	0.52	1.78	1.42
Failles décrochantes	Beekmantown	1			-5.4			1.00
	Black River	1			-1.1			-1.05

Tableau 3: Moyennes des signatures isotopiques de chaque famille structurale.

Notre objectif ici est d'identifier les caractères propres à chaque famille de ciment précipité dans les veines et les failles et de reconnaître, si elle existe, l'évolution du signal

isotopique au sein d'une même famille de ciments et entre les familles. Ces caractères risquent d'être obscurcis par le contrôle qu'exerce l'encaissant sur la chimie des fluides à partir desquels a lieu la précipitation. Les résultats pour les groupes de Beekmantown, Chazy, Black River et Trenton sont donc examinés séparément. Ils sont en outre comparés au signal isotopique de la calcite précipitée à partir de l'eau de mer, afin de mettre en lumière l'influence que peut avoir l'encaissant sur les ciments des veines et des failles. Comme aucune étude diagénétique n'a été entreprise sur les roches de l'écaille de Saint-Dominique, les champs marins pour les âges Ibexien tardif à Trentonien ont été établis d'après les compilations de Popp, Anderson et Sandberg (1986), Lohmann et

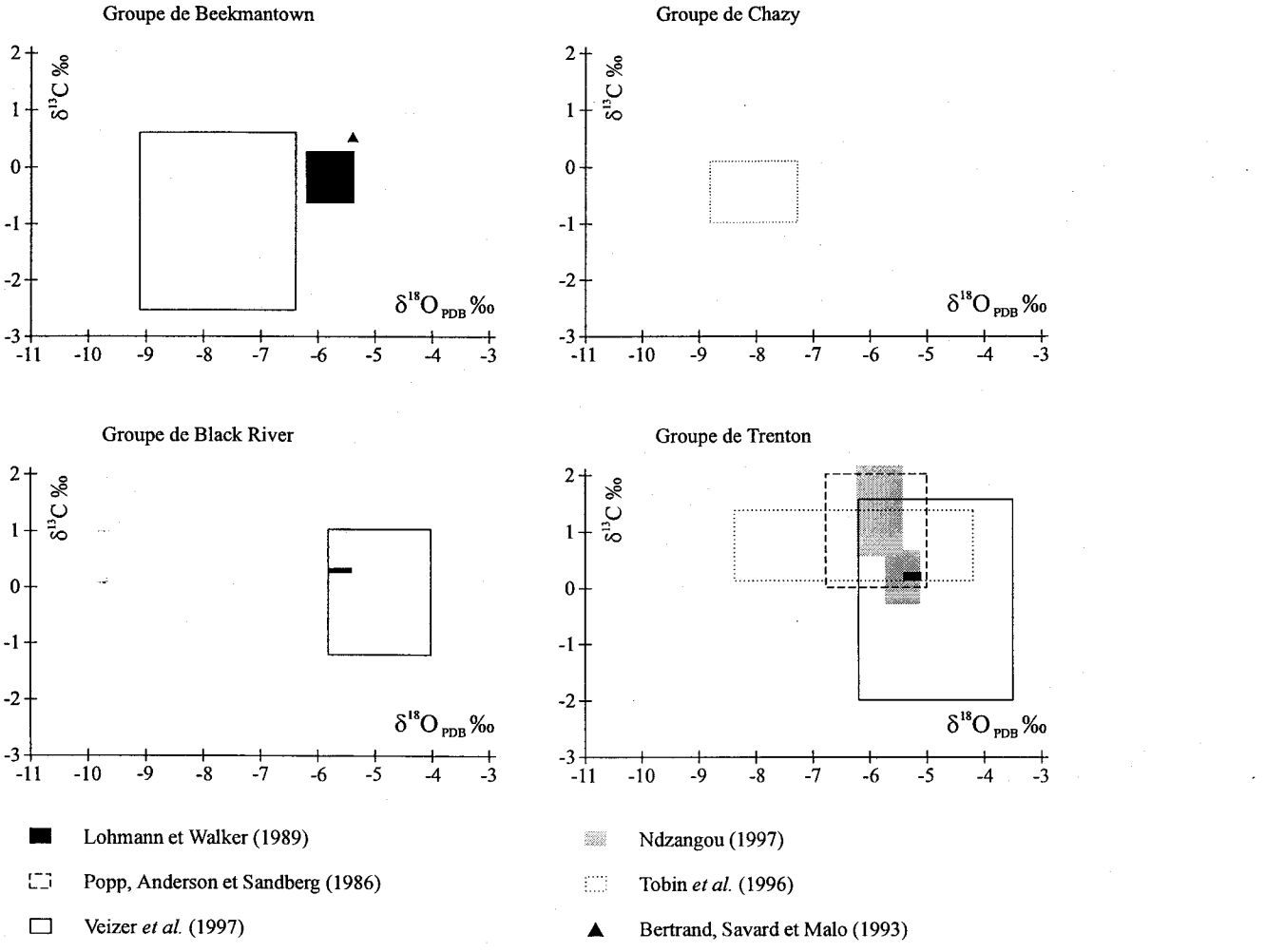


Figure 17: Compilation du signal isotopique des calcites marines d'après différents auteurs.

Walker (1989) et Veizer *et al.* (1997). Ces données sont compilées à partir d'études faites dans le monde entier. Elles ont donc été complétées par des études réalisées dans les Appalaches centrales et dans les Basses-Terres du Saint-Laurent afin de limiter l'effet des variations locales inhérentes aux conditions particulières à chaque plate-forme carbonatée. Des ciments marins ont été analysés dans le Groupe de Beekmantown de l'écaille parautochtone de Saint-Flavien (Bertrand, Savard et Malo, 1993) et dans la Formation de Deschambeault du Groupe de Trenton, dans la plate-forme autochtone, par Ndzangou (1997). Les données de Tobin *et al.* (1996) sont également présentées pour des roches équivalentes au Groupe de Trenton dans le Tennessee. La figure 17 donne le détail de cette compilation. Seuls les champs marins connus pour le sud du Québec seront reportés sur les graphiques suivants. Le lecteur désireux de comparer ces résultats aux champs marins mondiaux pourra se référer à la figure 17.

4.1 L'encaissant

Les échantillons ont été prélevés à des distances variables des veines et sur toute la longueur des affleurements. Seuls deux échantillons provenant du Groupe de Beekmantown sont plus pauvres en ^{18}O que les calcites marines d'après les données disponibles dans la littérature. Les signatures des autres échantillons des groupes de Beekmantown et de Trenton sont proches de celles des veines ($\delta^{18}O$ plus négatif et $\delta^{13}C$ encore proche du signal marin). On peut reconnaître cette différence sur la figure 18, où les signatures des microsparites de l'encaissant sont superposées au champ de l'ensemble des veines et failles : la différence entre les deux familles ne dépend pas de la distribution géographique ou lithologique de l'échantillonnage, car des échantillons voisins présentent des signatures très différentes. En revanche, les microsparites dont la signature est voisine de celle des ciments des veines ont été prélevées à proximité de ces veines (moins de 10 cm), et à l'inverse les microsparites qui ont une signature marine ont été prélevées loin des veines.

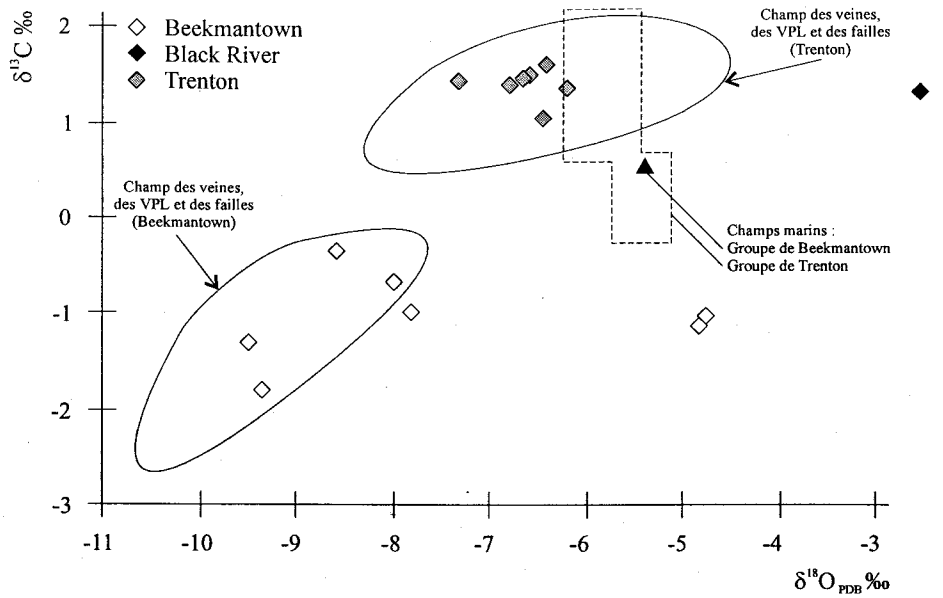


Figure 18: Valeurs isotopiques des microsparites de l'encaissant des veines, des VPL et des failles, pour les groupes de Beekmantown, Black River et Trenton.

4.2 Les failles

4.2.1 Les failles normales

Une seule faille normale a été échantillonnée dans le Groupe de Black River (F_5, échantillon 120B, figure 6A). Sa signature (figure 19) est proche de celle des veines nord-est/sud-ouest échantillonnées à proximité, mais elle est plus positive que celle des veines en échelon qui lui sont structuralement associées (échantillon 88).

Sept échantillons ont été prélevés sur les failles normales observées dans le Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique (F_{18}, échantillons 131A et 131B; F_{17}, échantillons 64 et 132; F_{12}, échantillons 133A et 133B et F_{11}, échantillon 76). Leurs signatures isotopiques sont proches les unes des autres (figures 19 et 20) à l'exception de celle de l'échantillon 76 (F_{11}), qui est beaucoup plus riche en ^{18}O et pauvre en ^{13}C, et dont la signature est proche de celle des calcites marines selon les données bibliographiques disponibles. Lorsque leurs ciments comportaient une structure massive et une structure laminée, elles ont été analysées toutes les deux : les différences entre ces deux structures sont significatives, mais ne définissent aucune tendance.

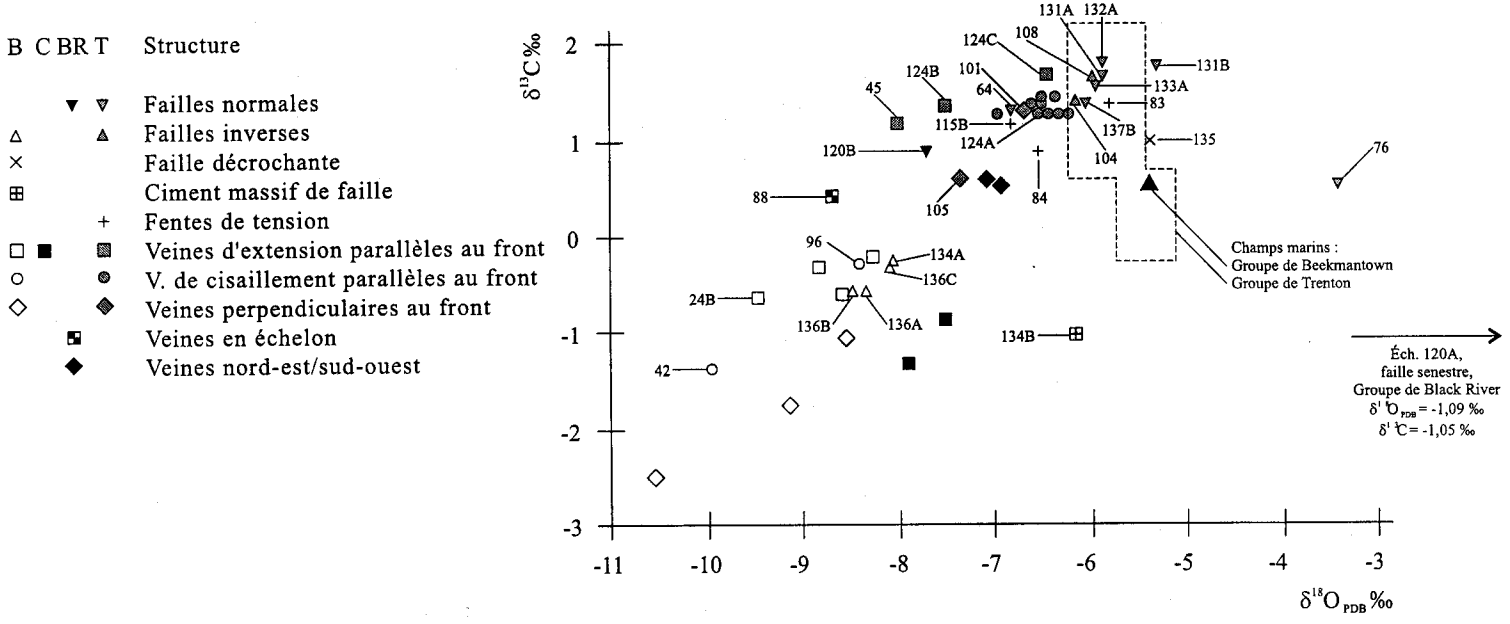


Figure 19: Valeurs isotopiques des ciments des failles et des veines parallèles et perpendiculaires au front orogénique. B: Groupe de Beekmantown, C: Groupe de Chazy, BR: Groupe de Black River, T: Groupe de Trenton.

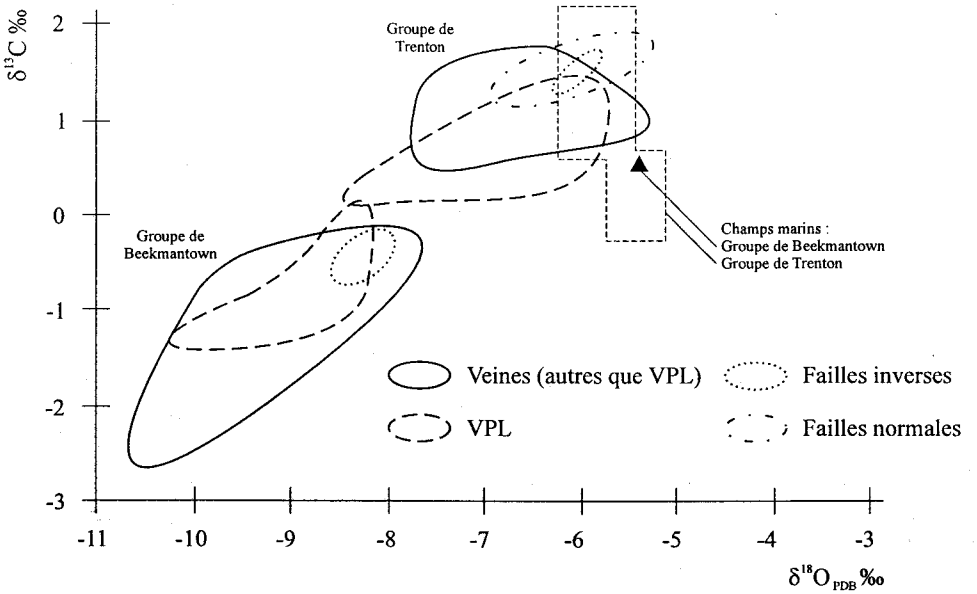


Figure 20: Champs des veines et des failles dans les groupes de Beekmantown et de Trenton (synthèse des données de la figure 17 et des VPL)..

4.2.2 Les failles inverses

Les différents ciments des failles inverses présentes dans le Groupe de Beekmantown (F_2 et F_3) ont été échantillonnés (figure 19) : ce sont les ciments 134A et 134B pour F_2 et 136A, 136B et 136C pour F_3. Ils possèdent tous des signatures isotopiques voisines, à l'exception du ciment 134B qui est enrichi en ^{18}O et appauvri en ^{13}C par rapport aux autres ciments.

Une faille inverse a été échantillonnée dans le Groupe de Trenton le long de la Route 235 (F_4, échantillons 104 et 108, figure 6B). Les deux signatures sont voisines de celles des failles normales étudiées dans le Groupe de Trenton de la Carrière Saint-Dominique (figure 20).

4.2.3 Les failles décrochantes

Dans le Groupe de Beekmantown, le ciment des stries sub-horizontales prélevées sur la faille F_2 (échantillon 135) a une signature beaucoup plus riche en isotopes lourds

que celles des autres ciments de faille et de veines du Groupe de Beekmantown (figure 19).

Dans le Groupe de Black River, le ciment 120A correspondant aux stries sub-horizontales prélevées sur l'éponte de la faille F_5 (figure 19) est enrichi en ^{18}O et appauvri en ^{13}C par rapport au ciment qui correspond au mouvement normal de F_5.

4.3 Les veines parallèles au litage

L'analyse des ciments des VPL a été réalisée de façon à répondre à six questions : 1) Quelle est l'étendue de la signature isotopique des veines à travers l'ensemble des affleurements disponibles ? 2) Ce signal varie-t-il sur la longueur d'une veine ? 3) Existe-t-il une variation isotopique significative d'une lamination à l'autre entre les épontes d'une veine ? 4) Peut-on reconnaître une signature isotopique particulière pour chaque génération de ciment ? 5) Existe-t'il une différence significative entre les structures massive et laminée d'une même veine ? 6) Quel lien peut-on faire entre les variations pétrographiques et géochimiques ?

4.3.1 Variation isotopique à l'échelle de l'affleurement

Au total, 44 échantillons de ciments provenant de 26 veines ont été analysés à travers l'ensemble des affleurements (figure 21). Si une seule VPL a été échantillonnée dans le Groupe de Chazy et deux seulement dans le Groupe de Black River, l'étude des populations de VPL dans les groupes de Beekmantown (26 analyses) et de Trenton (15 analyses) permet en revanche d'identifier au sein de chaque groupe stratigraphique un certain nombre de caractères communs. Ainsi, l'ensemble des résultats souligne une variation conjointe du $\delta^{13}C$ et du $\delta^{18}O$. Les échantillons les plus riches en ^{18}O sont également les plus riches en ^{13}C, et inversement. À l'intérieur d'un même groupe stratigraphique, la variabilité reconnue à travers l'ensemble de l'affleurement est à peine supérieure à celle qui existe à l'intérieur d'un seul échantillon (voir le point n° 3, figure 22, échantillon 41) ou d'une seule veine (voir le point n° 2, échantillons 127 à 129). La

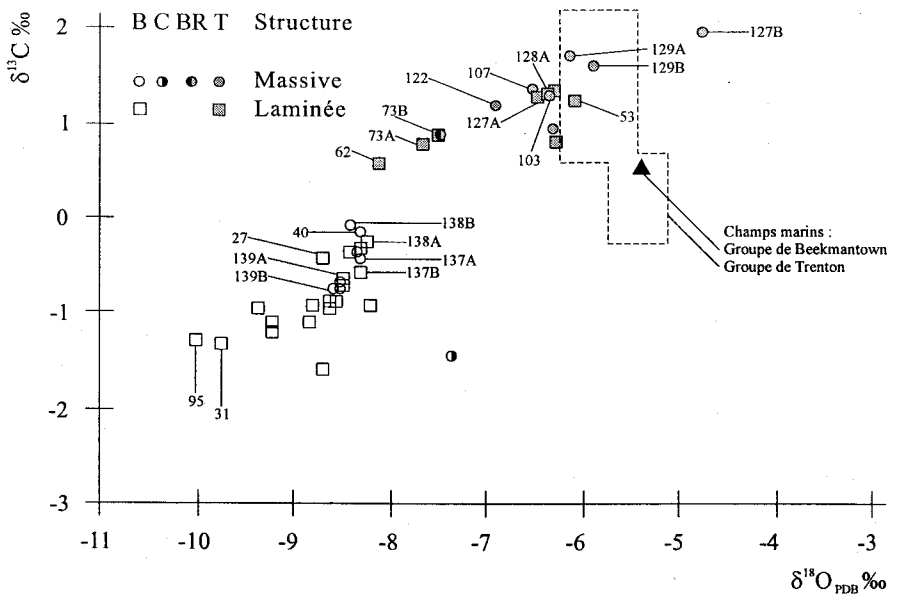


Figure 21: Valeurs isotopiques des ciments de calcite des VPL. B: Groupe de Beekmantown, C: Groupe de Chazy, BR: Groupe de Black River, T: Groupe de Trenton.

seule différence entre les deux groupes réside dans l'étendue du champ de l'oxygène : les rapports $\delta^{18}O_{PDB}$ et $\delta^{13}C$ du Groupe de Beekmantown enregistrent respectivement une variation de 1,5 ‰ et 1,51 ‰, tandis que pour le Groupe de Trenton, cette variation vaut 3,3 ‰ et 1,36 ‰, respectivement (figure 21).

4.3.2 Variation isotopique à l'échelle d'une veine

4.3.2.1 Variation sur la longueur d'une veine

La variation du signal isotopique a été étudiée sur la longueur de deux VPL dans le Groupe de Beekmantown (échantillons 137, 138 et 139 le long de la Route 235) et dans le Groupe de Trenton (échantillons 127, 128 et 129 dans la Carrière Saint-Dominique). Dans les deux cas les échantillons proviennent respectivement du flanc est, de la charnière et du flanc ouest de deux synclinaux (figure 5). Chacun de ces échantillons comportait une structure massive et une structure à laminations : chacune d'elle a donc été analysée.

- Dans le Groupe de Beekmantown, l'analyse révèle une variation significative du rapport $\delta^{13}C$, et mineure du rapport $\delta^{18}O_{PDB}$. L'échantillon provenant de la charnière est le plus riche en ^{13}C, et celui du flanc ouest en est le plus dépourvu. Les différences entre les structures massive et laminée en un point de la veine sont négligeables par rapport aux différences qui existent entre deux points éloignés. Il n'existe par ailleurs aucune relation entre la signature isotopique et la position structurale d'un échantillon (dans les flancs ou la charnière).

- L'absence de relation entre la signature isotopique et la position structurale d'un échantillon se retrouve également dans le Groupe de Trenton, avec cette fois une plus grande variation dans les signatures ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -8,1 à -5,9 ‰ et $\delta^{13}C$ = 0,60 à 1,72 ‰). Il n'est pas possible d'établir de lien entre les signatures des structures massive et laminée pour un même échantillon car la structure massive est absente dans l'échantillon 128 et la structure laminée est absente dans l'échantillon 129. Il est aussi important de noter que la structure massive de l'échantillon 127 est fortement enrichie en isotopes lourds par rapport à la structure laminée et aux autres ciments de la VPL.

4.3.2.2 Variation d'une lamination à l'autre

Deux veines ont été sélectionnées dans le Groupe de Beekmantown (échantillons 41 et 94) pour étudier la variation du signal isotopique d'une lamination à l'autre entre les épontes d'une même VPL. Dans les deux cas l'ensemble des signatures isotopiques des laminations souligne une variation plus importante du rapport $\delta^{18}O_{PDB}$ que du $\delta^{13}C$:

- L'échantillon 41 comporte 6 laminations séparées par des faisceaux argileux épais provenant de l'encaissant (planche 4). La signature isotopique de ces laminations (figure 22) couvre un champ très large ($\delta^{18}O_{PDB}$ de -9,3 à -8,4 ‰ et $\delta^{13}C$ de -1,21 à -0,37 ‰) : les différentes laminations d'une seule VPL peuvent donc couvrir un champ qui est presque aussi large que celui défini par l'ensemble des VPL (figure 21). Il est ainsi possible de comparer la variation du $\delta^{18}O_{PDB}$ et du $\delta^{13}C$ de l'échantillon 41 (0,9

et 0,84 ‰, respectivement) avec l'ensemble des valeurs obtenues pour les VPL du même groupe: 1,5 et 1,51 ‰ respectivement (voir le point n° 1).

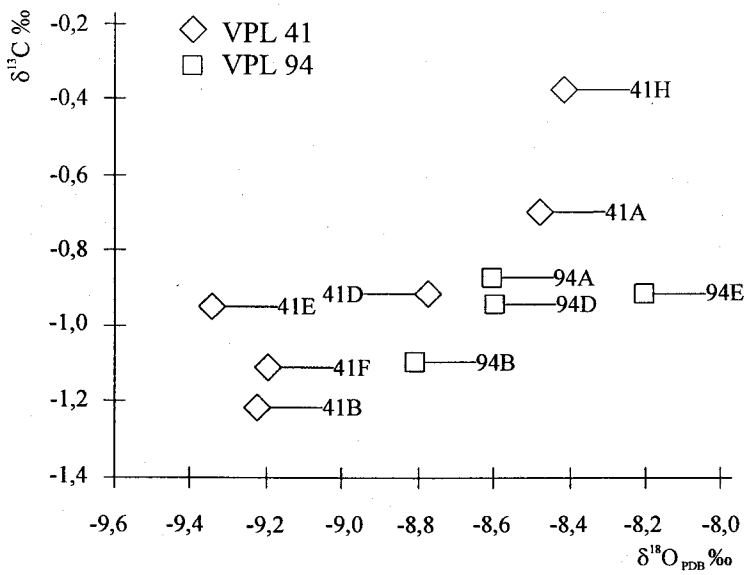


Figure 22: Ciments des laminations des VPL 41 et 94, Groupe de Beekmantown.

- L'échantillon 94 comporte 4 laminations de luminescences légèrement différentes, séparées par de fins stylolites parallèles aux épontes et à dents perpendiculaires aux épontes. Bien que les signatures soient peu différentes les unes des autres (figure 22), les écarts entre elles sont significatifs ($\delta^{18}O_{PDB}$ de -8,8 à -8,2 ‰ et $\delta^{13}C$ de -1,10 à -0,87 ‰) et révèlent que deux laminations de luminescences différentes séparées par des stylolites peuvent posséder des signatures isotopiques distinctes. D'un point de vue structural, la VPL d'où provient cet échantillon se distingue des autres VPL par des stries indiquant un sens de mouvement apparemment incompatible avec le plissement par glissement et flexion. L'ensemble des signatures isotopiques des laminations de l'échantillon 94 ne paraissent pas en revanche devoir être distinguées de celles des autres VPL.

4.3.3 Les générations de ciments

Au cours de l'analyse structurale, quatre générations de ciment ont été identifiées sur la base des relations de recoupement observables au microscope (figure 14). Elles correspondent respectivement à 1) une ouverture perpendiculairement aux épontes, 2 et 3) un cisaillement parallèlement aux épontes, 4) une extension parallèlement aux épontes et 5) un cisaillement parallèlement aux épontes. La finesse des ciments limitant souvent les possibilités d'échantillonnage, seules les générations 2 et 3 ont pu être analysées de façon satisfaisante pour les groupes de Beekmantown et de Trenton. Le seul échantillon représentant la première génération provient du Groupe de Beekmantown (échantillon 31). Aucun ciment de la quatrième génération n'a pu être échantillonné dans des conditions satisfaisantes. Les résultats sont reportés dans la figure 23. Aucune tendance n'émerge de la répartition des signatures isotopiques des ciments des trois premières générations.

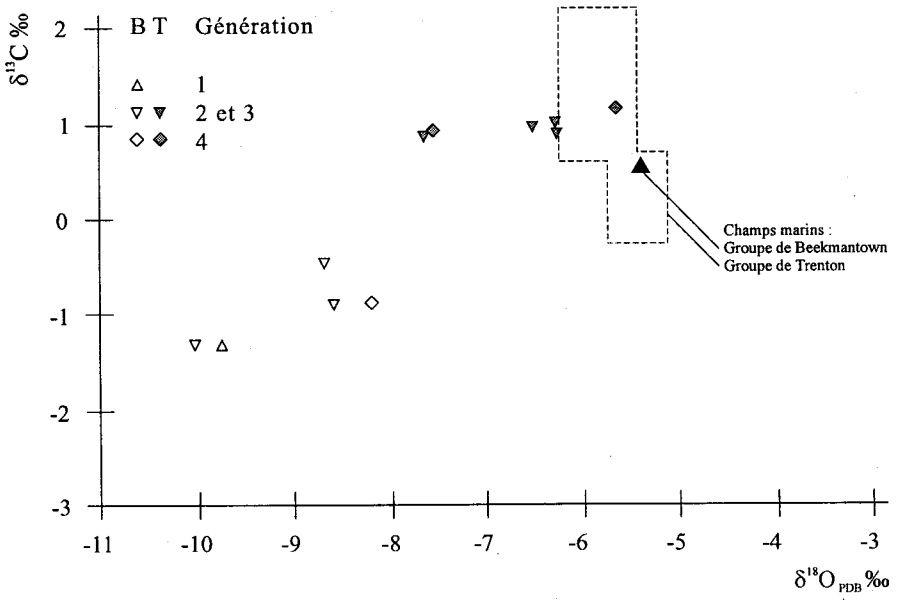


Figure 23: Générations de ciments dans les VPL. B: Groupe de Beekmantown, T: Groupe de Trenton.

4.3.4 Les structures massive et laminée

Quatre échantillons comportant une structure massive et une structure laminée ont été choisis parmi les VPL des groupes de Beekmantown et de Trenton (figure 24). La différence entre les deux structures au sein d'un même échantillon est inférieure à 0,2 ‰ pour $\delta^{18}O_{PDB}$ et $\delta^{13}C$, ce qui est à la limite du seuil d'erreur pour l'oxygène (± 0,1 ‰) mais encore au-dessus de celui du carbone (± 0,05 ‰). Cette différence est bien inférieure à celle observée entre les deux structures observées au sein d'une même veine mais provenant d'échantillons éloignés (0,4 ‰ pour $\delta^{18}O_{PDB}$ et 0,67 ‰ pour $\delta^{13}C$).

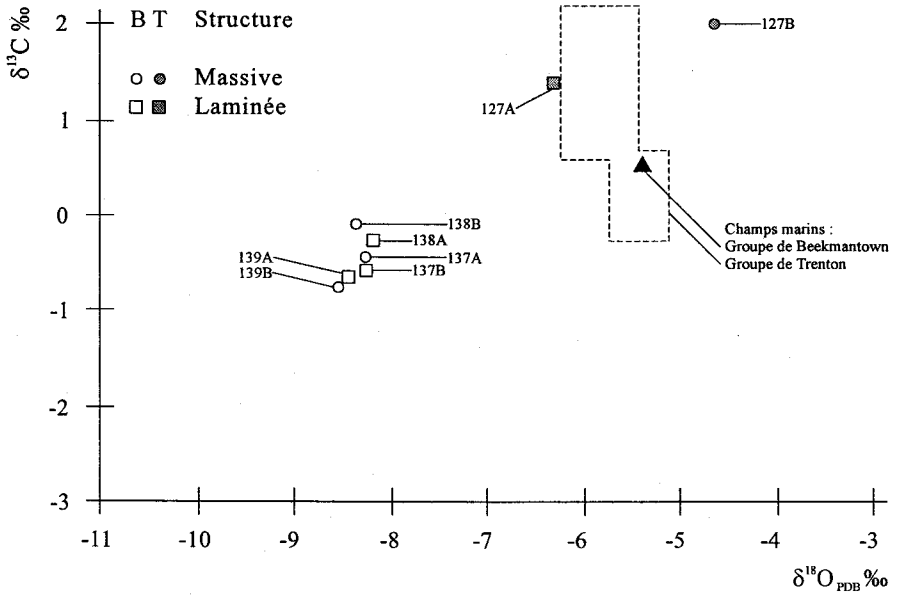


Figure 24: Comparaison entre les ciments des structures massive et laminée des VPL. B: Groupe de Beekmantown, T: Groupe de Trenton.

4.3.5 Lien avec les variations pétrographiques

Les ciments des VPL laminées ont été divisés en sept assemblages pétrographiques (le lecteur aura avantage à se référer à la page 37 pour une description de chacun d'eux). La signature isotopique de tous ces assemblages a été examinée à l'exception de l'assemblage numéro 2, qui n'a pas pu être échantillonné, et de l'assemblage

numéro 1a, pour lequel seuls des échantillons provenant du Groupe de Beekmantown sont disponibles.

- Dans le Groupe de Beekmantown, les assemblages 1a, 1s et 1e sont caractérisés par des signatures distinctes (figure 25). Les calcites anédriques (1a) sont les plus pauvres en isotopes lourds, les calcites euédriques (1e) ont une signature intermédiaire et les calcites subeuédriques (1s) sont les plus enrichies.

- Dans le Groupe de Trenton, la calcite subeuédrique est appauvrie en isotopes lourds par rapport à la calcite euédrique (figure 25), contrairement à ce qui avait été observé dans le Groupe de Beekmantown.

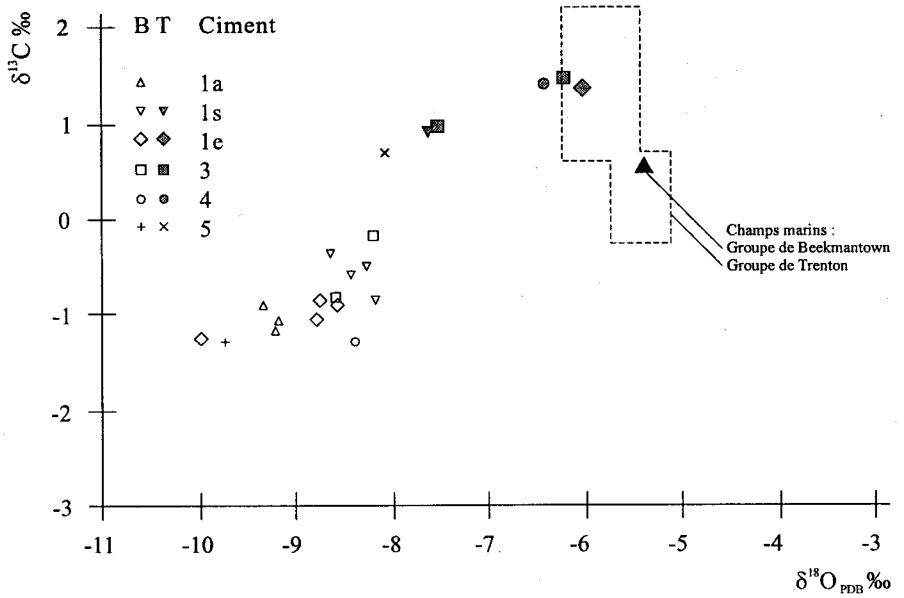


Figure 25: Assemblages pétrographiques dans les VPL. B: Groupe de Beekmantown, T: Groupe de Trenton.

4.4 Les veines parallèles au front orogénique

4.4.1 Les fentes de tension

Trois fentes de tension ont été échantillonnées dans le Groupe de Trenton à la Carrière Saint-Dominique (figure 19). Les signatures isotopiques de cette famille de

veines sont hétérogènes. Ainsi les échantillons 83B et 84 (figure 6A) présentent des signatures très différentes l'une de l'autre, bien qu'ils proviennent de la même unité calcaire et ne soient distants l'un de l'autre que de quelques dizaines de centimètres. La dernière fente de tension (échantillons 115B et 115C) est encore ouverte et comporte deux ciments : celui qui est le plus près de l'éponte est le plus pauvre en isotopes lourds, celui qui est le plus près du cœur de la fente en est le plus riche.

4.4.2 Les veines d'extension

- Les signatures de trois des quatre veines d'extension analysées dans le Groupe de Beekmantown sont proches les unes des autres (figure 19). Le quatrième échantillon (24B), bien qu'appauvri en ^{18}O par rapport aux autres, provient d'une veine qui n'est pas structuralement ni pétrographiquement différente des trois premières : son signal isotopique doit donc être intégré aux trois premières analyses afin de mieux refléter la variabilité qui existe au sein des veines d'extension.

- Deux veines ont été échantillonnées dans le Groupe de Chazy (figure 19). La plus riche en ^{18}O est aussi la plus riche en ^{13}C.

- Une seule veine d'extension (échantillon 124, figure 19) a été étudiée dans le Groupe de Trenton. L'analyse de ces trois ciments montre que des ciments ayant des signatures différentes (le rapport $\delta^{18}O_{PDB}$ varie de 1,0 ‰ et le $\delta^{13}C$ de 0,41 ‰) peuvent coexister au sein d'un même échantillon. Aucune relation de recoupement n'est malheureusement visible entre ces trois ciments.

4.4.3 Les veines de cisaillement

L'analyse isotopique a porté sur les ciments des deux veines de cisaillement dans le Groupe de Beekmantown et de neuf d'entre elles dans le Groupe de Trenton :

- Les signatures des ciments des deux veines de cisaillement provenant du Groupe de

Beekmantown (échantillons 42 et 96) sont très différentes l'une de l'autre et s'inscrivent chacune à l'une des extrémités du champ de l'ensemble des veines (figure 19). Elles sont respectivement comparables aux signatures de certains ciments de l'échantillon de VPL n° 41 (ciments 41B, 41E et 41F, figure 22) et de la faille F_1 (ciment 134A, figure 19), avec lesquelles ces veines cisaillantes sont structuralement et géographiquement associées.

- Les signatures des neuf veines de cisaillement échantillonnées dans le Groupe de Trenton sont très proches les unes des autres (figure 19) et sont proches aussi des VPL qui se sont formées en même temps (figure 20).

4.5 Les veines perpendiculaires au front orogénique

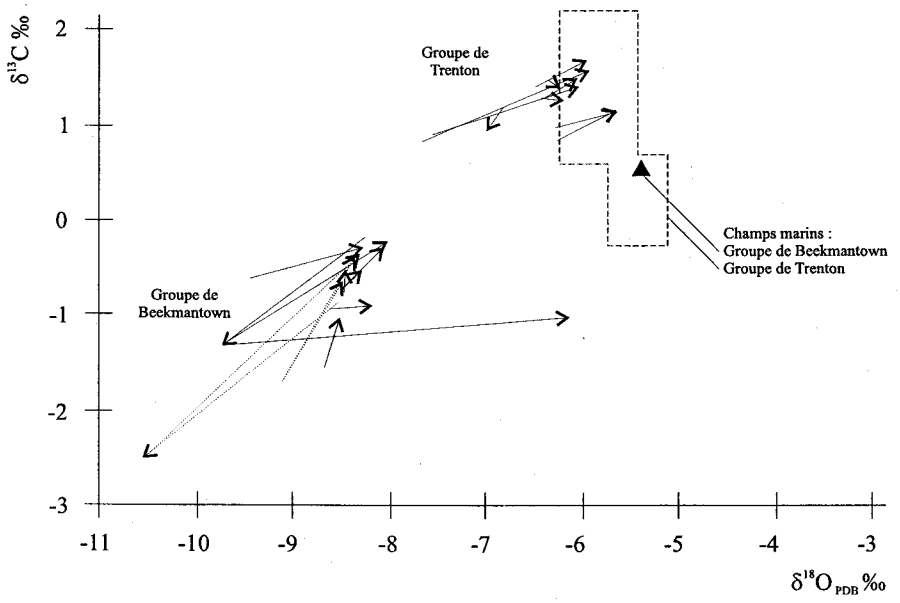
- Les veines perpendiculaires au front orogénique dans le Groupe de Beekmantown sont présentes au début de la coupe seulement. L'analyse de trois d'entre elles montre qu'en dépit de leur manque de représentativité (petit nombre et répartition géographique restreinte), ces veines font preuve d'une grande variété dans leurs signatures isotopiques (figure 19), variété qui est marquée par une variation conjointe du $\delta^{18}O$ et du $\delta^{13}C$. Comme pour les autres familles de veines les signatures des ciments des veines perpendiculaires au front orogénique sont fortement influencées par l'encaissant, mais la variation du $\delta^{13}C$ est ici beaucoup plus marquée. Il semble donc que des conditions de précipitation ou un fluide parent légèrement différents soient impliquées dans la cimentation de ces veines. Signalons aussi que c'est parmi les veines perpendiculaires au front orogénique que l'on trouve les échantillons les plus pauvres en isotopes lourds de l'oxygène et surtout du carbone (échantillon 22, appendice A).

- Seules deux veines très proches l'une de l'autre ont pu être analysées dans le Groupe de Trenton de la Route 235 (échantillons 101 et 105A, figure 6B). La première a une signature voisine de celle des veines parallèles au front orogénique, la seconde est appauvrie en ^{13}C et dans une moindre mesure en ^{18}O (figure 19). On ne peut définir

aucune tendance à partir de ces seuls échantillons mais ils semblent cependant se comporter comme ceux du Groupe de Beekmantown.

4.6 Les relations de recoupement

La figure 26 montre l'évolution du signal isotopique des ciments des veines, des veinules et des failles en fonction des relations de recoupement structurales et microstructurales. Il apparaît que la variation du signal isotopique se fait essentiellement dans le sens d'un enrichissement en ^{18}O et dans une moindre mesure en ^{13}C, aussi bien pour le Groupe de Beekmantown que pour celui de Trenton. Seules les veines perpendiculaires au front orogénique contemporaines de certaines VPL font exception et montrent un appauvrissement en isotopes lourds par rapport aux VPL.



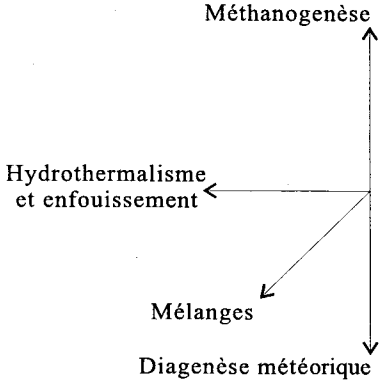


Figure 26: Évolution de la signature isotopique des ciments des veines et des failles en fonction des relations de recoupement structurales et micro-structurales. Les flèches en pointillés représentent les recoupements impliquant des veines perpendiculaires au front orogénique. L'évolution du signal isotopique d'un ciment précipité à partir de différentes conditions est représentée ci-contre.

CHAPITRE 5
DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans ce dernier chapitre, les résultats des analyses structurale, pétrographique et géochimique sont réunis pour discuter de la signification régionale des différentes familles de veines et de failles documentées. Le style de la déformation et l'orientation des éléments structuraux au sein de l'écaille avec ceux de la nappe immédiatement à l'est (Nappe de Granby) sont examinés, ainsi que la possibilité de déceler des indices d'extension pré- et post-taconienne. Enfin, un modèle est proposé pour intégrer et expliquer l'ensemble des observations structurales et géochimiques dans un contexte structural caractéristique d'une zone d'avant-pays.

5.1 L'interprétation des signatures isotopiques

Chaque fois que cela a été possible, les ciments présentant des évidences de recristallisation (texture composite en cathodoluminescence) ont été écartés de l'analyse isotopique. L'interprétation qui est faite des rapports $\delta^{18}O$ et $\delta^{13}C$ porte donc sur la nature du fluide impliqué et sur les conditions qui prévalaient au moment de la précipitation des ciments dans les fractures, et non pas au moment de l'ouverture de ces fractures. Dans la plupart des échantillons de VPL et de veines parallèles ou perpendiculaires au front orogénique, la présence de fragments d'encaissant dans les ciments indique que la cimentation des fractures est contemporaine de leur ouverture (planches 4 et 6). Aucune différence notable n'a été décelée entre les échantillons appartenant au Groupe de Trenton prélevés le long de la Route 235 et dans la Carrière Saint-Dominique. Les signatures isotopiques dépendent donc de l'histoire diagénétique et structurale mais non de la répartition géographique des affleurements.

La similitude entre le $\delta^{13}C$ des ciments des veines et des failles et les valeurs proposées dans la littérature pour les calcites marines aux âges concernés (figure 20)

permet de penser que les ciments analysés ont précipité à partir d'un fluide de même nature que les eaux de formation de l'encaissant. Les carbonates dissous lors du développement du clivage de plan axial dans l'encaissant proche des veines constituent une source importante pour les ciments de celles-ci. Toutefois le clivage ne permet pas, à lui seul, d'expliquer la cimentation des veines qu'il recoupe. Étant donné la faible différence observée entre les signatures isotopiques des ciments précipités avant et pendant le développement du clivage, les fluides présents dans la roche avant le développement du clivage devaient être de la même nature que ceux produits par les processus de dissolution liés à la formation du clivage. Les carbonates dissous lors du développement des stylolites et des faisceaux argileux parallèles au litage constituent la source la plus vraisemblable pour les ciments recoupés par le clivage. La plupart des relations de recoupement entre les ciments analysés mettent en lumière une évolution du signal isotopique essentiellement caractérisée par un enrichissement en ^{18}O, et dans une moindre mesure en ^{13}C (figure 26).

En général, un enrichissement en ^{18}O tel que celui révélé par la figure 26 peut avoir deux causes principales dans les conditions de la diagenèse classique : 1) une diminution de la température du fluide à partir duquel les ciments précipitent, consécutive à la diminution de la profondeur d'enfouissement selon un processus érosif ou tectonique (en supposant qu'il n'y a pas de variation dans le rapport $\delta^{18}O$ de l'eau parente); 2) un mélange avec un fluide de température similaire mais de salinité plus élevée (Banner et Hanson, 1990). Nos travaux n'ont révélé aucune variation majeure dans la pétrographie des ciments. Les assemblages minéralogiques sont toujours très homogènes, uniquement constitués de calcite avec parfois du quartz, et ceci même dans le Groupe de Beekmantown où l'encaissant est dolomitique. L'examen en cathodoluminescence a en outre révélé que les ciments ne sont que très occasionnellement zonés et que les différences de luminescence sont faibles entre les ciments des veines et de l'encaissant. Aucune évidence d'activité hydrothermale comparable à celle décrite par Paradis et Lavoie (1996) dans l'écaille d'Upton n'a par ailleurs été observée. Le Groupe d'Upton, considéré comme un équivalent à la Formation de Beauharnois du Groupe de Beekmantown par Globensky (1987) et Lavoie (1992), abrite des veines d'origine

tectonique minéralisées en barite avant la fin de l'orogenèse taconienne. L'activité hydrothermale qui a affecté la plate-forme autochtone au Mésozoïque (Carignan, Gariepy et Hillaire, 1997) ne semble pas non plus avoir affecté l'écaille de Saint-Dominique. L'enrichissement en ^{18}Odes ciments des veines est donc interprété comme le résultat d'une diminution progressive de la température de précipitation (Tucker, Wright et Dickson, 1990), sans changement majeur dans la salinité du fluide. Les travaux de Bertrand *et al.* (1993) et de Bertrand, Savard et Malo (1993) ont mis en évidence une diminution comparable de la température de précipitation des carbonates qui scellent les fractures dans l'écaille de Saint-Flavien.

L'enrichissement en ^{13}C est un phénomène peu fréquent au cours de la diagenèse, qui peut être une conséquence de la méthanogenèse, c'est-à-dire de la production de méthane au cours de la diagenèse précoce par l'activité microbienne, ou au-delà de la fenêtre à huile par destruction des chaînes organiques. La diagenèse d'enfouissement se traduit habituellement par une destruction progressive des molécules de matière organique à mesure que la température augmente. Le carbone organique, très pauvre en ^{13}C, est assimilé par la structure aqueuse et les carbonates qui précipitent à partir d'un tel fluide sont donc eux-mêmes appauvris en ^{13}C. Si les conditions sont favorables à la méthanogenèse avant qu'une précipitation de carbonates ne se produise, les réactions impliquées dans la production du méthane vont consommer en priorité le ^{12}C disponible dans le fluide : celui-ci s'enrichit progressivement en ^{13}C et les carbonates qui précipiteront à partir de ce fluide seront donc également enrichis en ^{13}C. L'enrichissement en ^{13}C des ciments des veines est donc interprété comme le résultat de la méthanogenèse. Cette interprétation est supportée par les travaux de Bertrand et Dykstra (1993), qui ont permis d'établir que les hydrocarbures ont été générés dans le domaine parautochtone pendant l'enfouissement sous les nappes à une profondeur pouvant dépasser 7 km, et que l'écaillage est survenu plus tard et à une profondeur moindre. Si les veines étudiées se sont développées pendant ou après l'enfouissement sous les nappes, leurs ciments ont pu enregistrer l'effet de la méthanogenèse. Le fait que l'enrichissement en ^{13}C dans les calcites soit progressif implique par ailleurs que la teneur en ^{13}C dans le fluide augmente elle aussi progressivement, soit par le mélange d'un fluide riche en ^{13}C avec les eaux de

formation, soit par méthanogenèse concomitante dans un système fermé affecté par un processus Rayleigh (Tucker, Wright et Dickson, 1990).

Les ciments des veines et des failles ont donc commencé à précipiter en enfouissement, à partir d'un fluide de même nature que celle des eaux de formation et qui s'enrichit peu à peu en ^{13}C par méthanogenèse en système fermé ou par mélange avec un fluide plus riche en ^{13}C. Le refroidissement qui accompagne la précipitation et que souligne l'enrichissement en ^{18}O peut être provoqué par une diminution de la profondeur d'enfouissement selon un processus érosif et tectonique, mais aussi par le mélange avec un fluide plus froid.

La variation plus forte du $\delta^{13}C$ pour les ciments des veines dans le Groupe de Beekmantown que dans celui du Groupe de Trenton (différences de 2,43 et 1,44 ‰ respectivement) pourrait s'expliquer par l'incorporation d'un volume plus important de fluides chargés en ^{13}C dans le premier groupe, qui est stratigraphiquement inséré entre les grès du Groupe de Potsdam et le membre des Grès de Saint-Dominique du Groupe de Chazy (page 14). Les fluides ont pu circuler plus rapidement à travers ces grès qu'au travers des calcaires du Groupe de Black River et des shales de l'Utica, qui sont respectivement au-dessous et au-dessus des roches du Groupe de Trenton.

5.2 Le plissement

Les structures les plus caractéristiques des affleurements visités sont les plis d'axe nord-nord-est, le clivage, et les failles directionnelles. L'orientation de ces structures est conforme aux observations de Prichonnet et Raynal (1977) pour le domaine central de l'écaille.

Différents types de plis ont été décrits le long de la Route 235 et dans la Carrière Saint-Dominique : des plis de rampe, droits et ouverts (figure 5B), et des plis par propagation déversés vers l'ouest (figure 5A). Le clivage est parallèle au plan axial dans chacun des cas. Il subit localement une réfraction due à des différences de compétence entre les bancs, mais n'est jamais disposé en éventail de part et d'autre des charnières : le

clivage s'est donc développé à la fin du plissement plutôt que pendant le raccourcissement parallèle au litage (*layer parallel shortening*, Ramsay et Huber, 1987b). Son attitude moyenne dans les affleurements n° 1 à 4 est N021/58, ce qui est très proche de l'attitude moyenne mesurée par Clark (1964) dans la Formation de Bourret (N020/65), qui chevauche l'écaille de Saint-Dominique à l'est (figure 1). Les affleurements sont peu nombreux dans cette nappe, mais chaque fois qu'il peut être mesuré le litage a un pendage vers l'est et correspond probablement aux flancs longs de plis isoclinaux déversés vers l'ouest (Clark, 1964). Il ne semble donc pas exister de différence significative entre l'orientation des axes de raccourcissement dans l'écaille et dans les nappes environnantes.

5.3 Les failles

5.3.1 Les failles normales

Toutes les failles observées sont orientées parallèlement à l'orogène, excepté F_2 qui est orientée vers le nord-nord-ouest (figures 5B et 11). Les plans de failles normales et les stries associées sont parallèles aux plans de failles inverses et aux stries associées (figure 11). En l'absence de relations de recoupement et d'indicateurs de mouvement clairs la chronologie de développement de ces failles, parallèles entre elles, ne peut être définie et l'existence d'une phase d'extension pré- ou post-compression orogénique est difficile à établir.

5.3.1.1 Extension pré-taconienne

La karstification qui affecte le sommet des roches du Groupe de Beekmantown est imputée à l'émersion des séries due à l'effet conjugué d'une régression majeure et du soulèvement des unités de la plate-forme à la faveur du bombement périphérique (Lavoie, 1994; Dix et Molgat, 1998; Dix, Robinson et McGregor, 1998; Knight et James, 1987; Knight, James et Lane, 1991; Mussman et Read, 1986). L'extension qui accompagne ce dernier est soulignée dans la plate-forme par la formation de failles normales et la réactivation de failles ancestrales. La compilation des données sismiques réalisée par la

Société Québécoise d'Initiatives Pétrolières (SOQUIP, 1984) a permis de mettre en évidence l'existence d'une faille de socle orientée N020° sous l'écaille de Saint-Dominique. Cette faille est interprétée comme une faille inverse à fort pendage (SOQUIP, 1984). Elle est située à quelques centaines de mètres à l'ouest de l'affleurement n° 4 et son orientation est parallèle à celle des structures observées dans l'écaille et dans les nappes. Cette faille initialement normale et développée lors de l'ouverture de l'océan Iapetus (Globensky, 1987) a donc pu être réactivée avec une cinématique normale lors de la flexure de la lithosphère due à une surcharge tectonique créée par le poids des premières nappes chevauchées dans la partie externe de la plate-forme, puis inversée lors de la compression avec l'avancée des nappes vers le continent. Chalaron et Malo (1998) observent par ailleurs que la faille F_2 (figure 5B) semble avoir joué selon un mouvement normal et inverse, et interprètent le jeu normal comme précoce et relatif à la migration du bombement périphérique.

Puisqu'il y a eu karstification du sommet des roches du Groupe de Beekmantown avant le dépôt des roches du Groupe de Chazy, la cimentation de F_2 a dû avoir lieu pendant ce jeu normal précoce. Ceci a dû avoir lieu à faible profondeur et à une température proche de celle de l'eau de mer. Le signal isotopique de la calcite devrait donc être voisin de celui des ciments marins. L'échantillon 134B (figure 19) provenant de F_2 possède un $\delta^{18}O$ élevé, très proche des champs définis par Lohmann et Walker (1989) et Popp, Anderson et Sandberg (1986). Si l'on exclut la possibilité d'un mélange avec un fluide de salinité plus élevée ou d'une variation du rapport $\delta^{18}O$ du fluide parent, le rapport $\delta^{18}O$ du ciment indique que la précipitation a eu lieu à faible température et sans doute à faible profondeur. Cette signature diffère beaucoup de celle des stries indiquant un mouvement inverse sur F_2 (échantillon 134A, figure 19). Les caractéristiques structurales et géochimiques de F_2 suggèrent que cette faille a pu avoir une cinématique normale pendant la flexure de la croûte, donc très peu de temps après la lithification des roches du Groupe de Beekmantown, à un moment où celles-ci étaient encore proches de la surface, avant le dépôt des unités sus-jacentes.

5.3.1.2 Extension tardi-taconienne

Les deux failles conjuguées F_5 et F_6 dessinant un graben dans le Groupe de Black River de l'affleurement n° 2 ne montrent aucune relation de recoupement avec d'autres éléments structuraux. Prichonnet et Raynal (1977) les interprètent comme des failles tardives à l'extrados d'un pli régional. La signature isotopique du ciment de F_5 (échantillon 120B, figures 6A et 19) ne diffère pas beaucoup de celles des autres ciments analysés dans le Groupe de Black River, ce qui conforte l'interprétation de Prichonnet et Raynal (1977).

L'existence de failles normales syn-sédimentaires dans les roches du Groupe de Trenton n'a pas été démontrée dans l'écaille de Saint-Dominique. Le recoupement des VPL par les failles normales observées dans les affleurements n° 1 et 4 indique que les derniers mouvements de ces failles sont postérieurs au plissement, mais n'exclut pas que les failles aient été actives avant ou pendant le plissement. L'absence de relations de recoupement avec les failles inverses ne permet pas de déterminer si elles se sont formées avant et/ou après les failles inverses. Ces dernières ont donc pu respectivement inverser des failles normales préexistantes et rejouer avec une cinématique normale.

Si le rapport $\delta^{18}O_{PDB}$ du fluide parent n'a pas évolué, l'enrichissement en ^{18}O des ciments des failles normales signifie que ceux-ci ont précipité à partir d'un fluide plus froid que dans le cas des ciments des VPL et des failles inverses (figure 20). La différence est faible cependant entre les ciments des failles inverses et normales dans le Groupe de Trenton, et on note même un léger recouvrement entre les deux populations (figure 20). Les signatures isotopiques des ciments des failles normales étant parmi les plus enrichis en ^{18}O, les derniers mouvements de ces failles sont contemporains ou postérieurs à ceux des failles inverses. Les failles normales sont donc interprétées comme résultant de l'effondrement des structures après l'épaississement provoqué par le jeu des failles inverses. Il n'est pas exclu que les failles normales aient été actives avant les failles inverses, mais les ciments de la faille F_5 n'offrent aucune information sur ces mouvements précoces.

5.3.1.3 Extension post-taconienne

Faure (1995) décrit dans la zone de Humber des failles normales contemporaines de l'ouverture de l'océan Atlantique au Jurassique. Dans la Carrière Saint-Dominique, le ciment de la faille F_{11} (échantillon 76, figures 5A et 19) est anormalement riche en ^{18}O par rapport aux autres ciments de failles normales dans le Groupe de Trenton ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -3,4 ‰ pour F_{12}, $\delta^{18}O_{PDB}$ = -6,8 à -5,3 ‰ pour F_{18}, F_{17} et F_{12}). Ce rapport $\delta^{18}O_{PDB}$ élevé peut traduire une précipitation à une température et une profondeur inférieures à celles impliquées par les signatures des autres failles. Dans ce cas, F_{11} pourrait avoir enregistré un mouvement normal post-orogénique.

5.3.2 Les failles inverses

Les failles inverses sont compatibles avec le raccourcissement tectonique est-sud-est/ouest-nord-ouest qui contrôle le plissement dans l'écaille, dans les nappes environnantes (Clark, 1964) et dans la zone de Humber externe du sud du Québec (Faure, 1995). Les chevauchements ont contrôlé le plissement local (formation des plis de rampe, amplification du pli par propagation).

Le fait que les signatures isotopiques des ciments qui scellent les failles inverses aient des valeurs intermédiaires entre celles des VPL et celles des failles normales (figure 20), et le recouvrement partiel entre les signatures des failles inverses et des VPL, indiquent que seuls les ciments correspondant aux derniers mouvements inverses ont été préservés dans les plans de failles.

5.3.3 Les failles décrochantes

La présence de stries sub-horizontales indique des mouvements décrochants tardifs qui se superposent aux mouvements respectivement inverse et normal de F_2 et F_5. Ces failles sont éloignées l'une de l'autre, et affectent des unités stratigraphiques distinctes. F_2 est située dans les roches du Groupe de Beekmantown de l'affleurement n° 1. Elle est dextre et orientée nord-nord-ouest. F_5 est située dans les roches du Groupe

de Black River de l'affleurement n° 2. Elle est senestre et orientée nord-nord-est. Ces sens de mouvement sont incompatibles avec la direction régionale de raccourcissement dans les nappes et dans l'écaille.

Faure (1995) reconnaît des décrochements dextres dans la zone de Humber, qui réactivent des failles inverses d'origine taconienne comme pour F_2 et F_5. Il exclut l'hypothèse d'une origine tardi-taconienne pour ces décrochements car il n'observe jamais les relations de recoupements mutuels avec les failles inverses auxquelles on devrait pourtant s'attendre. Il se fonde aussi sur les travaux de Stanley (1974), qui montrent que les décrochements documentés en Nouvelle-Angleterre, le long de la faille de Champlain (équivalent à la Ligne Logan au Québec), se sont produits à une profondeur inférieure à 1,8 km. Une aussi faible profondeur n'est pas compatible avec les 7 km d'enfouissement maximal reconnus par Friedman (1987) dans les états de New York et du Vermont. L'histoire thermique de cette région est comparable à celle de la plate-forme du Saint-Laurent et du domaine parautochtone (Ogunyomi, Hesse et Héroux, 1980; Héroux et Bertrand, 1991; Bertrand et Dykstra, 1993). Les décrochements seraient donc survenus après une érosion importante.

Les stries de calcite sub-horizontales sur F_2 et F_5 (figure 11) présentent des signatures isotopiques très riches en ^{18}O par rapport aux autres ciments ($\delta^{18}O_{PDB}$ = -5,4 et -1,1 ‰ respectivement, figure 19). Un tel enrichissement en ^{18}O par rapport aux autres ciments de veines et de failles peut traduire le mélange avec un fluide plus riche en isotopes lourds ou la précipitation à une température très basse et probablement à proximité de la surface. Cette dernière possibilité supporte l'hypothèse d'un système décrochant post-taconien développé après érosion des séries sus-jacentes.

5.4 Les veines parallèles au litage

5.4.1 Les veines parallèles au litage dans les flancs des plis

L'ouverture de certaines VPL dans une direction sub-parallèle ou oblique par rapport aux épontes est attestée par la disposition des fibres de calcite et des fragments

d'encaissant, par l'observation d'épontes en marches d'escalier (planche 11) et de cavités rhomboédriques (planche 13), et par des laminations obliques par rapport aux épontes (planche 10). Le sens de mouvement indiqué par les stries perpendiculaires à l'axe du plissement (figure 9) est compatible avec un cisaillement parallèle aux strates induit par le plissement par glissement et flexion. Des stries révélant un sens de cisaillement opposé à celui attendu dans le cas du plissement par glissement et flexion ont été observées dans le flanc court du pli par propagation de la Carrière Saint-Dominique (page 34 et figure 5A). Ces stries révèlent que certaines VPL continues dans les charnières de plis ont été formées avant le plissement.

Le recouvrement partiel entre les signatures isotopiques des VPL et des failles inverses (figure 20) souligne la relation qui existe entre les derniers mouvements des chevauchements et les plis de rampe et par propagation.

5.4.2 Les veines parallèles au litage dans les zones à litage tabulaire et dans les charnières de plis

Toutes les VPL sont continues dans les charnières des plis et dans les zones à litage tabulaire (figure 5), à l'exception de celles associées au pli de rampe de la faille F_3 (planche 1). La formation de ces VPL ne peut être expliquée par le glissement des bancs lors du plissement (Tanner, 1989). Trois mécanismes différents peuvent être envisagés pour expliquer leur formation avant le plissement : la fracturation hydraulique pendant l'enfouissement des séries, le raccourcissement parallèle au litage, le développement de chevauchements parallèles au litage dans des structures en duplex.

L'accumulation de fluides sous des niveaux moins perméables, pendant la compaction des sédiments, peut provoquer une augmentation de la pression hydrostatique suffisante pour induire une fracturation hydraulique et la précipitation d'un ciment à partir des fluides accumulés (Fitches *et al.*, 1986). Si les surfaces impliquées ne sont pas rigoureusement horizontales, des plans de glissement peuvent s'initier le long de ces zones de surpression, favorisant le développement de failles normales. Les mouvements normaux reconnus dans la plate-forme sont imputés à la flexure de la lithosphère sous le

poids des nappes et ne semblent donc pas contrôlés par la compaction des sédiments. Nos observations structurales et géochimiques ne se conforment pas non plus au modèle de Fitches *et al.* (1986). Les VPL documentées dans les roches du Groupe de Beekmantown séparent en effet des niveaux de perméabilités identiques tandis que celles des roches du Groupe de Trenton sont indifféremment localisées à l'intérieur d'une même unité ou entre deux unités de lithologies différentes. Il est probable que la faible perméabilité des VPL ait favorisé le développement de zones de surpression, mais cette modification tardive des conditions de circulation des fluides ne permet pas d'expliquer la formation des VPL. La fracturation hydraulique pendant l'enfouissement des séries ne semble donc pas être un mécanisme satisfaisant pour expliquer la formation des VPL étudiées.

Le raccourcissement parallèlement au litage, qui marque le début de la compression avant que les plis et les failles ne commencent à se développer, est souvent mis en cause dans la formation de VPL continues dans les charnières de plis (Henderson, Wright et Henderson, 1986; Jessell, Willman et Gray, 1994; Windh 1995). Dans ce cas, les veines se développent à l'intérieur d'une même unité plutôt qu'au contact entre deux bancs de compétence et de perméabilité contrastées. Les VPL étudiées dans les roches du Groupe de Beekmantown, et pour certaines dans les roches du Groupe de Trenton, se sont développées au sein d'unités de compétence et de perméabilité homogènes et leurs signatures isotopiques indiquent que leurs ciments ont précipité en enfouissement. Aucune observation ne révèle toutefois que le raccourcissement parallèle au litage a pu se développer de façon significative dans les bancs massifs de calcaires dolomitiques du Groupe de Beekmantown, ni même dans les calcaires argileux plus minces du Groupe de Trenton. Les plis de type buckle folds (Suppe, 1985) affectant les VPL et conservant leur vergence de part et d'autre des charnières des plis régionaux, de même que la présence d'un clivage perpendiculaire au litage, parallèle au plan axial des buckle folds et à angle avec le clivage de plan axial des plis régionaux, sont caractéristiques du développement des VPL pendant le raccourcissement parallèle au litage (Henderson, Wright et Henderson, 1986; Jessell, Willman et Gray, 1994; Windh 1995). Ces caractéristiques ne sont jamais observées dans l'écaille de Saint-Dominique. En l'absence de clivage perpendiculaire au litage, il est donc difficile d'étayer convenablement l'hypothèse selon

laquelle les VPL observées dans les affleurements de l'écaille de Saint-Dominique se seraient développées au cours du raccourcissement parallèle au litage. On ne peut toutefois pas exclure cette hypothèse dans la mesure où il est possible de produire jusqu'à 15 % de raccourcissement avant d'observer le développement d'un clivage parallèle au litage. Les modèles expliquant la formation des VPL au cours du raccourcissement parallèle au litage impliquent souvent une ouverture suivant une direction constante et oblique par rapport aux épontes (Jessell, Willman et Gray, 1994; Windh 1995), bien qu'une direction perpendiculaire ne soit pas exclue par Henderson, Wright et Henderson (1986). La disposition des fragments d'encaissant, les épontes en marches d'escalier, les cavités rhomboédriques et plus rarement l'orientation des cristaux laminaires dans les VPL indiquent que des directions d'ouverture perpendiculaires et sub-parallèles aux épontes coexistent dans l'Écaille de Saint-Dominique. L'hypothèse d'une formation pendant le raccourcissement parallèle au litage ne peut donc être totalement rejetée, mais l'absence d'observations microstructurales et pétrographiques étayant cette hypothèse, ainsi que la précipitation des ciments en enfouissement comme l'attestent les signatures isotopiques de ceux-ci, obligent à rechercher un autre mécanisme pour expliquer la formation des VPL.

Le chevauchement parallèlement au litage dans des structures en duplex peut aussi favoriser la formation de VPL le long des plans de glissement (Ohlmacher et Aydin, 1995). Des cavités rhomboédriques centimétriques s'individualisent dans ces plans de glissement (planche 13) et sont peu à peu connectés à mesure que le cisaillement évolue. Les VPL sont plissées au passage des rampes et sont réactivées dans les flancs à cette occasion. De nombreuses preuves pétrographiques attestent de la réactivation des VPL. Les macles dans la calcite, la présence de quartz dans des fractures intra- et inter-cristallines des ciments de calcite, les stylolites parallèles aux épontes et à dents obliques, sont autant d'observations qui soulignent la réactivation des VPL mais ne permettent toutefois pas d'établir si celle-ci a eu lieu au cours du déplacement dans les plats ou au cours du plissement. Le chevauchement parallèlement au litage offre en revanche une explication satisfaisante à la continuité des VPL dans les charnières et dans les plats, et à la présence de stries dans les charnières synclinales. Il justifie en outre l'absence de

relation entre la signature isotopique et la position d'un ciment par rapport aux flancs ou à la charnière d'un pli (page 61). La comparaison entre l'évolution des signatures isotopiques et les relations de recoupement structurales et pétrographiques révèle en effet que les isotopes stables du carbone et de l'oxygène sont suffisamment sensibles pour permettre de distinguer une chronologie dans la précipitation des ciments des veines et des failles. Dans l'éventualité où les ciments des VPL auraient précipité à des moments différents dans les flancs et la charnière d'un pli, les signatures de ces ciments devraient refléter l'évolution temporelle des conditions de précipitation, ce qui n'est pas observé. Les plis de rampe de l'affleurement n° 4 (figure 5B) ne sont pas reconnus dans la Carrière Saint-Dominique (affleurement n° 1, figure 5A), mais l'amplification du pli par propagation est là encore contrôlée par le jeu des failles inverses et le même mécanisme peut y être invoqué pour expliquer la formation des VPL.

Les ciments dont la signature isotopique est voisine de celle des failles inverses peuvent ainsi être interprétés comme étant contemporains des derniers mouvements associés au plissement ou au chevauchement. De même, les veines montrant une ouverture oblique par rapport aux épontes et se distinguant des failles par une signature plus pauvre en isotopes lourds (échantillon 95A, figure 21 et planche 10) ont pu précipiter au cours d'une étape antérieure du développement des chevauchements parallèles au litage ou de la formation du pli de la Carrière Saint-Dominique.

L'hypothèse privilégiée est donc que les VPL se seraient formées dans l'affleurement n° 4 pendant l'activation de chevauchements parallèles au litage, et auraient été réactivés au passage des rampes en même temps que de nouvelles VPL étaient formées dans les flancs des plis (figure 27). Les VPL de l'affleurement n° 1 seraient associées à la formation et à l'amplification du pli par propagation. Les signatures isotopiques des ciments des différentes laminations au sein d'une même VPL peuvent couvrir un champ qui est presque aussi large que celui définit par l'ensemble des VPL (figures 21 et 22). La complexité de l'histoire structurale des VPL se reflète ainsi dans la diversité de leurs signatures isotopiques. Cette hypothèse permet d'expliquer la continuité des VPL dans les charnières des plis ainsi que le sens de cisaillement vers l'arrière-pays révélé par l'échantillon 94 (figure 5B). Les stries relevées sur ce dernier ont ainsi pu se

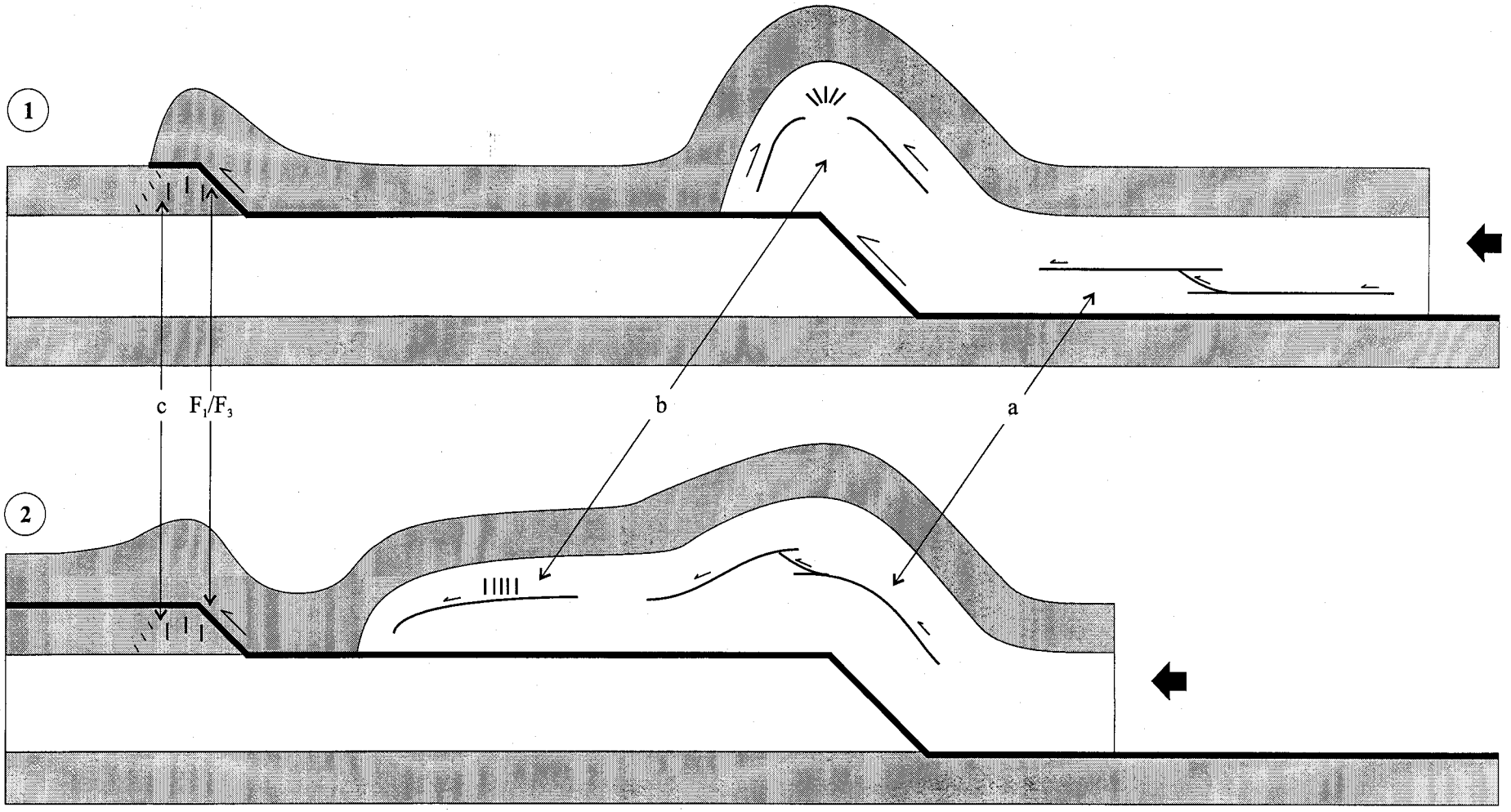


Figure 27: Formation des différents types de veines pendant le développement des plis de rampe et des chevauchements parallèles au litage. Les étapes 1 et 2 illustrent deux stades successifs de la déformation. (a) Formation des VPL, des veines cisaillantes parallèles au front et des veines perpendiculaires au front (non représentées) dans les plats de duplex, (b) formation des VPL dans les flancs des plis de rampe, avec deux sens de cisaillement opposés, et formation des veines d'extension parallèles au front, au passage des charnières anticlinales des plis de rampe, (c) formation des veines d'extension et en échelon parallèles au front sous l'effet du redoublement tectonique. F_1/F_3 : Faille F_1 ou F_3. Étape 2: transport jusqu'à leur emplacement actuel des veines formées en (a) et (b) et oblitération des indices de cisaillement vers l'arrière-pays par des mouvements plus tardifs vers le front de l'orogène.

former dans le flanc court d'un pli de rampe et ont été préservée au cours de leur transport dans les plats. En l'absence de plis de rampe visibles dans la Carrière Saint-Dominique, le sens de mouvement incompatible avec le plissement par glissement et flexion relevé sur une VPL de l'affleurement n° 1 (page 34 et figure 5A) ne peut être directement justifié par le passage d'une charnière anticlinale. Ces stries soulignent cependant un cisaillement inverse vers l'avant-pays développé avant le plissement.

5.5 Les veines parallèles au front orogénique

5.5.1 Les fentes de tension

Les fentes de tension dans le Groupe de Trenton ne montrent pas les relations de recoupement disponibles pour les veines d'extension, de sorte que leur chronologie de mise en place est moins précise. Elles recoupent cependant le clivage (planches 20 et 21) et sont contemporaines de stylolites et de faisceaux argileux développés parallèlement au litage. Elles sont par ailleurs concentrées à proximité des failles dans la partie est de l'affleurement n° 1. Ces observations suggèrent que les fentes de tension sont probablement associées aux failles normales tardives. Les signatures isotopiques des fentes de tension sont caractérisées par un $\delta^{13}C$ constant (figure 19). La cimentation a donc eu lieu à partir d'un fluide homogène dans un système fermé, sans mélange avec un fluide étranger enrichi en ^{13}C. L'association étroite que l'on observe au microscope entre les fentes de tension et les stylolites et faisceaux argileux parallèles au litage suggère que la source des carbonates est l'encaissant proche de ces veines.

5.5.2 Les veines d'extension

L'ouverture de ces veines perpendiculairement aux épontes et sans composante cisaillante est attestée par l'orientation des fibres de calcite et des fragments d'encaissant. L'observation de fractures intra- et inter-cristallines et le développement de stylolites parallèlement aux épontes dans les ciments des veines d'extension indique que leur cimentation ne correspond pas au dernier épisode de la déformation. Le recoupement des

veines par les VPL selon un sens de cisaillement compatible avec le plissement par glissement et flexion souligne en outre qu'elles se sont ouvertes avant la fin du plissement. Leur formation peut être associée à plusieurs phénomènes : 1) les failles normales actives pendant la flexure de la lithosphère, 2) l'enfouissement tectonique sous les nappes, ou 3) l'ouverture dans l'extrados des plis.

Ces veines ne semblent pas directement liées aux failles normales car elles sont réparties uniformément le long de l'affleurement n° 4 (figure 5B), et non pas seulement à proximité des failles. En outre, les veines associées aux failles sont généralement conjuguées et montrent un léger cisaillement (Stearn, 1968), ce qui n'est jamais observé pour les veines d'extension considérées ici.

Des fractures sub-verticales ont pu se développer sous l'effet de la surcharge tectonique due au poids des nappes. Les travaux de Bertrand et Dykstra (1993) montrent que l'enfouissement de la plate-forme sous les nappes précède son écaillage. Les fractures sub-verticales ainsi formées auraient ensuite subi les déformations associées au développement des plans de chevauchement parallèles au litage et des plis lors de l'écaillage.

Les veines associées au plissement et parallèles à l'axe de celui-ci peuvent apparaître sous la forme d'un ensemble de deux veines cisaillantes conjuguées associées à une veine d'extension dans les flancs courts et les charnières des plis (fractures de type 2 de Stearn, 1968), ce qui n'est jamais observé ici, ou sous la forme de veines perpendiculaires au litage et sans composante cisaillante à l'extrados des plis (Ramsay et Huber, 1987b). Les veines observées dans l'affleurement n° 4 sont présentes dans les zones tabulaires et dans les flancs des plis plutôt que dans les extrados. Des veines d'extension parallèles au front orogénique ont donc pu se former dans l'extrados des plis au passage des charnières par-dessus les rampes (figure 27), et leur association apparente avec les plats et les flancs des plis ne serait due qu'à la poursuite du chevauchement parallèlement au litage au-delà de la rampe.

Les observations réunies ne permettent pas d'exclure l'une ou l'autre des deux dernières hypothèses, chacune étant compatible avec l'histoire tectonique de l'écaille. Des veines formées à partir de ces deux mécanismes peuvent coexister sur un même

affleurement. Les veines en échelon et celles qui ne sont pas perpendiculaires au litage ont pu se former sous le poids des nappes, tandis que les veines sub-perpendiculaires au litage ont pu se former à l'extrados des plis de rampe (figure 27). Les signatures isotopiques des veines d'extension provenant du Groupe de Beekmantown sont confondues avec celles des VPL et les ciments ont donc probablement précipité à partir du même fluide et à la même température que les VPL (figure 22).

5.5.3 Les veines de cisaillement

L'orientation des veines de cisaillement et le sens de mouvement des stries à leurs épontes sont compatibles avec la direction de raccourcissement est-sud-est/ouest-nord-ouest qui domine dans les affleurements étudiés. Le parallélisme entre les veines d'extension à pendage vers l'est (figure 15) et les veines de cisaillement (figure 16) permet de penser que les premières ont pu être réactivées pour former les dernières, et que les stries (figure 16) se superposent à des veines ouvertes perpendiculairement aux épontes. Une telle origine est toutefois exclue pour les veines où il est possible de reconnaître la présence de fragments d'encaissant indiquant une direction d'ouverture sub-parallèle aux épontes (planche 12). Les signatures isotopiques de ces veines de cisaillement sont proches de celles des VPL et plus pauvres en ^{18}O que celles des ciments qui scellent les failles inverses (figure 20), ce qui suggère que ces veines n'étaient plus actives au cours des derniers mouvements des failles inverses.

5.6 Les veines perpendiculaires au front orogénique

Peu d'information est disponible sur ces veines. Leur rareté ne semble pas être un artefact lié à l'orientation des affleurements puisque deux fronts de taille perpendiculaires ont pu être observés dans l'affleurement n° 1 (figure 6A). Leur ouverture perpendiculairement aux épontes, sans composante cisaillante, et leur orientation perpendiculaire à l'axe du plissement, sont caractéristiques des fractures qui se développent habituellement à la fin du plissement ou après l'arrêt de celui-ci, lorsque les contraintes compressives cessent de s'appliquer (Ramsay et Huber, 1987b).

Les veines observées ici étant contemporaines des VPL et recoupées par le clivage de plan axial, il est exclu qu'elles se soient développées de façon tardive après l'arrêt du plissement. Elles ont pu se former dans les zones tabulaires sous l'effet d'une contrainte horizontale (Ougougdal, 1999), dans le mur des chevauchements pendant le développement des plis de rampe ou au cours de l'enfouissement sous les nappes (Dunne et North, 1990; Turner et Hancock, 1990). Les signatures isotopiques de certaines de ces veines sont proches de celles des autres veines étudiées, mais la plupart sont caractérisées par un appauvrissement en isotopes lourds (figure 19). Les ciments de ces veines ont donc pu précipiter à partir des mêmes fluides que les autres veines mais à une température plus élevée, ou bien à partir de fluides plus salins.

5.7 Histoire de la déformation dans l'écaille de Saint-Dominique

La synthèse des études structurale, microstructurale, pétrographique et géochimique a montré que les veines parallèles et perpendiculaires au front orogénique, les VPL, ainsi que les failles inverses et normales se sont développées au cours de l'écaillage de la plate-forme du Saint-Laurent lors de la progression des nappes taconiennes. La figure 28 résume la chronologie relative de tous ces éléments structuraux. La séquence de ces événements est détaillée ci-dessous.

L'avancée des nappes taconiennes sur la plate-forme du Saint-Laurent provoque l'écaillage et l'inversion de celle-ci. Dans l'écaille de Saint-Dominique, le raccourcissement s'effectue de l'est-sud-est vers l'ouest-nord-ouest et s'exprime dans les calcaires dolomitiques épais du Groupe de Beekmantown par des plis de rampe, et dans les calcaires argileux minces du Groupe de Trenton par des plis par propagation de faille.

Le cisaillement parallèle au litage conduit rapidement au développement de VPL dans les zones tabulaires et les flancs des plis (figure 27). Les veines perpendiculaires au front orogénique et les veines de cisaillement parallèles au front orogénique sont formées de la même manière.

À mesure que les structures se développent, de nouvelles VPL sont formées et les plus anciennes sont réactivées. Des veines d'extension parallèles au front orogénique se

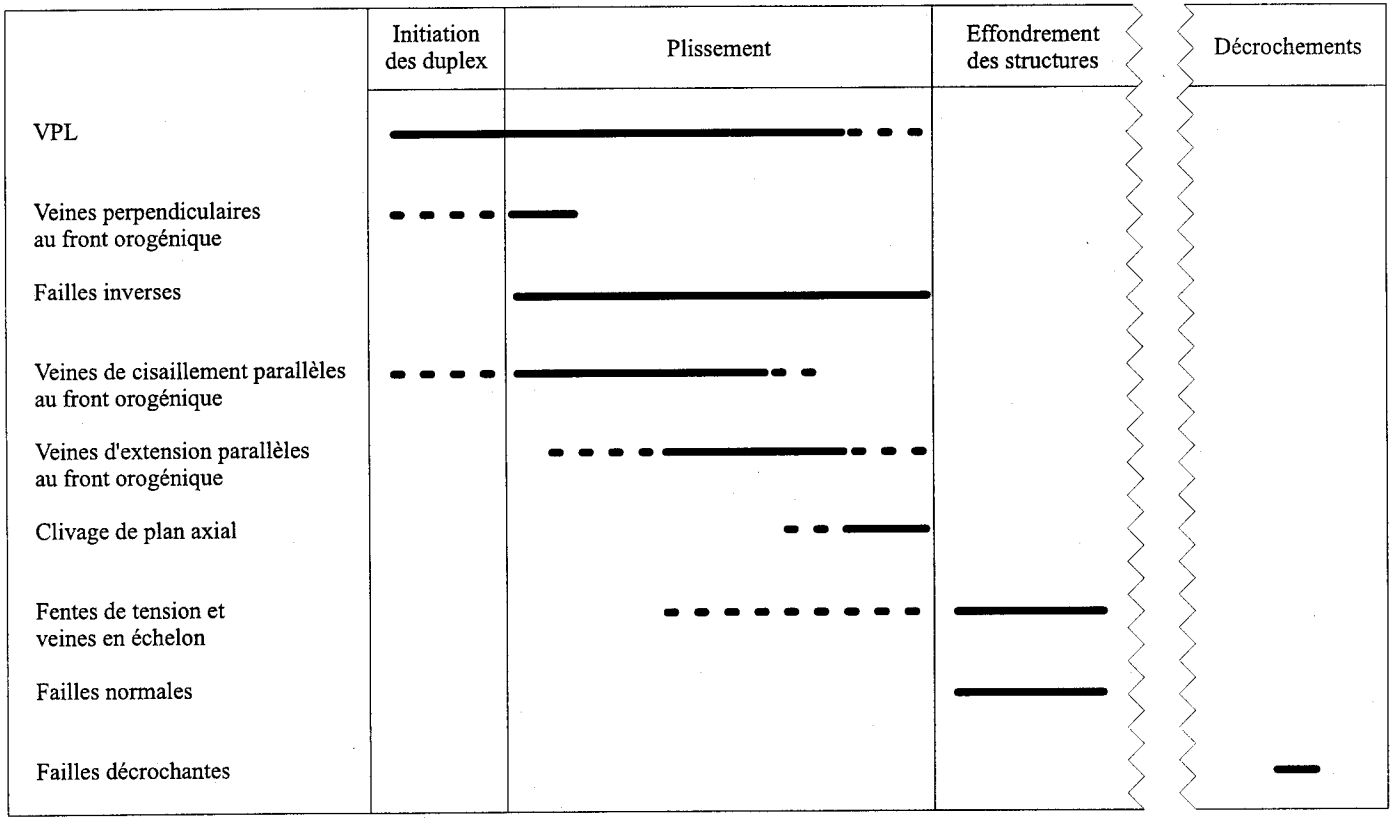


Figure 28: Chronologie relative des éléments structuraux à partir de la phase compressive taconienne. L'axe horizontal représente le temps.

développent dans les charnières des plis. Ces veines sont transportées sur les plats à la faveur de chevauchements parallèles au litage en même temps que les VPL (figure 27). Les redoublements tectoniques favorisent le développement de fentes de tension et de veines en échelon dans le mur des chevauchements (figure 27).

Le relâchement des contraintes et l'épaississement supracrustal provoquent ensuite l'effondrement de ces structures sous leur propre poids et celui des nappes sus-jacentes, conduisant au développement de failles normales, de veines en échelon et de fentes de tension. De nombreuses failles inverses sont réactivées avec un mouvement normal.

Des failles décrochantes tardives réactivent enfin les failles normales et inverses préexistantes, sans qu'il soit possible de préciser à quel moment cet événement a eu lieu.

La composition isotopique des ciments de calcite qui scellent les veines et les failles inverses et normales a enregistré une diminution de la température de précipitation de ces ciments au cours du temps (figure 26). Cette baisse de température est justifiée par la remontée tectonique des structures le long des failles inverses observées à l'affleurement et/ou le long d'un plan de décollement majeur (la faille de Saint-Dominique). Cette remontée tectonique est vraisemblablement associée à l'érosion des séries sus-jacentes. L'étendue des signatures isotopiques des VPL et des veines d'extension parallèles au front orogénique confirme que leur formation est un processus continu et progressif au cours de l'écaillage, et que les VPL sont fréquemment réactivées.

CHAPITRE 6
CONCLUSIONS

L'analyse structurale, pétrographique et géochimique des veines de l'écaille de Saint-Dominique a permis de préciser l'histoire tectonique de la région étudiée et d'arriver aux conclusions suivantes :

1) Les directions de raccourcissement qui contrôlent le développement des structures dans l'écaille de Saint-Dominique et dans les nappes sont semblables.
2) Les premières veines parallèles au litage (VPL) se sont ouvertes en enfouissement pendant le développement de chevauchements parallèlement au litage. Le plissement par glissement et flexion a ensuite réactivé ces veines et en a formé de nouvelles. Les ciments de calcite ont enregistré toutes les étapes de l'ouverture et de la déformation des veines. Il n'est pas exclu qu'un petit nombre de VPL aient été formées au cours du raccourcissement parallèle au litage.
3) Les veines d'extension parallèles à l'axe des plis ont pu se développer au cours de l'enfouissement tectonique sous le poids des nappes et au passage des charnières par-dessus les rampes. Les ciments de ces veines ont précipité à partir du même fluide et à la même température que ceux des VPL.
4) Les failles inverses ont été actives tout au long du développement des VPL excepté au cours des premiers incréments de la déformation. Leurs ciments correspondent aux derniers mouvements des failles et ont des signatures isotopiques très voisines de celles des VPL les plus tardives.
5) La plupart des failles normales sont tardi-taconiennes. Elles soulignent le relâchement des contraintes et l'effondrement final des structures chevauchantes. Le fluide impliqué dans leur cimentation est très proche de celui des failles inverses.
6) Seules deux failles dans les groupes de Beekmantown (F_2) et de Trenton (F_{12}) ont pu être actives respectivement avant et après l'orogenèse taconienne. Les observations réunies ne suffisent pas cependant à valider cette hypothèse.

7) Des failles inverse et normale (F_2 et F_5) ont été réactivées tardivement selon un mouvement décrochant respectivement dextre et senestre.
8) Quand les relations de recoupement font défaut, la géochimie des isotopes stables peut aider à distinguer différentes familles de ciments au sein d'une population de veines ou de failles de même orientation. Certaines restrictions s'appliquent cependant à cette méthode, car il faut tenir compte de l'influence que peut avoir l'encaissant sur les conditions de précipitation. Les comparaisons directes entre des familles de veines provenant d'unités lithologiques distinctes sont donc proscrire, mais même dans ce dernier cas il demeure possible de comparer les tendances évolutives des signatures isotopiques de chaque famille de veines. Le manque d'informations relatives à la salinité des fluides impliqués limite toutefois l'usage de cette méthode en géothermométrie.
9) Les ciments des veines et des failles ont commencé à précipiter en enfouissement, à partir d'un fluide de même nature que celle des eaux de formation et qui s'enrichit peu à peu en ^{13}C par méthanogenèse en système fermé ou par mélange avec un fluide plus riche en ^{13}C. Le refroidissement qui accompagne la précipitation et que souligne l'enrichissement en ^{18}O peut être provoqué par une diminution de la profondeur d'enfouissement selon un processus tectonique et par le mélange avec un fluide plus froid. Un tel fluide pourrait provenir des séries du mur des chevauchements, qui sont de même nature mais plus froides que les roches étudiées.

Nous recommandons qu'une étude des inclusions fluides soit pratiquée sur les ciments de calcite et de quartz qui scellent les fractures, afin de vérifier les informations obtenues grâce à l'analyse isotopique. Une étude des ciments diagénétiques de l'encaissant devrait par ailleurs contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes qui ont contrôlé la circulation des fluides dans les fractures au cours de l'orogenèse taconienne. Nous recommandons donc une étude pétrographique et géochimique des ciments diagénétiques des séries parautochtones de l'écaille afin de mieux comprendre l'histoire de ces roches avant leur écaillage. Cette étude devra également comparer les ciments des veines à ceux de l'encaissant afin de déterminer dans quelle mesure la composition isotopique de ce dernier influence la composition isotopique des ciments des veines et

inversement.

Afin d'améliorer la représentativité des analyses isotopiques, il conviendrait de pouvoir échantillonner plusieurs veines autres que les VPL sur leur longueur, et de comparer la variabilité au sein d'une veine à la variabilité qui existe à travers l'affleurement.

La possibilité que certaines failles observées dans les roches du Groupe de Trenton aient été actives pendant le dépôt de ces mêmes roches devrait être vérifiée en mesurant l'épaisseur des bancs de part et d'autre des plans de faille. Rappelons aussi que des stries parallèles à l'axe du plissement ont été reconnues sur trois VPL. Leur lien possible avec les mouvements décrochants tardifs indiqués par les failles F_2 et F_5 mériterait d'être analysé plus en détail. Les résultats d'une analyse isotopique de ces ciments devraient être comparés à ceux obtenus pour les stries perpendiculaires à l'axe du plissement.

RÉFÉRENCES

ATKINSON B. K. 1987. « Introduction to fracture mechanics and its geophysical applications ». In : B. K. Atkinson (ed.). Fracture Mechanics of Rock. Academic Press Geology Series, London.

BANNER J. L. et G. N. Hanson. 1990. « Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with application to carbonate diagenesis ». Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 54, p. 3123-3137.

BERNSTEIN L. M. 1992. « A revised lithostratigraphy of the Lower-Middle Ordovician Beekmantown Group, St. Lawrence Lowlands, Québec and Ontario ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 29, p. 2677-2694.

BERTRAND R., A. Chagnon, D. Lavoie, M. Malo. 1993. Modèle géologique du Groupe de Beekmantown dans la structure de Saint-Flavien. Centre géoscientifique de Québec.

BERTRAND R., M. Savard, M. Malo. 1993. Étude diagénétique de la dolomie du puits St-Flavien #8, Groupe de Beekmantown - Basses-Terres du Saint-Laurent : Rapport complémentaire. Centre géoscientifique de Québec.

BERTRAND R., J. Dykstra. 1993. « Organic metamorphism and burial histories in the St. Lawrence Lowlands and in the external domain of the Québec Appalachians ». In : Abstracts with Programs, Geological Society of America Annual Meeting.

BRADLEY D. C., T. Kusky. 1986. « Geologic evidence for rate of plate convergence during the Taconic arc-continent collision ». Journal of Geology, vol. 94, p. 667-681.

CADY W. M. 1945. « Stratigraphy and structure of West-Central Vermont ». Geological Society of America Bulletin, vol. 56, p. 515-588.

CARIGNAN J., C. Gariepy, M. C. Hillaire. 1997. « Hydrothermal fluids during Mesozoic reactivation of the St. Lawrence rift system, Canada; C, O, Sr and Pb isotopic characterization ». Chemical Geology, vol. 137, no. 1-2, p. 1-21.

CASTONGUAY S., A. Tremblay, G. Ruffet, G. Féraud, N. Pinet, M. Sosson. 1997.

« Ordovician and Silurian metamorphic cooling ages along the Laurentian margin of the Québec Appalachians : Bridging the gap between New England and Newfoundland ». Geology, vol. 25, p. 583-586.

CHALARON E., M. Malo. 1998. « Inversion de marge dans l'avant-pays appalachien du Québec ». Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série II, Sciences de la Terre et des Planètes, vol. 326, no. 3, p. 181-186.

CLARK T. H. 1964. La région de Saint-Hyacinthe (moitié ouest). Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Rapport Géologique 101.

COSGROVE J. W. 1993. « The interplay between fluids, folds and thrusts during the deformation of a sedimentary succession ». Journal of Structural Geology, vol. 15, no. 3-5, p. 491-500.

COX S. F. 1987. « Antitaxial crack-seal vein microtextures and their relationship to displacement paths ». Journal of Structural Geology, vol. 9, no. 7, p. 779-787.

COX S. F., S. S. Sun, M. A. Etheridge, V. J. Wall, T. F. Potter. 1995. « Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein deposits, Wattle Gully mine, central Victoria, Australia ». Economic Geology, vol. 90, p. 1722-1746.

DIX G. R., M. P. Molgat. 1998. « Character of the Middle Ordovician Sauk-Tippecanoe sequence boundary in the Ottawa Embayment (eastern Ontario); possible evidence for platform-interior, Taconic tectonism ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 35, no. 6, p. 603-619.

DIX G. R., G. W. Robinson, D. C. McGregor. 1998. « Paleokarst in the Lower Ordovician Beekmantown Group, Ottawa Embayment; structural control inboard of the Appalachian Orogen ». Geological Society of America Bulletin, vol. 110, no. 8, p. 1046-1059.

DUNNE W. M., C. P. North. 1990. « Orthogonal fracture systems at the limits of thrusting : an example from southwestern Wales ». Journal of Structural Geology, vol. 12, no. 2, p. 207-215.

ERSLEV E. A., K. R. Mayborn. 1997. « Multiple geometries and modes of fault-propagation folding in the Canadian thrust belt ». Journal of Structural Geology, vol. 19, no. 3-4, p. 321-335.

FAURE S. 1995. « Reconstitution des paléocontraintes tectoniques dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches du Québec et du Nord du Nouveau-Brunswick ». Thèse de doctorat, Québec, Université du Québec, INRS-Géoressources.

FITCHES W. R., R. Cave, J. Craig, A. J. Maltman. 1986. « Early veins as evidence of detachment in the lower Palaeozoic rocks of the Welsh Basin ». Journal of Structural Geology, vol. 8, no. 6, p. 607-620.

FOWLER T. J. 1996. « Flexural-slip generated bedding-parallel veins from central Victoria, Australia ». Journal of Structural Geology, vol. 18, no. 12, p. 1399-1415.

FOWLER T.J., C. N. Winsor. 1997. « Characteristics and occurrence of bedding-parallel slip surfaces and laminated veins in chevron folds from the Bendigo-Castlemaine goldfields : Implications for flexural-slip folding ». Journal of Structural Geology, vol. 19, no. 6, p. 799-815.

FRIEDMAN G. M. 1987. « Vertical movements of the crust : Case histories from the northern Appalachian Basin ». Geology, vol. 15, p. 1130-1133.

FYSON W. K. 1986. « A succession of quartz veins in Archean metaturbidites, Yellowknif Bay, Slave Province ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 24, p. 698-710.

GAVIGLIO P. 1986. « Crack-seal mechanism in a limestone: a factor of deformation in strike-slip faulting ». Tectonophysics, vol. 131, p. 247-255.

GIDON M. 1987. Les structures tectoniques. Bureau de recherches géologiques et minières, Manuels et Méthodes, n° 15.

GLOBENSKY Y. 1987. Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. MM 85-02, Direction Générale de la Recherche Géologique et Minerale. Ministère de l'Energie et des Ressources.

HENDERSON J. R., T. O. Wright, M. N. Henderson. 1986. « A history of cleavage and folding : An example from the Goldenville Formation, Nova Scotia ». Geological Society of America Bulletin, vol. 97, p. 1354-1366.

HENDERSON J. R., T. O. Wright, M. N. Henderson. 1989. « Mechanics of formation of gold-bearing quartz veins, Nova Scotia, Canada – Comment ». Tectonophysics, vol. 166, p. 351-354.

HENDERSON J. R., M. N. Henderson. 1990. « Water-sill hypothesis for the origin of certain veins in the Meguma Group, Nova Scotia, Canada ». Geology, vol. 18, p. 654-657.

HÉROUX Y, R. Bertrand. 1991. « Maturation thermique de la matière organique dans un bassin du Paléozoique inférieur, Basses-Terres du Saint-Laurent, Québec, Canada ». Journal Canadien des Sciences de la Terre, vol. 28, no. 7, p. 1019-1030.

HOEFS J. 1987. Stable Isotope Geochemistry. Third edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Federal Republic of Germany.

JACOBI R. D. 1981. « Peripheral bulge - a causal mechanism for the Lower/ Middle Ordovician unconformity along the western margin of the Northern Appalachians ». Earth and Planetary Science Letters, vol. 56, p. 245-251.

JESSELL M. W., C. E. Willman, D. R. Gray. 1994. « Bedding parallel veins and their relationship to folding ». Journal of Structural Geology, vol. 16, no. 6, p. 753-767.

KNIGHT I., N. P. James. 1987. « The stratigraphy of the Lower Ordovician St. George Group, western Newfoundland : the interaction between eustasy and tectonics ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 24, p. 1927-1951.

KNIGHT I., N. P. James, T. E. Lane. 1991. « The Ordovician St. George Unconformity, northern Appalachians : The relationship of plate convergence at the St. Lawrence Promontory to the Sauk/Tippecanoe sequence boundary ». Geological Society of America Bulletin, vol. 103, p. 1200-1225.

KUMARAPELI P. S. 1969. « St. Dominique fault : A new interpretation ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 6, p. 775-780.

LABAUME P., C. Berty, P. Laurent. 1991. « Syn-diagenetic evolution of shear structures in superficial napes: an example from the Northern Apennines (NW Italy) ». Journal of Structural Geology, vol. 13, no. 4, p. 385-398.

LAVOIE D. 1992. « Peritidal origin of the Lower Ordovician Upton Group, southern Québec Appalachians ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 29, no. 5, p. 1106-1118.

LAVOIE D. 1994. « Diachronous tectonic collapse of the Ordovician continental margin, eastern Canada : comparison between the Québec Reentrant and St. Lawrence Promontory ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 31, p. 1309-1319.

LEBEL D., D. Kirkwood. 1998. Nappes and mélanges in the Québec-Bellechasse area : their regional tectonic and stratigraphic significance in the Humber zone. Geological Association of Canada, Mineralogical Asssociation of Canada, field trip A5 guidebook.

LOHMANN K.C., J. C. G. Walker. 1989. « The $\delta^{18}O$ record of Phanerozoic abiotic marine calcite cements ». Geophysical Research Letters, vol. 16, p. 319-322.

MASCLE A., C. Puigdefàbregas. 1998. « Tectonics and sedimentation in foreland basins : results from the Integrated Basin Studies project ». In : A. Mascle, C. Puigdefàbregas, H. P. Luterbacher et M. Fernàndez (eds). Cenozoic foreland basins of Western Europe. Geological Society Special Publications, vol. 134, p. 1-28.

MAWER C. K. 1987. « Mechanics of formation of gold-bearing quartz veins, Nova Scotia, Canada ». Tectonophysics, vol. 135, p. 99-119.

MINISTÈRE DES RICHESSES NATURELLES. 1974. Data on wells drilled for petroleum and natural gas in the St. Lawrence Lowlands Area. Compilation by exploration section.

MUSSMAN W. J., J. F. Read. 1986. « Sedimentology and development of a passive- to convergent-margin unconformity : Middle Ordovician Knox unconformity, Virginia Appalachians ». Geological Society of America, vol. 97, p. 282-295.

NDZANGOU O. S. 1997. « Le rôle des bryozoaires dans la bioconstruction : Formation de Deschambeault, plate-forme ordovicienne du Saint-Laurent, sud du Québec ». Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval.

NICHOLSON R. 1995. « The interplay between fluids, folds and thrusts during the deformation of a sedimentary succession : Discussion ». Journal of Structural Geology, vol. 17, no. 10, p. 1473-1477.

OGUNYOMI O., R. Hesse, Y. Héroux. 1980. « Pre-orogenic and synorogenic diagenesis and anchimetamorphism in Lower Paleozoic continental margin sequences of the Northern Appalachians in and around Québec City ». Bulletin of Canadian Petroleum Geology, vol. 28, no. 4, p. 559-577.

OHLMACHER G. C., A. Aydin. 1995. « Progressive deformation and fracture patterns during foreland thrusting in the Southern Appalachians ». American Journal of

Science, vol. 295; no. 8, p. 943-987.

OHLMACHER G. C., A. Aydin. 1997. « Mechanics of vein, fault and solution surface formation in the Appalachian Valley and Ridge, northeastern Tennessee, U.S.A.; implications for fault friction, state of stress and fluid pressure ». Journal of Structural Geology, vol. 19, no. 7, p. 927-944.

OUGOUGDAL M. A. 1999. « Caractérisation des paléocirculations des fluides et des hydrocarbures dans la Nappe du Promontoire de Québec ». MEDEF. Université Laval, Québec.

PARADIS S., D. Lavoie. 1996. « Multiple-stage diagenetic alteration and fluid history of Ordovician carbonate-hosted barite mineralization, southern Québec Appalachians ». Sedimentary Geology, vol. 107, no. 1-2, p. 121-139.

POPP B. N., T. F. Anderson, P. A. Sandberg. 1986. « Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones ». Geological Society of America Bulletin, vol. 97, no. 10, p. 1262-1269.

PRICHONNET G., Raynal M. 1977. « La tectonique du front appalachien dans la région de St-Dominique, Québec ». Journal Canadien des Sciences de la Terre, vol. 14, no. 5, p. 1085-1099.

QUINLAN G. M., C. Beaumont. 1984. « Appalachian thrusting, lithospheric flexure, and the Paleozoic stratigraphy of the Eastern Interior of North America ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 21, no. 9, p. 973-996.

RAMSAY J. G. 1980. « The crack-seal mechanism of rock deformation ». Nature, vol. 284, p. 135-139.

RAMSAY J. G., M. I. Huber. 1987. The techniques of modern structural geology. Volume 1 : Strain analysis. Academic Press, London.

RAMSAY J. G., M. I. Huber. 1987b. The techniques of modern structural geology. Volume 2 : Folds and fractures. Academic Press, London.

ST-JULIEN P., C. Hubert. 1975. « Evolution of the Taconian Orogen in the Québec Appalachians ». American Journal of Science, vol. 275-A, p. 337-362.

ST-JULIEN P., A. Slivitsky, T. Feininger. 1983. « A deep structural profile across the Appalachians of southern Québec ». Geological Society of America Memoir, vol. 158, p. 103-111.

SAVARD M., P.-A. Bourque. 1989. « Diagenetic evolution of a Late Silurian reef platform, Gaspé Basin, Québec, based on cathodoluminescence petrography ». Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 26, no. 4, p. 791-806.

SLIVITZKY A., P. St-Julien. 1987. Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. MM 85-04 - Direction Générale de la Recherche Géologique et Minerale, Ministère de l'Énergie et des Ressources.

SOQUIP. 1984. Carte structurale du socle. MM 85-04 - Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction des hydrocarbures.

STANLEY R. S. 1974. « Environment of deformation, Monkton Quartzite, Shelburne Bay, western Vermont ». Geological Society of America Bulletin, vol. 85, p. 233-246.

STANLEY R. S., N. M. Ratcliffe. 1985. « Tectonic synthesis of the Taconian orogeny in western New England ». Geological Society of America Bulletin, vol. 96, p. 1227-1250.

STEARN D. W. 1968. « Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks ». In Rieker R. E. (ed.). National Science Foundation Advanced Science Seminar in Rock Mechanics. Special Report, air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Mass., AD66993751, p. 87-118.

SUPPE J. 1985. Principles of structural geology. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

TANNER P. W. G. 1989. « The flexural-slip mechanism ». Journal of Structural Geology, vol. 11, no. 6, p. 635-655.

TANNER P. W. G. 1990. « The flexural-slip mechanism : Reply ». Journal of Structural Geology, vol. 12, p. 1084-1087.

TEIXELL A., D. W. Durney, M.-L. Arboleya. 2000. « Stress and fluid control on décollement within competent limestone ». Journal of Structural Geology, vol. 22, no. 3, p. 349-371.

TOBIN K. J., K. R. Walker, D. M. Steinhauff, C. J. Mora. 1996. « Fibrous calcite from the Ordovician of Tennessee; preservation of marine oxygen isotopic composition and its implications ». Sedimentology, vol. 43, p. 235-251.

TREMBLAY A., N. Pinet. 1994. « Distribution and characteristics of Taconian and

Acadian deformation, southern Québec Appalachians ». Geological Society of America Bulletin, vol. 106, no. 9, p. 1172-1181.

TUCKER M. E.,V. P. Wright, J. A. D. Dickson. 1990. Carbonate sedimentology. Blackwell Sci. Publ. Oxford, United Kingdom. 1990.

TURNER F. J., L. E. Weis. 1963. Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.

TURNER J. P., P. L. Hancock. 1990. « Relationships between thrusting and joint systems in the Jaca thrust-top basin, Spanish Pyrenees ». Journal of Structural Geology, vol. 12, no. 2, p. 217-226.

VANN I. R., R. H. Graham, A. B. Hayward. 1986. « The structure of mountain fronts ». Journal of Structural Geology, vol. 8, no. 3-4, p. 215-227.

VEIZER J., P. Bruckschen, F. Pawellek, A. Diener, O. G. Podlaha, G. A. F. Carden, T. Jasper, C. Korte, H. Strauss, K. Azmy, D. Ala. 1997. « Oxygen isotope evolution of Phanerozoic seawater ». Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, vol. 132, no. 3-4, p. 159-172.

WILLIAMS P. F., C. Hy. 1990. « Origin and deformational and metamorphic history of gold-bearing quartz veins on the Eastern Shore of Nova Scotia » . In : A. L. Sangster (ed.). Mineral Deposit Studies in Nova Scotia. Geological Survey of Canada, Paper 90-8, vol. 1, p. 169-194.

WINDH J. 1995. « Saddle reef and related gold mineralization, Hill End gold field, Australia : Evolution of an auriferous vein system during progressive deformation ». Economic Geology, vol. 90, p. 1764-1775.

Appendice A : Résultats de l'analyse isotopique des ciments de calcite de l'encaissant, des veines et des failles.

Groupe stratigraphique	Famille structurale	No d'analyse	$\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	$\delta^{13}C$ ‰	Emplacement
Beekmantown	Encaissant	3	-4,8	-1,14	Route 235 (affleurement n° 4)
		12	-4,8	-1,01	
		11	-7,8	-0,99	
		26	-8,6	-0,34	
		39	-8,0	-0,68	
		42B	-9,4	-1,81	
		95B	-9,5	-1,32	
	VPL laminée	16	-8,7	-1,59	
		20	-8,6	-0,87	
		24A	-8,3	-0,32	
		27	-8,7	-0,44	
		41A	-8,5	-0,69	
		41B	-9,2	-1,21	
		41D	-8,8	-0,92	
		41E	-9,4	-0,95	
		41F	-9,2	-1,11	
		41H	-8,4	-0,37	
		94A	-8,6	-0,87	
		94B	-8,8	-1,10	
		94D	-8,6	-0,94	
		94E	-8,2	-0,91	
		95A	-10,0	-1,30	
		137B	-8,3	-0,56	
		138A	-8,2	-0,25	
		139A	-8,5	-0,64	
	VPL massive	18B	-8,5	-0,66	
		21	-8,3	-0,36	
		28	-8,3	-0,15	
		31	-9,7	-1,33	
		35	-8,5	-0,74	
		40	-8,3	-0,15	
		137A	-8,3	-0,42	
		138B	-8,4	-0,08	
		139B	-8,6	-0,75	

Groupe stratigraphique	Famille structurale	No d'analyse	$\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	$\delta^{13}C$ ‰	Emplacement
Beekmantown	V. d'extension parallèle au front	24B	-9,5	-0,64	Route 235 (affleurement n° 4)
		28B	-8,6	-0,62	
		32	-8,3	-0,23	
		37	-8,8	-0,31	
	V. cis. par. au front	42A	-9,9	-1,37	
		96	-8,4	-0,28	
	V. Perpendiculaire au front	17	-8,6	-1,06	
		18A	-9,1	-1,77	
		22	-10,5	-2,51	
	Faille inverse	134A	-8,1	-0,25	
		134B	-6,2	-1,03	
		136A	-8,4	-0,58	
		136B	-8,5	-0,55	
		136C	-8,1	-0,32	
	Faille dextre	135	-5,4	1,00	
Chazy	VPL	91	-7,5	-0,84	Carrière abandonnée (affleurement n° 2)
	V. d'ext. par. au front	92	-7,4	-1,44	
		93	-7,9	-1,32	
Black River	Encaissant	117A	-2,5	1,32	
	VPL massive	89	-7,5	0,87	
		122	-6,9	1,18	
	V. échelon	88	-8,7	0,42	
	V. NE-SO	117B	-6,9	0,52	
		118	-7,1	0,60	
	F. senestre	120A	-1,1	-1,05	
	F. normale	120B	-7,7	0,88	
Trenton	Encaissant	50	-6,4	1,61	Carrière Saint-Dominique (affleurement n° 1)
		54	-6,7	1,47	
		57	-7,3	1,43	
		83A	-6,4	1,07	
		105B*	-6,6	1,51	
		115A	-6,8	1,40	
		126	-6,2	1,38	
	VPL laminée	52	-6,3	1,37	
		53	-6,1	1,27	
		62	-8,1	0,60	
		73A	-7,7	0,80	
		73B	-7,6	0,88	
		127A	-6,5	1,29	
		128A	-6,4	1,33	

Groupe stratigraphique	Famille structurale	No d'analyse	$\delta^{18}O_{PDB}$ ‰	$\delta^{13}C$ ‰	Emplacement
Trenton	VPL massive	103*	-6,3	1,31	Carrière Saint-Dominique (affleurement n° 1), sauf (*): Route 235 (affleurement n° 2)
		107*	-6,5	1,36	
		123A	-6,3	0,82	
		123B	-6,3	0,94	
		123C	-5,7	1,11	
		127B	-4,7	1,96	
		129A	-6,1	1,72	
		129B	-5,9	1,60	
	V. de cisaillement parallèle au front	45	-6,6	1,36	
		51	-6,4	1,44	
		63	-6,5	1,38	
		74	-6,2	1,25	
		75	-6,4	1,27	
		78	-6,5	1,44	
		80	-6,3	1,28	
		124A	-6,5	1,26	
		125	-7,0	1,25	
	Fente de tension	83B	-5,8	1,37	
		84	-6,6	0,89	
		115B	-6,8	1,15	
		115C	-7,0	0,93	
	V. d'extension parallèle au front	124B	-7,5	1,36	
		124C	-6,5	1,67	
	V. perpend. au front	101*	-6,7	1,29	
		105A*	-7,3	0,61	
	Faille normale	64	-6,8	1,31	
		76	-3,4	0,52	
		131A	-5,9	1,65	
		131B	-5,3	1,77	
		132A	-5,9	1,78	
		133A	-5,9	1,55	
		133B	-6,1	1,38	
	Faille inverse	104*	-6,2	1,39	
		108*	-6,0	1,66	

No d'analyse	$\delta^{18}O_{PDB}$ o/oo	Erreur	δ13C o/oo	Erreur
21	-8,6	± 0.25	-0,32	± 0.03
39	-8,0	± 0.13	-0,68	± 0.05
40	-8,3	± 0.00	-0,15	± 0.01
45	-6,6	± 0.11	1,36	± 0.03
63	-6,5	± 0.02	1,38	± 0.00
74	-6,3	± 0.04	1,24	± 0.01
108	-6,0	± 0.06	1,65	± 0.02
125	-7,0	± 0.12	1,25	± 0.02
137A	-8,3	± 0.07	-0,41	± 0.01
24A	-8,3	± 0.07	-0,32	± 0.01
42A	-9,9	± 0.02	-1,37	± 0.01
Minimum:		0		0
Maximum:		0,25		0,05
Moyenne:		0,08		0,02
Écart type:		0,07		0,01

Appendice B : Erreur statistique sur l'analyse isotopique des ciments de calcite de l'encaissant, des veines et des failles.

Planches photographiques

Planche 1 : Pli de rampe dans l'affleurement n° 4. (VPL) Veine parallèle au litage. (F_3) Faille. Groupe de Beekmantown.

Planche 2 : VPL recoupée par le clivage. (A) Veine sigmoïdale. (B) VPL. (C) Clivage de plan axial. Les flèches indiquent le sens du cisaillement révélé par l'orientation des veines sigmoïdales et des stries (non illustrées sur la planche). Affleurement n° 3, Groupe de Trenton.

O E

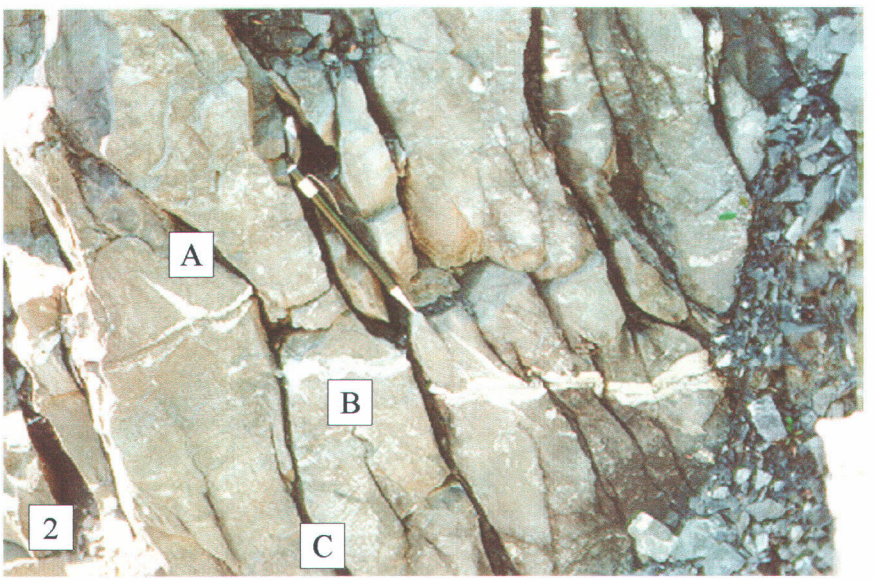
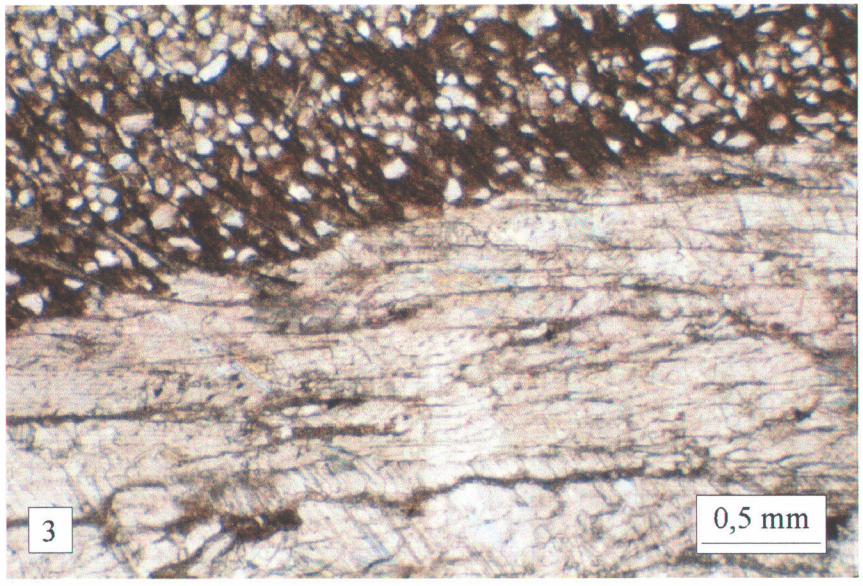


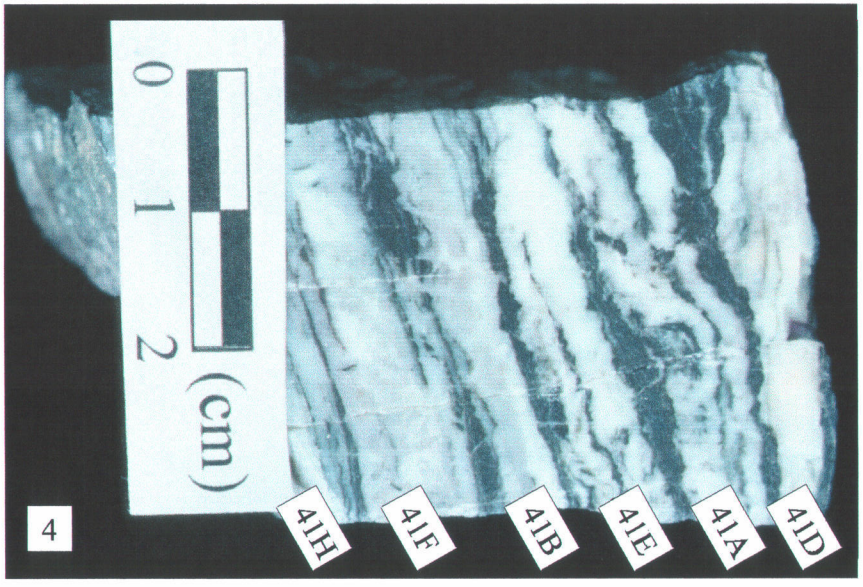
Planche 3 : Microphotographie en lumière transmise montrant le clivage dans l'encaissant et sa prolongation dans une VPL. Échantillon n° 31, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

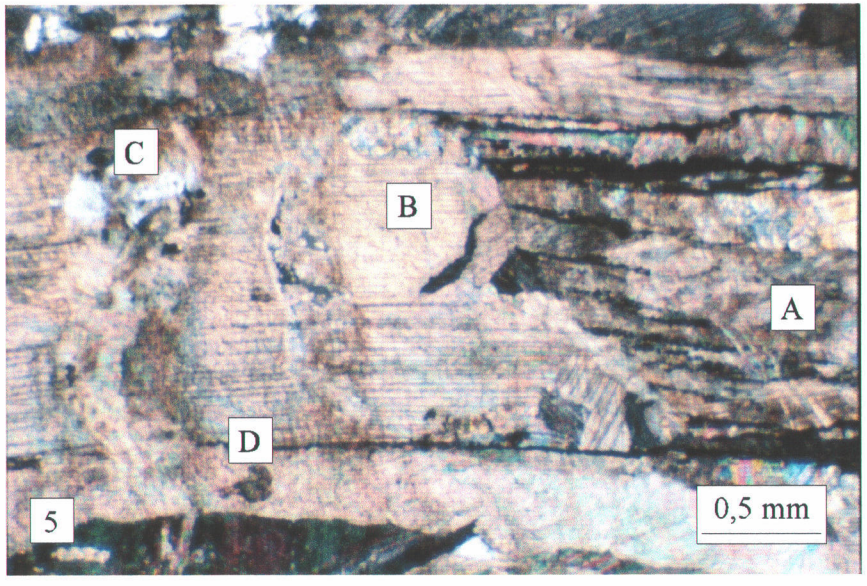
Planche 4 : VPL à structure laminée. Laminations sub-parallèles aux épontes séparées par des fragments d'encaissant. Échantillon n° 41, sous-échantillons sélectionnés pour analyses isotopiques: A, B, D, E, F, H, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

Planche 5 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL présentant plusieurs générations de ciments. (A) Structure laminée. (B) Structure massive recoupant (A). (C) Veinules recoupant (B). (D) Faisceaux argileux montrant des relations de recoupements mutuels avec (C). La figure 14 illustre les différentes étapes de la formation de cette veine. Échantillon n° 73, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.

Planche 6 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL. Les fragments argileux parallèles à l'éponte ont été arrachés à l'encaissant lors de l'ouverture de la veine perpendiculairement aux épontes. Échantillon n° 73, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.


3
0,5 mm


0 1 2 (cm)
4
41H
41F
41B
41E
41A
41D


C
B
A
D
5
0,5 mm

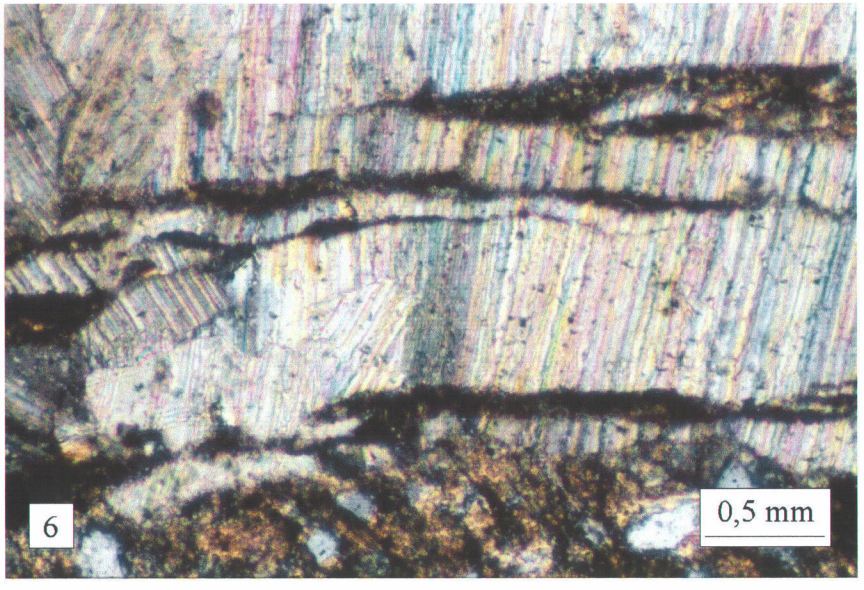
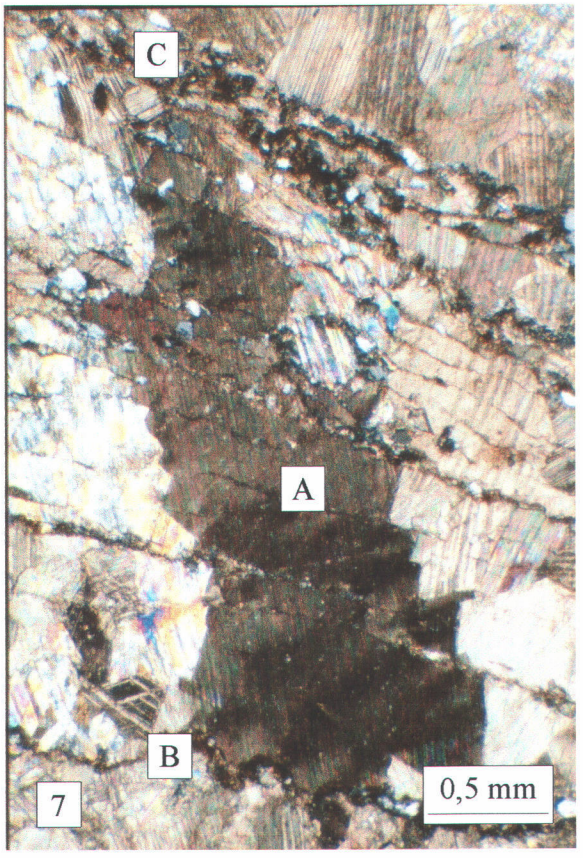
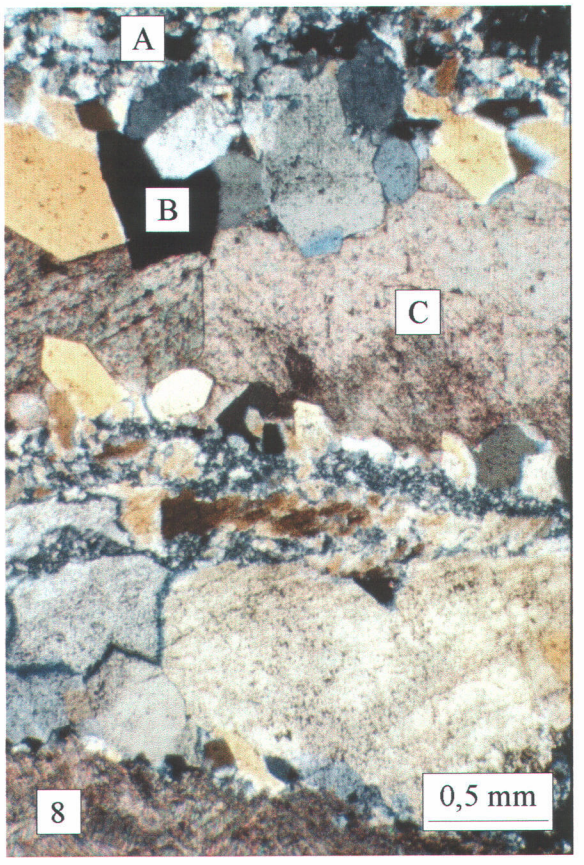

6
0,5 mm

Planche 7 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL à structure massive. Les cristaux de calcite cisaillés (A), les stylolites (B) et les bandes de quartz en cristaux fins et anédriques (C) parallèles aux épontes donnent l'impression que la structure de la VPL est laminée. Échantillon n° 35, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

Planche 8 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL à structure laminée. Les cristaux de quartz fibreux et perpendiculaires aux épontes (A) se sont développés à partir des bandes de cristaux de quartz fins et anédriques (B). Les cristaux de calcite larges et euédriques (C) sont postérieurs aux deux premiers ciments. Échantillon n° 27, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

Planche 9 : Microphotographie en cathodoluminescence d'une VPL à structure laminée. Les laminations sont séparées par des fragments d'encaissant (en noir) et comportent des ciments de luminescences différentes. Les vraies couleurs sont plus ternes. Échantillon n° 31, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.


C
A
B
0,5 mm
7


A
B
C
0,5 mm
8

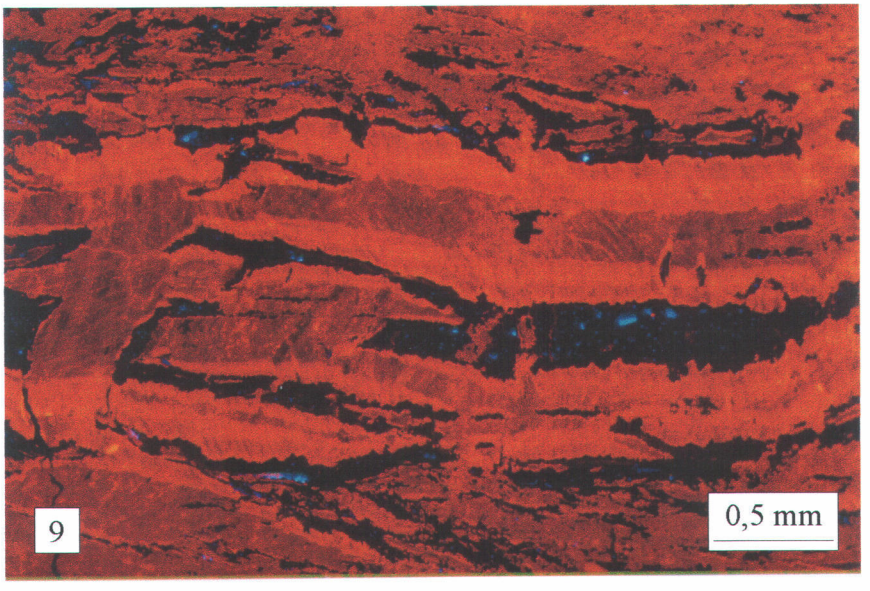
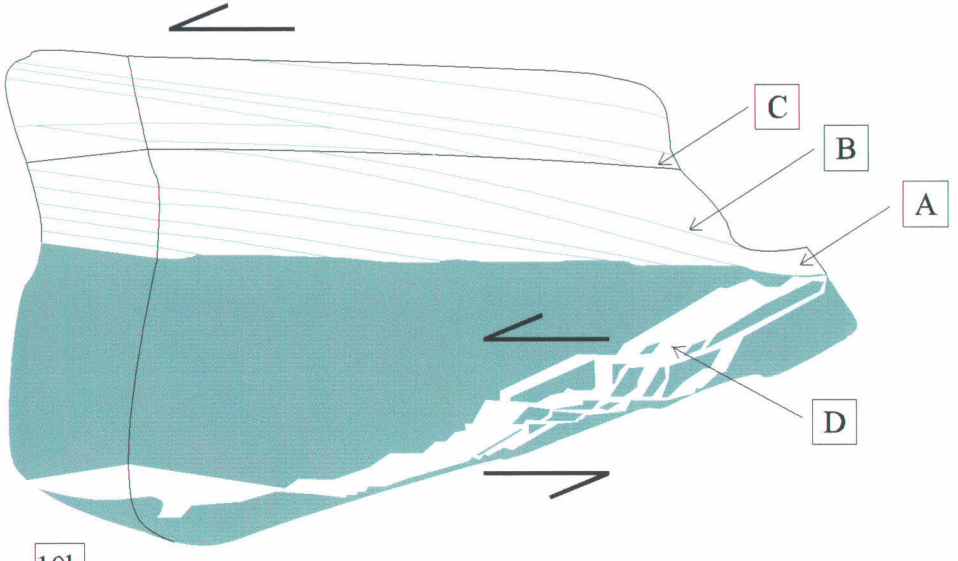

0,5 mm
9

Planche 10 : Photographie (10a) et schéma (10b) d'une VPL à structure laminée. (A) Lamination de calcite oblique par rapport à l'éponte. (B) Faisceau argileux oblique par rapport à l'éponte. (C) Faisceau argileux parallèle à l'éponte. (D) Brèche de calcite. Échantillon n° 95, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

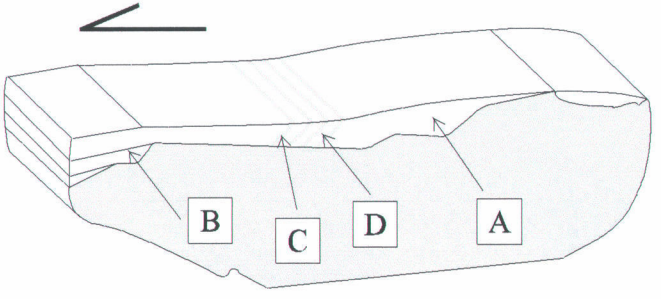
Planche 11 : Photographie (11a) et schéma (11b) d'une VPL à structure laminée et épontes en marches d'escalier. (A) Lamination de calcite et de quartz. (B) Faisceau argileux. (C) Fragments d'encaissant. (D) Cavité rhomboédrique délimitée par l'éponte et les éléments (B) et (C). Échantillon n° 27, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

10a

11a



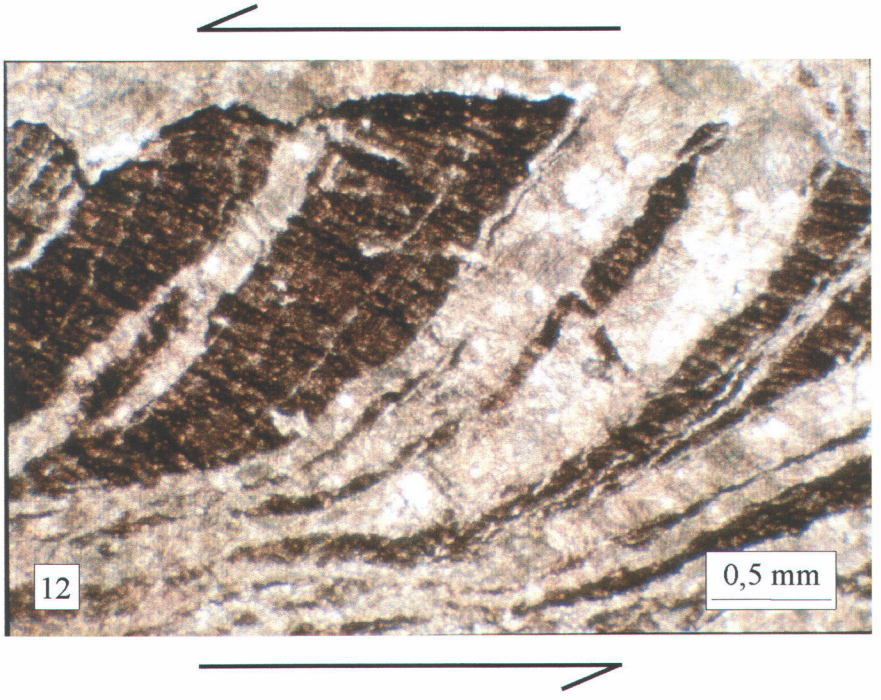
10b



11b

Planche 12 : Microphotographie en lumière transmise de fragments d'encaissant inclus dans une veine de cisaillement parallèle au front orogénique. Le sens de cisaillement est révélé par la géométrie des fragments d'encaissant. Échantillon n° 45, affleurement n°1, Groupe de Trenton.

Planche 13 : Photographie de quatre VPL. (A) VPL discontinue à cavités rhomboédriques, à structure massive (échantillon n° 40), entourée par deux VPL continues. (B) Veine d'extension centimétrique. Affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.


12
0,5 mm

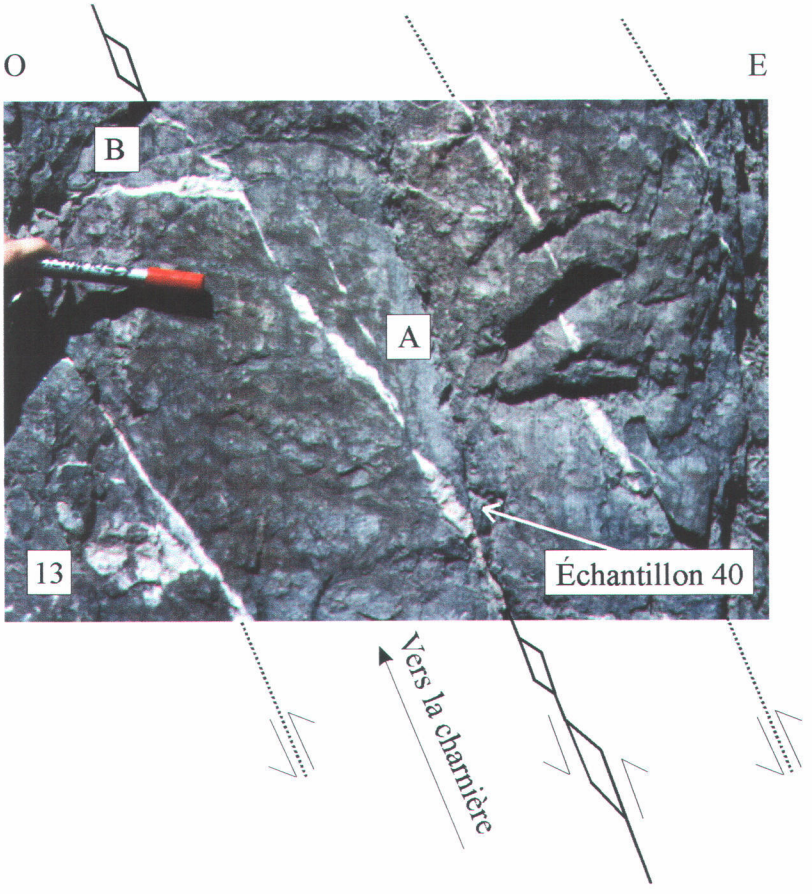
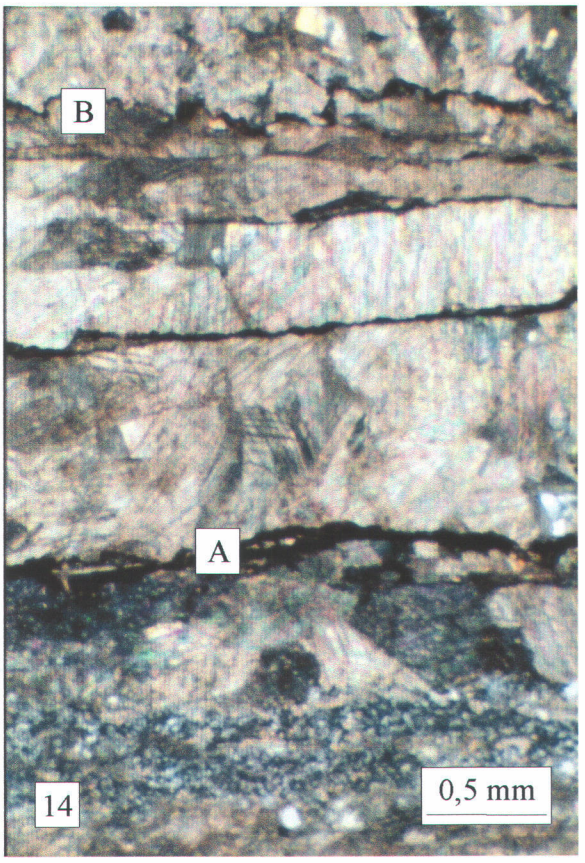

O
E
B
A
13
Échantillon 40
Vers la charnière

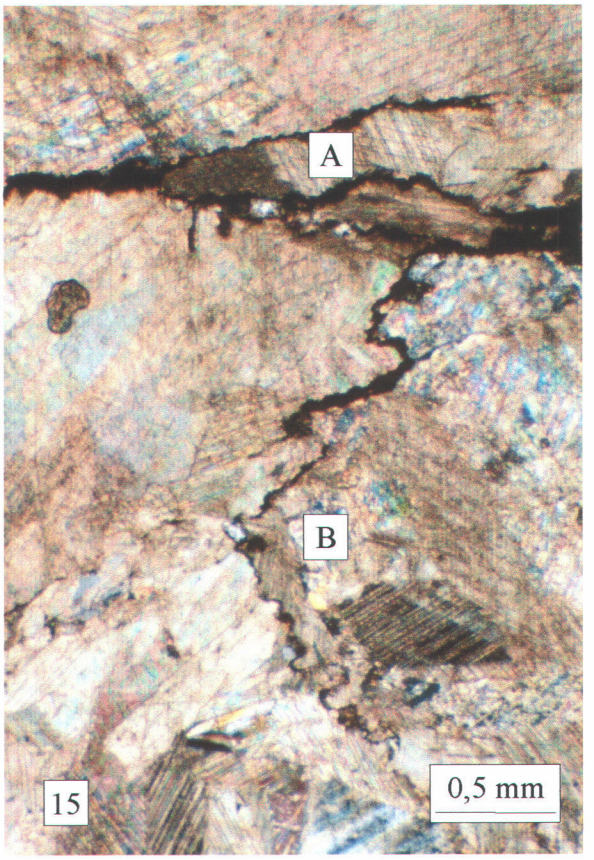
Planche 14 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL à structure laminée. (A) Stylolites parallèles aux épontes, à dents perpendiculaires. (B) Stylolites parallèles aux épontes, à dents obliques. Échantillon n° 52, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.

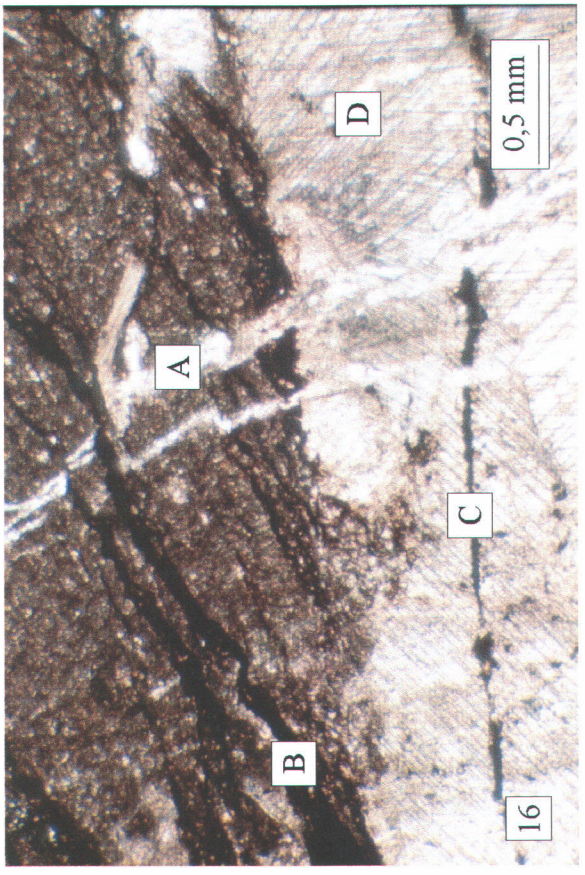
Planche 15 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL à structure laminée. (A) Stylolites sub-parallèles aux épontes, à dents perpendiculaires. (B) Stylolites sub-perpendiculaires aux épontes. Échantillon n° 73, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.

Planche 16 : Microphotographie en lumière transmise de veinules (A) recoupées par le clivage (B) dans l'encaissant, et recoupant les faisceaux argileux (C) dans la VPL à structure laminée (D). Échantillon n° 53, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.

Planche 17 : Microphotographie en lumière polarisée d'une VPL à structure laminée. Cristaux anédriques de quartz entourant des cristaux anédriques à sub-euédriques de calcite. Échantillon n° 27, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.


B
A
14
0,5 mm


A
B
15
0,5 mm


D
0,5 mm
A
C
B
16

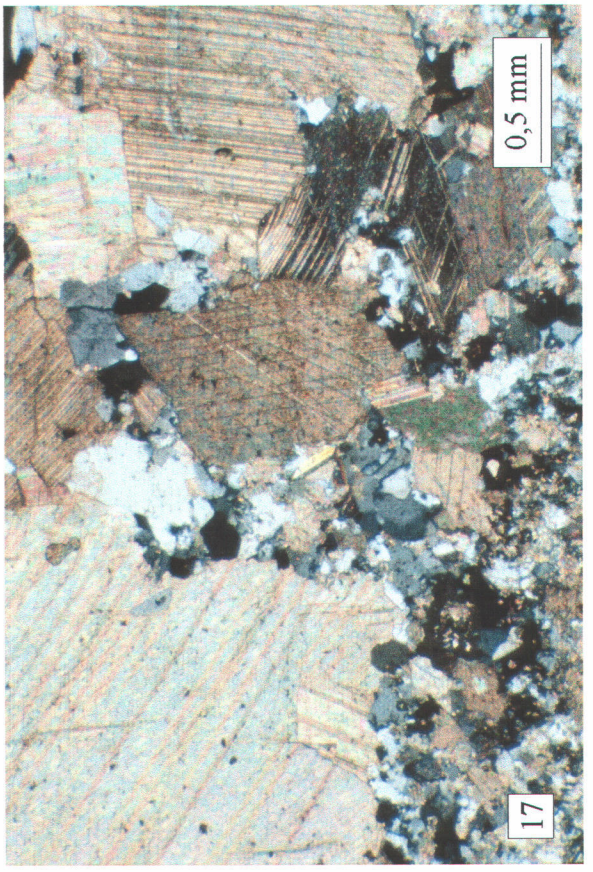
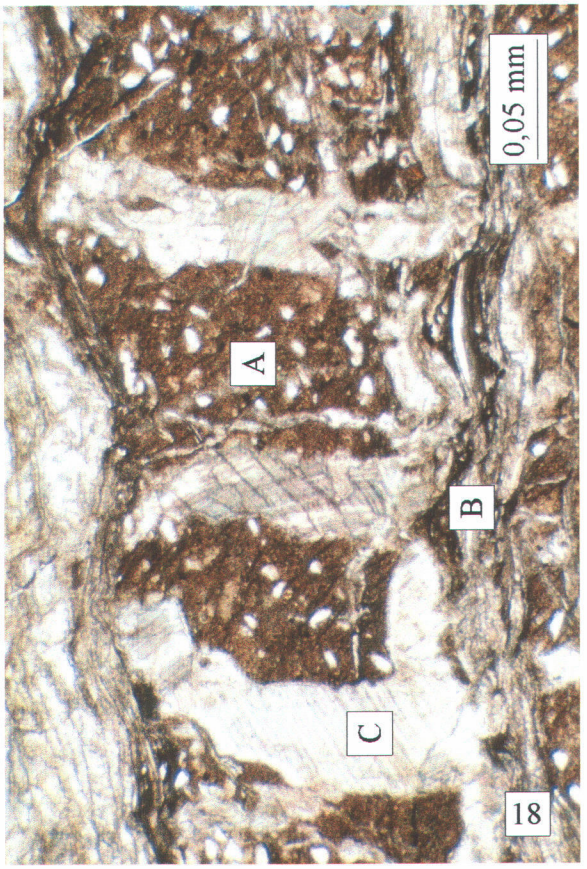

0,5 mm
17

Planche 18 : Microphotographie en lumière transmise d'une VPL à structure massive. (A) Fragments d'encaissant boudinés. (B) Faisceaux argileux et stylolites parallèles aux épontes. (C) Ciment de calcite. Échantillon n° 31, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

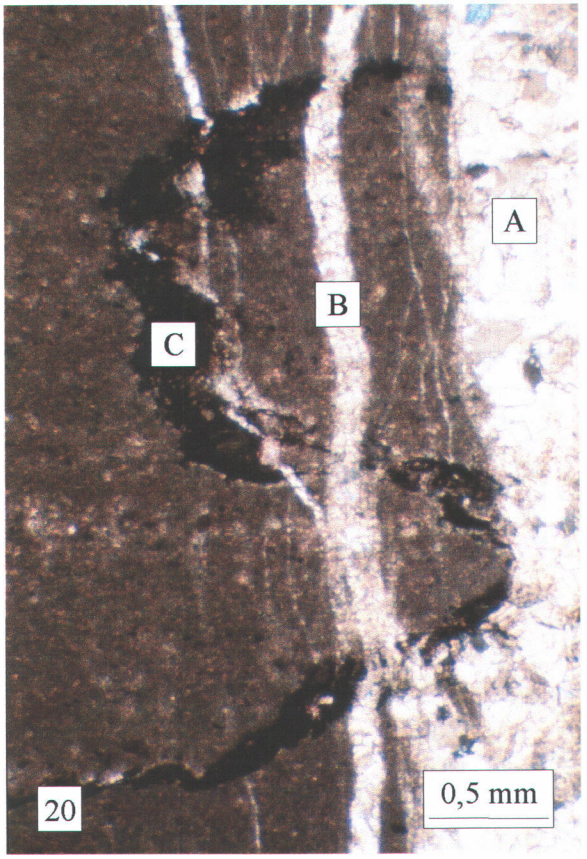
Planche 19 : Veines en échelon parallèles au front orogénique, à proximité de deux failles normales conjuguées dessinant un graben. Échantillon n° 88, affleurement n° 2, Groupe de Black River.

Planche 20 : Microphotographie en lumière transmise d'une veine d'extension parallèle au front orogénique (A) et de veinules de calcite (B) recoupant le clivage stylolitique (C). L'ouverture de la veine et des veinules s'est produite perpendiculairement au stylolite. Échantillon n° 124, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.

Planche 21 : Microphotographie en lumière transmise de l'éponte d'une veine d'extension parallèle au front orogénique, détail de l'encaissant à proximité de la veine. Le clivage stylolitique (A) est recoupé par des veinules (B) sub-parallèles à celui-ci. Une veinule (C) mime la trace du stylolite et l'orientation de ses fibres de calcite indique que l'ouverture s'est produite perpendiculairement au clivage. Échantillon n° 124B, affleurement n° 1, Groupe de Trenton.


0,05 mm
A
B
C
18

19


A
B
C
20
0,5 mm

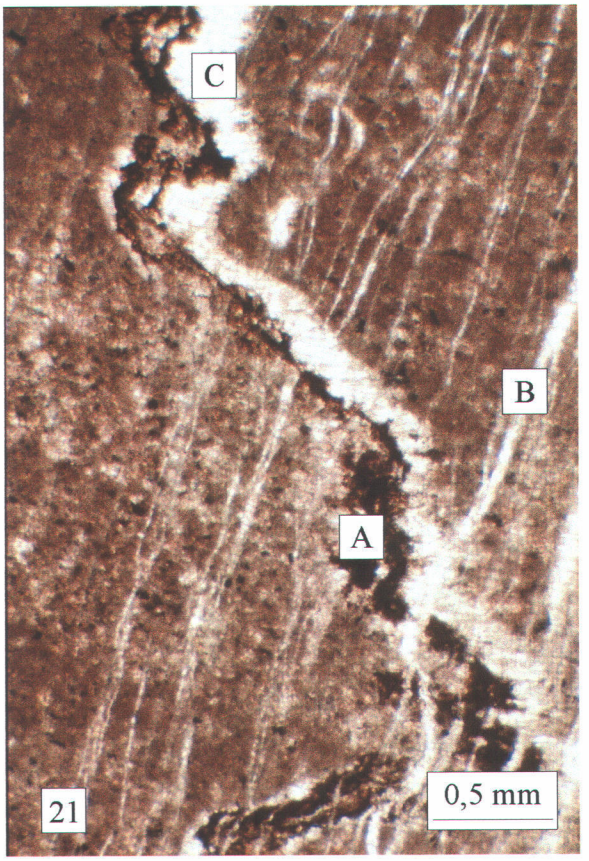
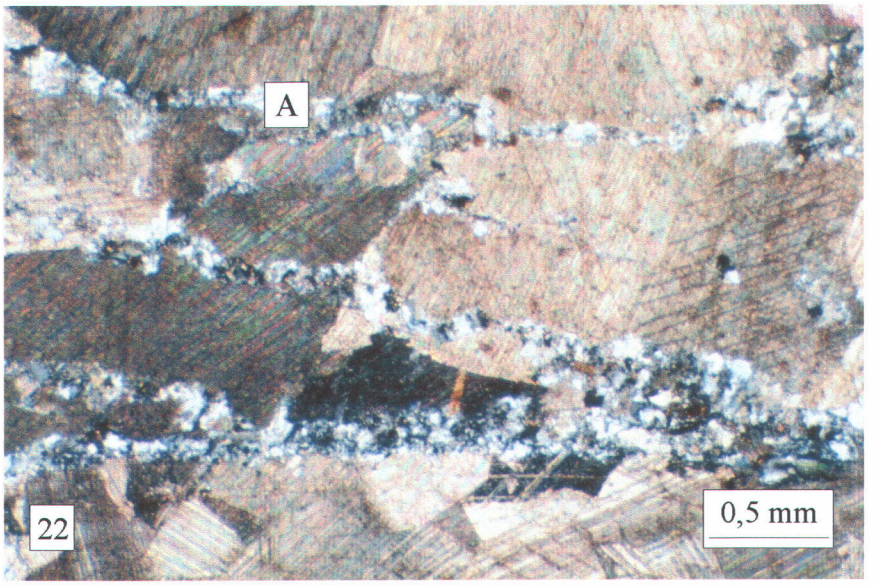

C
B
A
21
0,5 mm

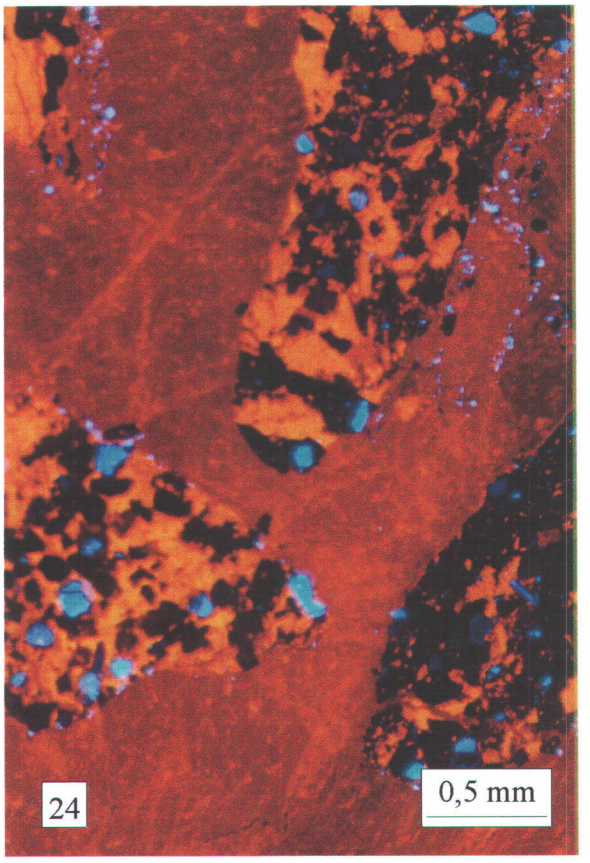
Planche 22 : Microphotographie en lumière polarisée d'une veine de cisaillement parallèle au front orogénique. Un réseau anastomosé de bandes de quartz en cristaux fins et anédriques (A) recoupe le ciment de calcite en cristaux larges et euédriques. Échantillon n° 42, affleurement n° 4, Groupe de Beekmantown.

Planche 23 : Veine perpendiculaire au front orogénique. Échantillon n° 101, Route 235, Groupe de Trenton.

Planche 24 : Microphotographie en cathodoluminescence de fragments d'encaissant dans une veine perpendiculaire au front orogénique. Les vraies couleurs sont plus ternes. Échantillon n° 101, Route 235, Groupe de Trenton.


A
22
0,5 mm

(cm)
0 1 2
23


24
0,5 mm