

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

DATATION DENDROCHRONOLOGIQUE DES MOUVEMENTS DE MASSE
DE GRANDE AMPLÉUR EN MILIEU CÔTIER

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE
EXTENSIONNÉE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
ÉTIENNE BACHAND

MAI 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Pascal Bernatchez, qui m'a donné la chance de m'investir dans ce projet. Pascal m'a fait connaître la géomorphologie littorale et son laboratoire naturel qu'il affectionne particulièrement : la Côte-Nord. Malgré son horaire chargé, il a su me supporter à chaque étape de mon cheminement et m'orienter avec ses conseils des plus rigoureux. Merci beaucoup Pascal pour ta confiance dans la réalisation de ce projet. Les discussions que nous avons eues ont alimenté mes travaux actuels et futurs. J'aimerais grandement remercier Dominique Arseneault, mon codirecteur, pour ses conseils et son support. Dominique est un passionné de dendrochronologie et il sait partager sa passion avec ses étudiants. Merci de m'avoir appris les rudiments de cette science. J'ai grandement apprécié ton efficacité remarquable et la rapidité de tes corrections.

Merci aussi à Thomas Buffin-Bélanger qui a été d'une grande aide, sa vision d'ensemble dans l'analyse et la présentation des résultats fut immensément bénéfique. J'espère avoir trouvé LA figure clé pour mon mémoire !

Un merci immense à mes amis et collègues qui sont venus m'assister lors de la campagne de terrain. Michel Grégoire avec qui j'ai passé un bel été de terrain comme dans le bon vieux temps. Merci Michel pour tes talents d'ouvrier sylvicole et la précision de ton travail. Merci à Stéphanie Friesinger qui est venue égayer quelques journées de terrain. Merci Antoine Morissette pour ton savoir, ta connaissance du terrain nord-côtier et surtout ton assurance qui est pratiquement inébranlable. Merci aussi Antoine, pour la relecture, les commentaires et les corrections, ils ont été largement bénéfiques. Merci à Roch Guèvremont qui est venu me prêter ses gros bras quelques jours afin de sortir mes «pucks» du bois. Merci à Napoléon, Hormidas, Cassis et Pékan, de fiers partenaires de terrain.

Merci à Marie-Noëlle Juneau qui a été d'une immense aide lors du ponçage des échantillons et du dénombrement des cernes annuels.

Je souhaite également exprimer toute ma reconnaissance envers ma petite famille. Merci Geneviève pour ton support, tes encouragements, tes lectures, corrections et commentaires, ô combien pertinents! Merci d'avoir pris le temps de lire mon travail malgré mes sautes d'humeur!

Merci à Philippe et Louis, mes deux petits amours qui sont venus modifier le cheminement de ma maîtrise, mais ô combien ce fut profitable et enrichissant! Merci aussi à mes parents qui m'ont supporté tout au long de ma scolarité malgré la distance qui nous sépare et qui m'ont transmis leur envie de toujours en apprendre davantage. Merci aussi pour vos corrections et commentaires.

Finalement et non les moindres, merci à mes amis et membres de mon labo: Ursule Boyer-Villemaire, Maude Corriveau, Myriam Coutu, Suzan Drejza, Stéphanie Friesinger, Marie-Noëlle Juneau, Anne-Marie Leclerc, Chantale Quintin, Benoit Vigneau. Tout au cours de la réalisation de ma maîtrise et de mon baccalauréat, j'ai eu un immense plaisir à travailler avec vous et pour l'ensemble des discussions pertinentes ou non à notre travail.

Merci aussi à mes amis Taylor, François, Louise-Anne, Sylvio, Stéphanie, Ben et Marie-Nô avec qui j'ai partagé des moments inoubliables tout au long de ma maîtrise. Merci à Steph pour ces dérangements de fin de journée.

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier de la chaire de recherche en géoscience côtière de l'Université du Québec à Rimouski ainsi qu'à celui du gouvernement du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| LISTE DES FIGURES..... | vi |
| LISTE DES TABLEAUX..... | vii |
| LISTE DES ANNEXES..... | viii |
| RÉSUMÉ..... | ix |
| CHAPITRE I..... | 1 |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1. Problématique..... | 1 |
| 1.2. Objectifs..... | 7 |
| CHAPITRE II..... | 9 |
| 2.1. Description générale du site d'étude..... | 9 |
| 2.1.1. Contextes géomorphologique et stratigraphique..... | 9 |
| 2.1.2. Caractéristiques du couvert forestier..... | 12 |
| 2.2. Méthode..... | 13 |
| 2.3. Résultats..... | 14 |
| 2.4. Discussion..... | 19 |
| 2.4.1. Datation..... | 19 |
| 2.4.2. Îlots de survivants..... | 21 |
| 2.4.3. Différence entre les sites..... | 21 |
| 2.4.4. Applications et recommandations..... | 23 |
| 2.5 Prospectives..... | 24 |
| CHAPITRE III..... | 25 |
| CONCLUSION..... | 25 |
| RÉFÉRENCES..... | 27 |

| | |
|----------------|----|
| ANNEXE 1 | 35 |
| ANNEXE 2 | 36 |
| ANNEXE 3 | 38 |
| ANNEXE 4 | 39 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1. Schéma présentant le processus de recul des côtes par mouvements de masse (Source : Lee et al., 2002)..... | 2 |
| Figure 1.2. Exemple de cicatrice d'abrasion causée par une coulée argileuse (Source : Étienne Bachand 2009)..... | 5 |
| Figure 1.3. Bois de réaction sur un conifère (Source : Etienne Bachand 2009) | 6 |
| Figure 1.4. a) Suppression de croissance radiale b) Détente de croissance radiale..... | 6 |
| Figure 2.1. Carte de localisation des trois amphithéâtres à l'ouest de Rivière-Saint-Jean, illustrant aussi les neuf transects d'échantillonnage (T-1 à Ta-9). Ta représente des transects réalisés dans le talus seulement | 10 |
| Figure 2.2 Coupe stratigraphique réalisée sur la falaise bordant l'amphithéâtre II | 11 |
| Figure 2.3. Îlots forestiers d'arbres survivants à une coulée argileuse dans la région de Havre- Saint-Pierre (Source : Étienne Bachand) | 12 |
| Figure 2.4. Structure d'âge des arbres (A, C et E) et histogramme de fréquences des réponses anatomiques des arbres (B, D et F). Le trait pointillé représente l'année présumée de la coulée argileuse. L'année présumée a été déterminée grâce au premier pic le plus élevé de réponses anatomiques. Les structures d'âge ne permettent qu'une estimation de la date..... | 16 |
| Figure 2.5. Position séquentielle des arbres sur les transects T-7 et T-8 (site III) en fonction de l'écart du premier cerne avec la date présumée de la coulée argileuse. Le zéro de l'ordonnée représente l'année présumée de la coulée, les valeurs positives indiquent des individus établis suite à la coulée tandis que les valeurs négatives représentent les survivants. Les individus voisins avec un établissement antérieur à la coulée correspondent à des îlots de survivants (voir la figure 2.3)... | 18 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1. Schéma présentant le processus de recul des côtes par mouvements de masse (Source : Lee et al., 2002) | 2 |
| Figure 1.2. Exemple de cicatrice d'abrasion causée par une coulée argileuse (Source : Étienne Bachand 2009)..... | 5 |
| Figure 1.3. Bois de réaction sur un conifère (Source : Etienne Bachand 2009)..... | 6 |
| Figure 1.4. a) Suppression de croissance radiale b) Détente de croissance radiale..... | 6 |
| Figure 2.1. Carte de localisation des trois amphithéâtres à l'ouest de Rivière-Saint-Jean, illustrant aussi les neuf transects d'échantillonnage (T-1 à Ta-9). Ta représente des transects réalisés dans le talus seulement | 10 |
| Figure 2.2 Coupe stratigraphique réalisée sur la falaise bordant l'amphithéâtre II..... | 11 |
| Figure 2.3. Îlots forestiers d'arbres survivants à une coulée argileuse dans la région de Havre- Saint-Pierre (Source : Étienne Bachand)..... | 12 |
| Figure 2.4. Structure d'âge des arbres (A, C et E) et histogramme de fréquences des réponses anatomiques des arbres (B, D et F). Le trait pointillé représente l'année présumée de la coulée argileuse. L'année présumée a été déterminée grâce au premier pic le plus élevé de réponses anatomiques. Les structures d'âge ne permettent qu'une estimation de la date..... | 16 |
| Figure 2.5. Position séquentielle des arbres sur les transects T-7 et T-8 (site III) en fonction de l'écart du premier cerne avec la date présumée de la coulée argileuse. Le zéro de l'ordonnée représente l'année présumée de la coulée, les valeurs positives indiquent des individus établis suite à la coulée tandis que les valeurs négatives représentent les survivants. Les individus voisins avec un établissement antérieur à la coulée correspondent à des îlots de survivants (voir la figure 2.3)... | 18 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 2.1. Nombre de réponses écologiques et anatomiques retrouvées dans les transects et nombre de réponses anatomiques supplémentaires en fonction des sites..... | 15 |
| Tableau 2.2. Décalage en années entre les réponses écologiques et anatomiques des arbres sur le talus et le plancher des trois amphithéâtres étudiés. | 17 |
| Tableau 2.3. Répartition du nombre de réponses anatomiques par type | 18 |

LISTE DES ANNEXES

| | | |
|----------|---|----|
| ANNEXE 1 | Localisation des profils..... | 35 |
| ANNEXE 2 | Profils réalisés à l'intérieur de l'amphithéâtre I..... | 36 |
| ANNEXE 3 | Profils réalisés en bordure de l'amphithéâtre II et sur le talus Est..... | 38 |
| ANNEXE 4 | Profils de plage face aux amphithéâtres I (A, B, C) et II (D)..... | 39 |

RÉSUMÉ

Les mouvements de masse de grande ampleur en milieu côtier ont une importante influence sur la dynamique côtière dans plusieurs régions de la planète. Au Québec, la côte nord de l'estuaire maritime ainsi que du golfe du Saint-Laurent présentent plusieurs kilomètres à risque de mouvements de masse où des centaines d'amphithéâtres ont été identifiés. Actuellement, très peu de ces amphithéâtres sont datés. La datation des mouvements de masse est pourtant essentielle afin de réaliser la chronologie des événements et déterminer la récurrence de ce géorisque. De plus, la datation des mouvements de masse contribuerait à déterminer les causes de leur déclenchement. Ces éléments sont fondamentaux dans l'approfondissement des connaissances de l'évolution temporelle de la géomorphologie côtière ainsi que dans le zonage du risque.

L'objectif principal de ce mémoire est d'appliquer les principes de la dendrochronologie pour dater des mouvements de masse de grande ampleur en milieu côtier. Les processus géomorphologiques génèrent un ensemble d'événements dans les environnements forestiers qui entraînent différentes réponses écologiques ou anatomiques des arbres. La réponse écologique des arbres, qui correspond à l'établissement massif d'arbres suite aux mouvements de masse, a été combinée aux réponses anatomiques des arbres comme les cicatrices d'abrasion, le bois de réaction, et les variations de croissance radiale. Nous avons développé une telle approche de datation dans trois amphithéâtres de coulées argileuses de grande ampleur dans les hautes falaises littorales de Rivière-Saint-Jean sur la côte nord du golfe du Saint-Laurent.

L'analyse dendrogéomorphologique a permis de dater la formation des amphithéâtres en 1928, 1970 et 1997. La date de la coulée de 1970 a été validée à l'aide d'archives régionales du journal L'Avenir de Sept-Îles. Notre étude fait ressortir que les réponses anatomiques offrent une datation plus précise que la réponse écologique, principalement parce que des îlots forestiers constitués de nombreux survivants sont riches en réponses anatomiques dans les trois amphithéâtres. De plus, la datation de l'établissement des arbres est toujours plus tardive sur le talus que sur le plancher des amphithéâtres. Enfin, malgré que le nombre de réponses dendrogéomorphologiques par site soit inversement proportionnel à l'âge des coulées, il nous a été possible d'estimer à 150 ans la limite temporelle de la méthode dendrogéomorphologique dans l'environnement que nous avons étudié.

La datation par dendrogéomorphologie, comme nous l'avons expérimenté, pourrait être appliquée à d'autres amphithéâtres de mouvements de masse en milieu côtier de la côte nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent pour développer une chronologie détaillée des événements passés. Grâce à ces informations, il serait possible d'évaluer de manière précise la récurrence des mouvements de masse en milieu côtier et ainsi développer un zonage du risque de mouvements de masse dans cette région.

Mots-clés : dendrochronologie, dendrogéomorphologie, coulée argileuse, réponse écologique, variation de croissance radiale, bois de réaction, cicatrice, golfe du Saint-Laurent.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Problématique

Dans le contexte du changement climatique prévu, une majorité de scientifiques anticipent une augmentation des risques naturels (GIEC, 2007). Les modifications hydrogéologiques et des précipitations qui affectent la stabilité des versants vont notamment influencer la dynamique des mouvements de masse (Cornforth, 2005, Flageollet et al., 1999, Hugenholtz et Lacelle, 2004, Leroueil et Tavenas, 1983) (Giovanni et Paolo, 2008, Iverson, 2000, Jaedicke et Kleven, 2008). L'hydrogéologie est de loin la composante la plus importante dans le déclenchement des différents types de mouvements de masse (Bernatchez et Dubois, 2004, Cataliotti-Valdina et Long, 1984, Corominas et Moya, 1999, Crosta et Clague, 2009, Geertsema et al., 2006, Iverson, 2000, Jaedicke et Kleven, 2008). À l'échelle canadienne, les mouvements de masse représentent un des risques naturels les plus importants en ce qui a trait aux pertes de vie humaines (RNC, 2007)

En milieu côtier, les mouvements de masse ont des impacts importants sur les processus d'érosion, la morphosédimentologie des plages et sur les apports sédimentaires. (Hapke, 2005, Hapke et Green, 2006, Komar et Shih, 1993, Lee et al., 2002). L'action des vagues par le sapement basal est un facteur supplémentaire dans le déclenchement des mouvements de masse (Hapke et Green, 2006). Certains auteurs se sont intéressés au cycle d'évolution des mouvements de masse en milieu côtier (Kelley et al., 1989, Lee et al., 2002) (Figure 1.1). Ce cycle démontre que les falaises littorales passent d'un état initial stable à un niveau de déstabilisation critique causé par l'érosion de la base des falaises par l'action des vagues. Par appel au vide, l'équilibre est rompu et une portion de la falaise s'écroule sur l'estran, créant ainsi un lobe de sédiments et de débris. La dernière

étape consiste à l'érosion graduelle du lobe durant les tempêtes subséquentes et à un retour au stade initial d'équilibre.

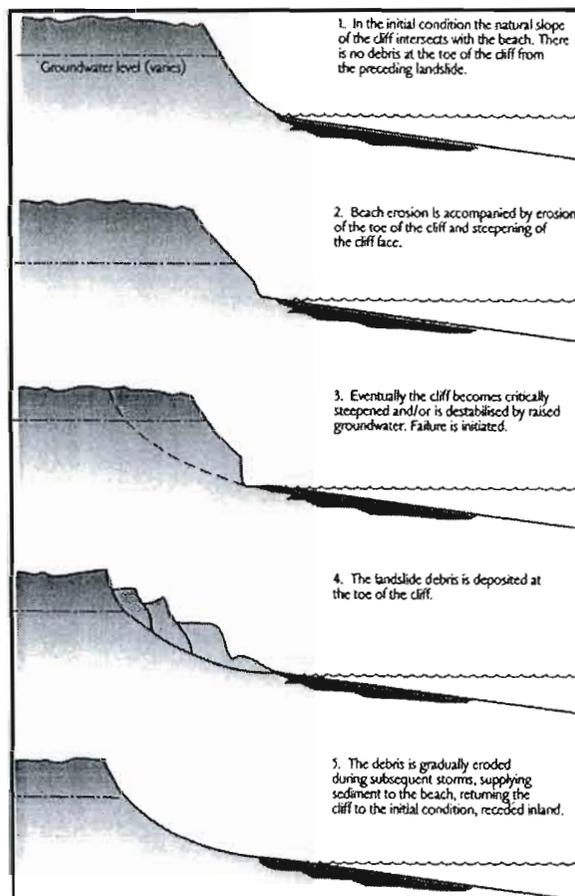


Figure 1.1. Schéma présentant le processus de recul des côtes par mouvements de masse (Source : Lee et al., 2002)

Les lobes de sédiments et de débris créés par les mouvements de masse le long des côtes ont des impacts considérables sur l'environnement littoral (Hapke et Green, 2006), tant au niveau des écosystèmes (Desrosiers et al., 1984) que du transit sédimentaire (Hampton et Griggs, 2004). Par exemple, le lobe de sédiments et de débris fait office de protection naturelle contre l'action des vagues (Kelley et al., 1989) pendant plusieurs années voir des décennies. Le rythme d'érosion des lobes influence directement la période de stabilité de la falaise et le moment de sa réactivation (Komar, 1998b). Par le fait même, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes anticipées par certains auteurs (GIEC, 2007, Kunkel et al., 1999, Zhang et al., 2004) pourraient avoir un

effet direct sur la durée du cycle d'instabilité-stabilité. La durée de ce cycle et les facteurs qui l'influencent ont été peu documentés jusqu'à maintenant. Cette information est pourtant indispensable afin d'établir des projections valables de l'évolution de la côte et prévoir les zones à risque de mouvements de masse.

Pour effectuer une analyse précise du rythme et de la vitesse d'érosion des lobes de sédiments et de débris, il est nécessaire de connaître la date exacte du mouvement de masse. De plus, la connaissance de cette date est essentielle dans la compréhension des causes de déclenchement (Lang et al., 1999). La datation des mouvements de masse peut s'effectuer à l'aide de différentes méthodes (Lang et al., 1999, Shroder, 1980, Strunk, 1997) telles le radiocarbone, la lichénométrie, les archives historiques, la photo-interprétation multi-dates et la dendrochronologie. Le radiocarbone offre une précision qui peut varier de quelques décennies à quelques siècles et permet des datations optimales pour des échantillons d'au moins quelques centaines d'années (Libby et Willard, 1967). Quant à la lichénométrie, elle est largement utilisée pour dater des surfaces rocheuses exposées récemment (< 500 ans), par contre elle ne permet pas de dater l'événement avec beaucoup de précision. De plus, la lichénométrie nécessite des courbes de taux de croissance régionale pour les lichens (Bajgier-Kowalska, 2008, Innes, 1985). Les archives et la photo-interprétation multi-dates sont fréquemment utilisées pour dater les mouvements de masse récents. Cependant, ces documents offrent une couverture fragmentaire et ponctuelle selon les régions et les périodes. L'intervalle de temps entre les séries de photographies aériennes prises au Québec avant 1970 est d'environ 20 ans, ce qui ne permet pas d'identifier précisément l'année des mouvements de masse.

La dendrogéomorphologie est une sous-discipline de la dendrochronologie qui utilise les arbres qui sont abondants et persistants dans les paysages pour dater des processus géomorphologiques comme les mouvements de masse. L'avantage de cette approche est de permettre une datation à l'année près grâce à la résolution annuelle des cernes de croissance (Filion et al., 1991, Shroder, 1978). De plus, la dendrogéomorphologie est une technique de datation relativement abordable, dont les coûts varient en fonction du temps nécessaire pour l'échantillonnage sur le terrain, le prétraitement des échantillons ainsi que le dénombrement des cernes annuels de croissance des arbres.

Cet outil de datation s'est largement développé dans l'étude des mouvements de masse principalement dans le domaine de la dynamique des versants (Alestalo, 1971). Plus précisément, la dendrogéomorphologie est basée sur le principe processus-événement-réponse (Braam et al., 1987a, 1987b, Shroder, 1978, 1980). Les processus géomorphologiques (glissement, coulée, avalanche, etc.) génèrent un ensemble d'événements (basculement des arbres, blessure, etc.) dans les environnements forestiers, qui entraînent différentes réponses des arbres. Par exemple, le rétablissement des arbres après un mouvement de masse est une réponse écologique qui peut être datée par dendrogéomorphologie (Bollschweiler et al., 2008, McCarthy et Luckman, 1993, Pierson, 2007, Winter et al., 2002). De manière assez similaire, les cernes de croissance anormaux causés par une perturbation du milieu de croissance des arbres (Braam et al., 1987a, Shroder, 1978, 1980, Solomina, 2002, Strunk, 1997) constituent une réponse anatomique qui peut aussi être datée.

L'étude du rétablissement des arbres ne permet d'obtenir qu'un âge minimal de la perturbation à cause du délai d'établissement des premiers spécimens, qui varie de quelques années à plusieurs décennies (Bégin et Filion, 1985, McCarthy et Luckman, 1993, Pierson, 2007). De plus, le premier cerne de croissance formé par chaque arbre se trouve généralement au niveau du collet racinaire de l'arbre, sous le niveau du sol. Plus les arbres sont vieux et gros, plus le collet est enfoui profondément (DesRochers et Gagnon, 1997, Dyer et Bailey, 1987, Gutsell et Johnson, 2002, McCarthy et al., 1991, Parent et al., 2000, Peters et al., 2002, Pierson, 2007), ce qui cause une sous-estimation qui augmente avec l'ancienneté des perturbations qui déclenchent la régénération.

Les réponses anatomiques des arbres suite aux mouvements de masse comprennent le bois de réaction suite à l'inclinaison d'une tige, les détentes ou suppressions de croissance et les cicatrices d'abrasion. Les arbres survivants qui contiennent ces réponses anatomiques peuvent être isolés ou regroupés sur des îlots de végétation qui se sont déplacés lors du décrochement (Francescato et al., 2001). Les cicatrices d'abrasion (Figure 1.2) sont dues à la destruction locale du cambium et à l'apparition subséquente de bourrelets marginaux (Fritts, 2001). L'altération externe de l'arbre est directement liée à la nature et aux modes de transport des matériaux (glace, troncs, blocs) associés aux processus géomorphologiques (Alestalo, 1971, Payette, 1980, Stoffel et al., 2005). Dans le cas des mouvements de masse, c'est la portion grossière des

débris comme les troncs et les blocs qui agissent comme agents abrasifs de l'écorce. Les cicatrices d'abrasion peuvent être datées en dénombrant les cernes annuels qui recouvrent la blessure.



Figure 1.2. Exemple de cicatrice d'abrasion causée par une coulée argileuse (Source : Étienne Bachand 2009)

La datation du début de la formation de bois de réaction permet de connaître le moment où les arbres inclinés commencent à se redresser (Schweingruber, 1988, Scurfield, 1973). Dans le cas des mouvements de masse, l'inclinaison des arbres est causée par un changement dans la pente du substrat d'enracinement. La reptation du sol, une coulée argileuse ou l'effet d'un glissement rotationnel qui déplace en bloc compact des sédiments surmontés de matière organique, permet à certains arbres de survivre. Ces derniers repositionnent leur axe de croissance à la verticale en produisant du bois de réaction, généralement pour une série de cernes annuels de croissance. Les cernes de bois de réaction sont identifiables par un changement dans la coloration du bois découlant de la surlignification des parois cellulaires ainsi que par l'excentricité radiale des cernes (Figure 1.3.). Les arbres construisent du bois de réaction aussi longtemps qu'ils n'ont pas retrouvé leur verticalité, ce qui peut prendre plusieurs années.



Figure 1.3. Bois de réaction sur un conifère (Source : Etienne Bachand 2009)

Les suppressions et les détentes de croissance reflètent des changements majeurs dans les conditions de croissance, telles les ouvertures dans les peuplements ou des changements dans les conditions édaphiques. Ces réponses anatomiques peuvent être identifiées et datées grâce à un changement marqué dans la largeur des cernes annuels (Schweingruber, 1996) (Figure 1.4.). Cependant, les détentes et suppressions de croissances radiales n'offrent pas toujours une résolution annuelle, puisqu'elles peuvent débuter avec un décalage de quelques années (Stoffel et Bollschweiler, 2008). Néanmoins, les détentes et suppressions de croissance permettent de corroborer des datations obtenues à l'aide de cicatrice d'abrasion ou de bois de réaction.

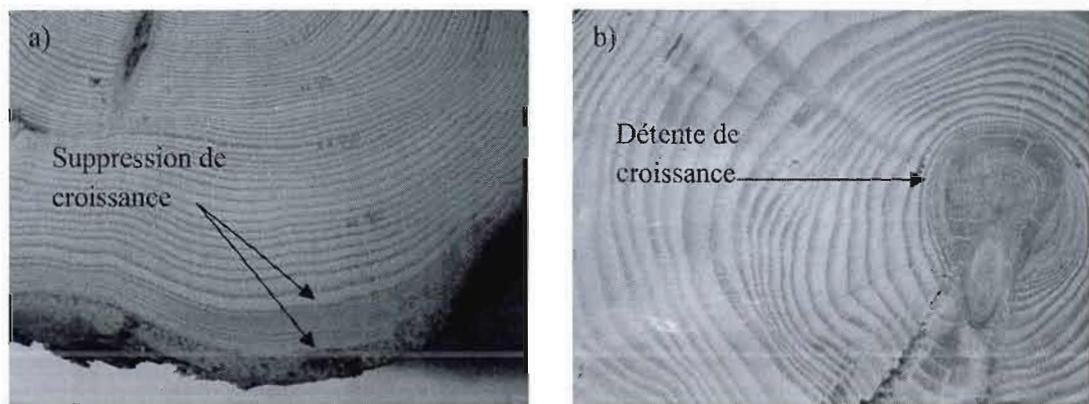


Figure 1.4. a) Suppression de croissance radiale b) Détente de croissance radiale

Au Québec, un inventaire partiel a mis à jour des centaines de cicatrices de mouvements de masse de grande ampleur sur les falaises des paléodeltas de l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent au Québec (Bernatchez, 2003, Desrosiers et al., 1984, Dubois et al., 2005, Morneau, 1988). Ces falaises ont été taillées dans les dépôts meubles mis en place dans la Mer de Goldthwait (Bernatchez et Dubois, 2004, Dubois et al., 2005). Ces formations composées principalement d'argiles marines et de silt prodeltaïques ont souvent quelques dizaines de mètres d'épaisseur. Les argiles marines sont très sensibles aux mouvements de masse dû à leurs propriétés géotechniques et physico-chimiques (Geertsema et Torrance, 2005, La Rochelle et al., 1970, Lefebvre, 1986, Leroueil et Tavenas, 1983, Okamoto et al., 2004). Puisque ces mouvements de masse contribuent activement au recul des hautes falaises des complexes deltaïques (Bernatchez, 2003, Bernatchez et Dubois, 2004, Dubois et al., 2005), il est nécessaire de s'attarder à leur évolution et au rythme de leur récurrence (Lee et al., 2002). Pour ce faire, la datation précise des amphithéâtres de mouvement de masse à l'aide d'une méthode de datation précise et efficace est nécessaire puisque très peu ont été datés à ce jour.

1.2. Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'utiliser la dendrogéomorphologie pour dater la formation d'amphithéâtres de coulées argileuses de grande ampleur en milieu côtier pour la région de la Côte-Nord.

Les objectifs secondaires sont de :

- Définir les limites temporelles et techniques de cette méthode pour cette région
- Définir comment la réponse écologique de rétablissement des tiges dans les amphithéâtres peut être reconstituée par dendrochronologie
- Déterminer si des îlots forestiers de survivants peuvent aider à dater les amphithéâtres à partir des réponses anatomiques des arbres.

Puisqu'aucune étude ne mentionne l'utilisation de la dendrogéomorphologie comme moyen de datation dans la région de la Côte-Nord, nous avons validé son efficacité et sa précision dans cette région. Ainsi, une chronologie précise des cicatrices de mouvements de masse pourra être générée éventuellement et permettre entre autres de faciliter la détermination des causes de leur déclenchement et de mieux comprendre l'évolution des côtes. Ces informations mèneront à définir de meilleurs critères pour le zonage des côtes à risque de mouvements de masse.

CHAPITRE II

2.1. Description générale du site d'étude

2.1.1. Contextes géomorphologique et stratigraphique

L'aire d'étude est localisée sur la rive nord du golfe du Saint-Laurent à environ 3 km à l'ouest de la municipalité de Rivière-Saint-Jean au Québec ($50^{\circ}17'07''\text{N}$, $64^{\circ}22'13''\text{O}$) (Figure 2.1.) dans la principale zone de mouvements de masse entre Sept-Îles et Natashquan (Allard, 1980, Dubois, 1979, Dubois et al., 2005, Lebus, 1977). La zone côtière est bordée d'une falaise taillée dans un complexe deltaïque émergé, mis en place dans la Mer de Goldthwait à l'Holocène. Ce paléodelta présente un relief à faible pente (4°) et une falaise littorale en érosion qui s'étend de part et d'autre de la rivière Saint-Jean. La falaise littorale est fortement disséquée par plusieurs amphithéâtres de mouvements de masse à l'ouest de la rivière, dont la plupart sont des coulées argileuses liées à la liquéfaction des sédiments prodeltaïques (Bernatchez et Dubois, 2004, Dubois, 1979). La stratigraphie de la falaise est composée de deux unités typiques des environnements deltaïques (Boggs, 2006), c'est-à-dire des sédiments limono-argileux stratifiés d'origine prodeltaïque surmontés par des sables fins à grossiers stratifiés d'origine deltaïque et littorale (Figure 2.2). Par endroits, l'unité sommitale sableuse est fortement cimentée sur une épaisseur de 1,5 m à cause de l'induration d'un podzol humo-ferrugineux par une cuirasse ferrugineuse à orstein (Dubois et al., 1990).

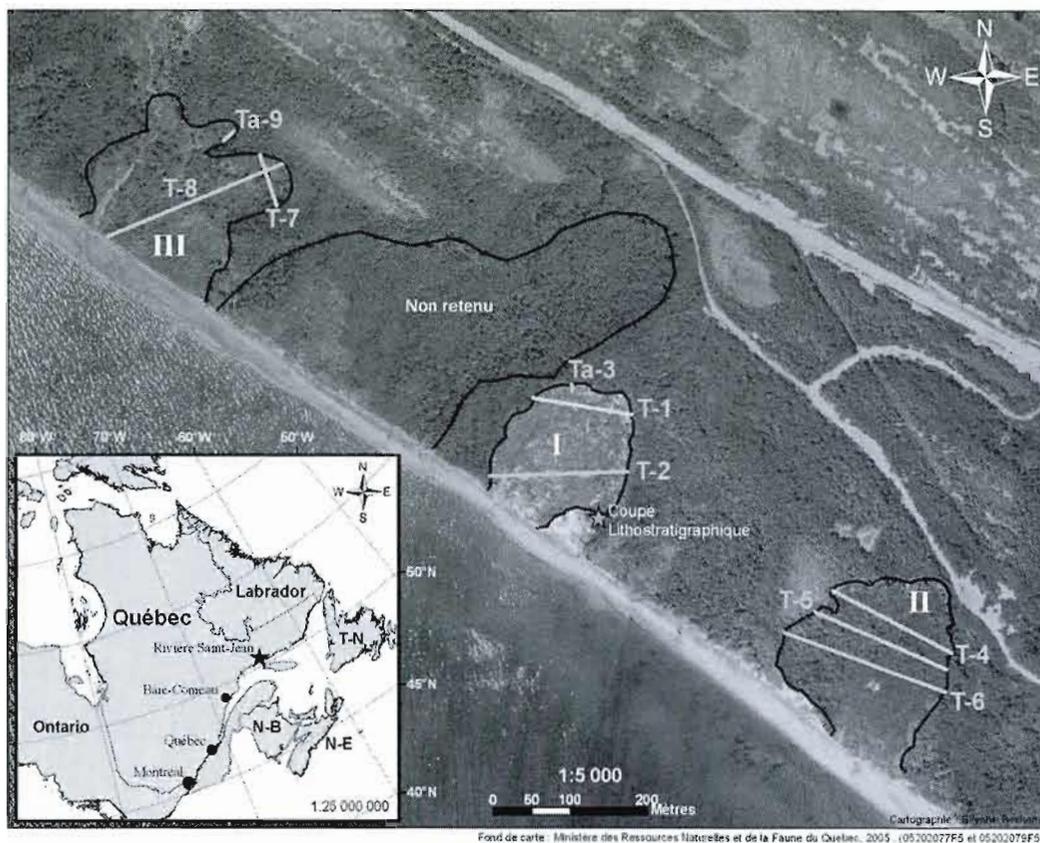


Figure 2.1. Carte de localisation des trois amphithéâtres à l'ouest de Rivière-Saint-Jean, illustrant aussi les neuf transects d'échantillonnage (T-1 à Ta-9). Ta représente des transects réalisés dans le talus seulement

L'analyse des différentes séries de photographies aériennes du secteur (1949, 1958, 1967, 1973, 1975, 1976, 1983, 1989, 1997, 1999 et 2005) a permis d'identifier des dizaines d'amphithéâtres de différents âges. Trois amphithéâtres de type coulée argileuse ont été retenus pour la présente étude. Selon leur présence-absence sur les photographies, ils ont été formés entre 1989 et 1997 (site I), entre 1967 et 1973 (site II) et avant 1949 (site III) (Figure 2.1.). Ces sites ont été choisis à moins de 500 m les uns des autres pour faciliter leur comparaison puisque les conditions climatiques, la nature des dépôts, ainsi que l'influence des processus hydrogéologiques, hydrodynamiques et anthropiques sont semblables. Selon la classification de Conforth, (2005) les trois sites correspondent à des coulées argileuses de grande ampleur, les superficies affectées variant entre 24 000 et 46 000 m² et les volumes de sédiments évacués oscillant entre 312 000 et 718 000 m³ (Annexe 1 à 4). Les trois sites sont composés d'une zone de décrochement sous forme d'un talus à forte pente de 20° à 32°, d'un plancher d'amphithéâtre relativement plat de 2° à 4° qui représente la surface des débris au fond de la cuvette (Laverdière, 1972) et d'une zone de fluage fortement remaniée par l'action des vagues (Annexe 1 à 4). Les sites I et II

présentent une forme d'amphithéâtre à une seule cicatrice tandis que le site III en présente au moins trois. L'analyse des photographies aériennes prises entre 1949 et 2005 démontre que les cicatrices nord-est et central du site III se sont formées simultanément tandis que la cicatrice nord-ouest a progressé par au moins trois événements distincts entre 1983 et 2005. Un amphithéâtre situé entre les sites I et III n'a pas été retenu pour l'étude puisqu'il semblait beaucoup trop ancien pour être daté par dendrogéomorphologie (Figure 2.1.).

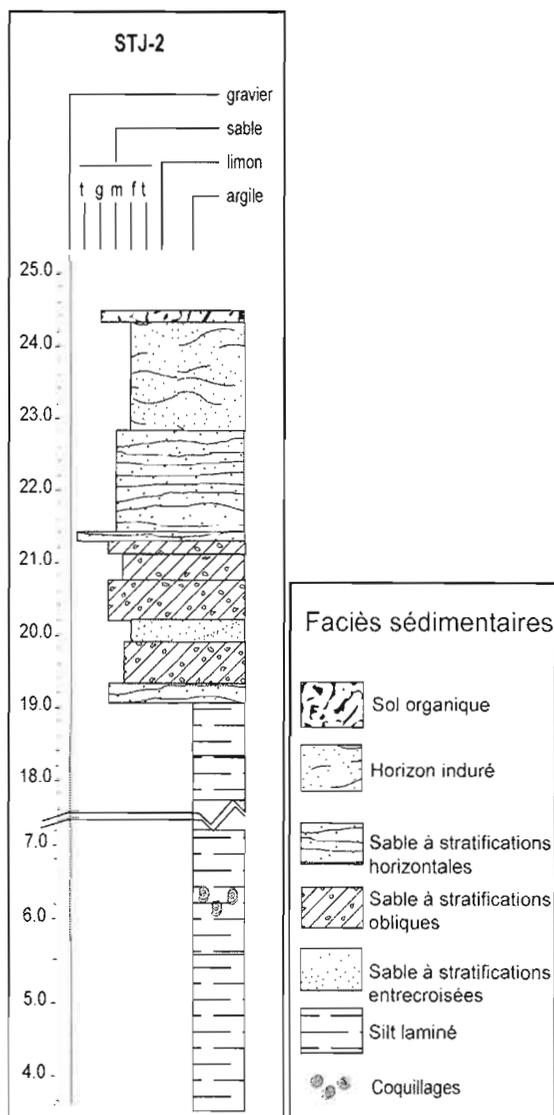


Figure 2.2 Coupe stratigraphique réalisée sur la falaise bordant l'amphithéâtre II

2.1.2. Caractéristiques du couvert forestier

La forêt établie sur les talus et le plancher des amphithéâtres est principalement composée de sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), de bouleau à papier (*Betula papyrifera* (Marsh.)) et de mélèze laricin (*Larix laricina* (DuRoi) K. Koch). Les épinettes blanches et noires (*Picea glauca* (Moench) Voss), (*P. mariana* (Mill.) BSP.) sont surtout présentes comme espèces compagnes. Ces essences d'arbres sont d'une longévité se situant généralement autour de 120 ans pour le bouleau à papier, de 150 ans pour le sapin baumier et le mélèze laricin et de 200 ans pour les épinettes blanches et noires (Farrar, 1995). Le talus et le plancher de l'amphithéâtre le plus récent (site I) sont occupés par de jeunes arbres de moins de trois mètres de hauteur au travers desquels sont dispersés des îlots d'arbres matures. Ces îlots qui ont été vraisemblablement déplacés lors du mouvement de masse incluent des arbres vivants et des arbres morts, debout ou couchés au sol, avec des déformations, des courbures et des blessures (Figure 2.3.). Aux sites II et III, la végétation arborescente est bien établie sur les talus et dans la portion amont du plancher des amphithéâtres, tandis que la zone de fluage est colonisée principalement par des essences arbustives tels l'aulne rugueux (*Alnus rugosa* (Du Roi) J. Clausen) et le sorbier d'Amérique (*Sorbus americana* Marsh).



Figure 2.3. Îlots forestiers d'arbres survivants à une coulée argileuse dans la région de Havre- Saint-Pierre (Source : Étienne Bachand)

2.2. Méthode

Un inventaire par transects a été réalisé à l'été 2007 dans les amphithéâtres afin de déterminer l'établissement des arbres et pour analyser les différentes réponses anatomiques des survivants. Dans chaque amphithéâtre, trois transects de 1,5 m de large ont été positionnés perpendiculairement au sens de la coulée. Tous les transects ont été positionnés de manière aléatoire, sauf le transect T-2 du site I qui a été positionné de façon à traverser un îlot forestier de survivants visible sur les photographies aériennes. Tous les arbres rencontrés sur les transects dans chaque site ont été identifiés à l'espèce, leur diamètre a été mesuré au-dessus de la plus haute racine, leur état a été caractérisé (i.e. blessé, courbé, couché, mort, vivant) et leur position dans l'amphithéâtre a été déterminée (plancher ou talus). Une section transversale de tronc a été prélevée le plus près possible du sol à l'aide d'une tronçonneuse dans les amphithéâtres II et III. Pour l'amphithéâtre I, étant donné la très forte densité des tiges et leur petite taille, une tige sur trois a été échantillonnée le plus près du collet racinaire à l'aide d'un sécateur. De même, dans les trois sites, les tiges de sapin baumier de moins de 0,5 centimètre de diamètre n'ont pas été échantillonnées puisqu'ils se sont assurément établis après la coulée. Des échantillons supplémentaires ont été prélevés sur des arbres qui présentaient des caractéristiques de survivants endommagés (inclinaison, cicatrice d'abrasion, courbures, fort diamètre). Au total, 403 arbres ont été décrits et échantillonnés sur 1200 m de transect répartis entre les trois sites. Les transects ont été localisés à l'aide d'un récepteur D-GPS ProMark3 de Thales. De plus, vingt-neuf arbres supplémentaires ont été échantillonnés parce qu'ils présentaient des caractéristiques de survivants endommagés et localisés à l'aide d'un GPS.

En laboratoire, tous les échantillons ont été finement poncés à l'aide de papier de verre de taille 40, 80, 120, 180 et 360, et analysés à l'aide d'une loupe binoculaire pour dénombrer les cernes annuels de croissance. Dans chaque site, les dates présumées d'établissement des arbres (1er cerne), ainsi que la date du premier cerne de chaque réponse anatomique (cicatrices d'abrasion, bois de réaction, variations de croissance radiale) ont été compilées séparément pour le talus et le plancher. Les cicatrices d'abrasion ont été reconnues par la présence d'un calle de cicatrisation recouvrant une blessure. Le bois de réaction est généralement causé par un changement dans l'inclinaison de l'axe principal de l'arbre. Il a été identifié par un changement dans la coloration du

bois découlant d'une surlignification des parois cellulaires, ainsi que par l'excentricité des cernes (Scurfield, 1973). Enfin, les changements majeurs des conditions de croissance, tels les ouvertures dans le peuplement ou des changements dans les conditions édaphiques peuvent provoquer des variations de croissance radiale. Elles se présentent sous forme de suppression ou de détente de croissance qui peuvent être identifiées et datées grâce à un changement marqué dans la largeur des cernes annuels (Schweingruber, 1996). Les variations de croissance ont été identifiées visuellement sous une loupe binoculaire. On a reconnu une détente ou une suppression de croissance lorsqu'une différence de largeur de cerne d'au moins 50% était visible (Figure 1.4.). L'ensemble des réponses écologiques et anatomiques des arbres sont présentés séparément puisque la promptitude des différentes réponses par rapport aux événements qui les provoquent peut varier. Les cicatrices d'abrasion se forment instantanément et fournissent une date précise (Bollschweiler et al., 2008, Stoffel et Bollschweiler, 2008). En revanche, les détentes et suppressions de croissance radiale et les séquences de bois de réaction peuvent être décalées de quelques années par rapport à l'événement déclencheur (Stoffel et Bollschweiler, 2008). Puisque les cicatrices d'abrasion étaient faiblement répliquées, l'année présumée des coulées a été déterminée à l'aide de la fréquence de réponses anatomiques la plus élevée comme le bois de réaction, les détentes et les suppressions de croissance. La date de l'établissement massif des arbres a été déterminée grâce à la fréquence la plus élevée d'arbres établis la même année (1^{er} cerne) dans les talus et le plancher de l'amphithéâtre.

2.3. Résultats

L'analyse des cernes annuels de croissance sur des arbres établis immédiatement après les événements ou qui ont survécu aux coulées argileuses a permis de dater leurs réponses écologiques et anatomiques. Des pics d'établissements massifs d'arbres sont respectivement survenus en 1999, 1974 et 1939 pour les sites I, II et III. Ces pics d'établissement sont survenus quelques années après des pics de réponses anatomiques sous forme de détentes ou suppressions de croissance, de formation de bois de réaction ou d'occurrence de cicatrices. Au site I l'année 1997 correspond à 3 cicatrices d'abrasion, et au début de 21 séquences de suppression de croissance et 6 séquences de détentes de croissance. À chacun des sites II et III, 6 séquences de bois de réaction débutaient respectivement en 1970 et 1928. En se basant sur ces réponses anatomiques qui précèdent

les pics d'établissement, et en considérant les sources d'erreurs entourant la datation de l'établissement des arbres, les coulées sont probablement survenues respectivement en 1997, 1970 et 1928 aux sites I, II et III (Figure 2.4. et Tableau 2.1.)

L'écart de datation obtenu à l'aide de l'établissement des arbres et des réponses anatomiques des arbres augmente avec l'âge des coulées, passant de 2 à 11 ans de la coulée I à la coulée III (Tableau 2.2.). Un décalage similaire est observé pour l'établissement des arbres dans les talus qui est toujours plus tardif que sur le plancher des amphithéâtres et qui augmente avec l'âge de la coulée, passant respectivement de 3 ans à 21 ans du site I au site III (Tableau 2.2.).

La fréquence de l'établissement des arbres ainsi que les réponses anatomiques des arbres s'amenuise avec l'âge des coulées argileuses (Figure 2.4.). L'étalement des structures d'âge des arbres est respectivement de 9 ans, 26 ans et 67 ans aux sites, I, II et III tandis que l'étalement de l'histogramme de fréquences des réponses anatomiques est de 7 ans, 12 ans et 30 ans aux sites I, II et III. De plus, la hauteur du pic de la structure d'âge diminue fortement avec l'âge du mouvement de masse (Figure 2.4.). Sur le plancher des amphithéâtres, le pic de la structure d'âge est de 18 arbres au site I, 11 arbres au site II et de 5 arbres au site III. Dans les talus, le pic de la structure d'âge passe de 9 arbres au site I à 3 arbres au site III.

Tableau 2.1.

Nombre de réponses écologiques et anatomiques retrouvées dans les transects et nombre de réponses anatomiques supplémentaires en fonction des sites

| Site | Transects | | Supplémentaires | Total réponses anatomiques |
|-------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| | Réponses écologiques | Réponses anatomique | Réponses anatomiques | |
| I | 152 | 54 | 24 | 78 |
| II | 161 | 39 | 11 | 50 |
| II | 90 | 27 | 1 | 28 |
| Total | 403 | 120 | 36 | 156 |

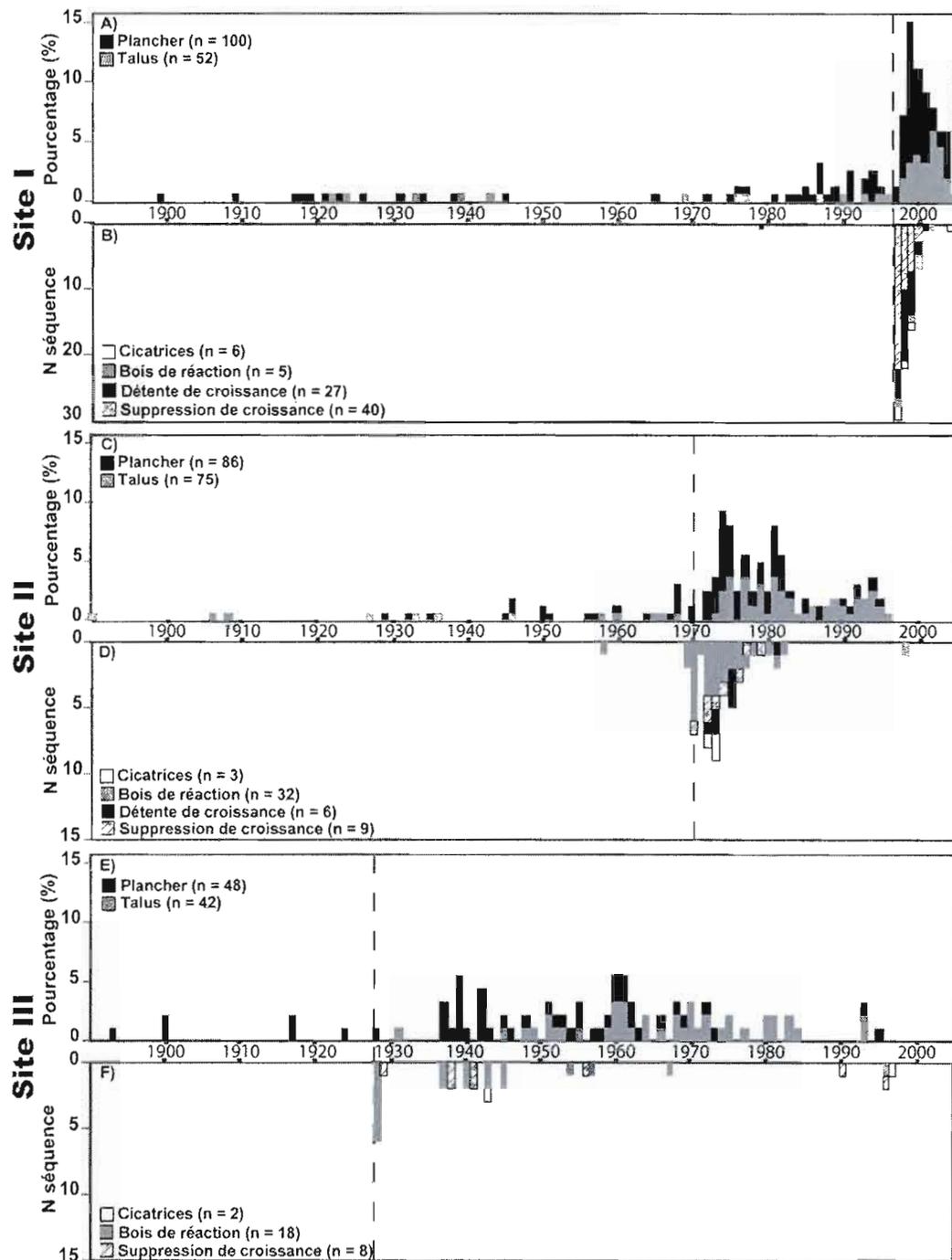


Figure 2.4. Structure d'âge des arbres (A, C et E) et histogramme de fréquences des réponses anatomiques des arbres (B, D et F). Le trait pointillé représente l'année présumée de la coulée argileuse. L'année présumée a été déterminée grâce au premier pic le plus élevé de réponses anatomiques. Les structures d'âge ne permettent qu'une estimation de la date.

Tableau 2.2.

Décalage en années entre les réponses écologiques et anatomiques des arbres sur le talus et le plancher des trois amphithéâtres étudiés.

| Site | Réponse écologique - anatomique | | Réponse écologique |
|------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | Plancher (Nbr. d'années) | Talus (Nbr. Années) | Talus - plancher (Nbr. Années) |
| I | 2 | 5 | 3 |
| II | 4 | 5 | 1 |
| III | 11 | 32 | 21 |

Le nombre de survivants retrouvés dans les amphithéâtres diminue avec l'âge des coulées puisque respectivement 38%, 20% et 7% des individus échantillonnés dans les sites I, II et III ont un premier cerne annuel antérieur à la coulée correspondante (Figure 2.4.). Les survivants étaient plus abondants sur le plancher des amphithéâtres que dans les talus pour les trois sites. Au total, 42, 20 et 6 survivants ont respectivement été retrouvés dans les transects sur le plancher du site I, II et III tandis que seulement 14, 12 et 0 survivants ont été retrouvés sur le talus. Certains survivants ont enregistré plus d'une réponse anatomique puisqu'on dénombre 156 réponses anatomiques sur 120 survivants (Tableau 2.1.). Les variations de croissance radiale sont les types de réponses anatomiques les plus fortement répliqués au site I, tandis que le bois de réaction domine aux sites II et III (Tableau 2.3). Les cicatrices d'abrasions sont rares dans l'ensemble des sites.

Les survivants qui ont développé des réponses anatomiques étaient majoritairement groupés et formaient des îlots forestiers de survivants. Ces îlots étaient souvent positionnés dans la zone de transition entre le bas du talus et le début du plancher des amphithéâtres. Contrairement aux sites I et II où les îlots d'arbres survivants étaient facilement identifiables sur les photographies aériennes ou sur le terrain en raison de l'âge récent des coulées argileuses, les îlots de survivants n'étaient pas aussi évidents à identifier au site III. Néanmoins, la position séquentielle des arbres sur le transect en fonction de l'année présumée de la coulée permet de circonscrire des îlots de survivants (Figure 2.5).

Tableau 2.3.

Répartition du nombre de réponses anatomiques par type

| Site | Type de réponses anatomiques | | | | Total |
|-------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------|-------|
| | Bois de réaction | Cicatrice d'abrasion | Variation de croissance radiale | | |
| | | | Suppression | Détente | |
| I | 5 | 6 | 40 | 27 | 78 |
| II | 32 | 3 | 9 | 6 | 50 |
| III | 18 | 2 | 8 | 0 | 28 |
| Total | 55 | 11 | 57 | 33 | 156 |

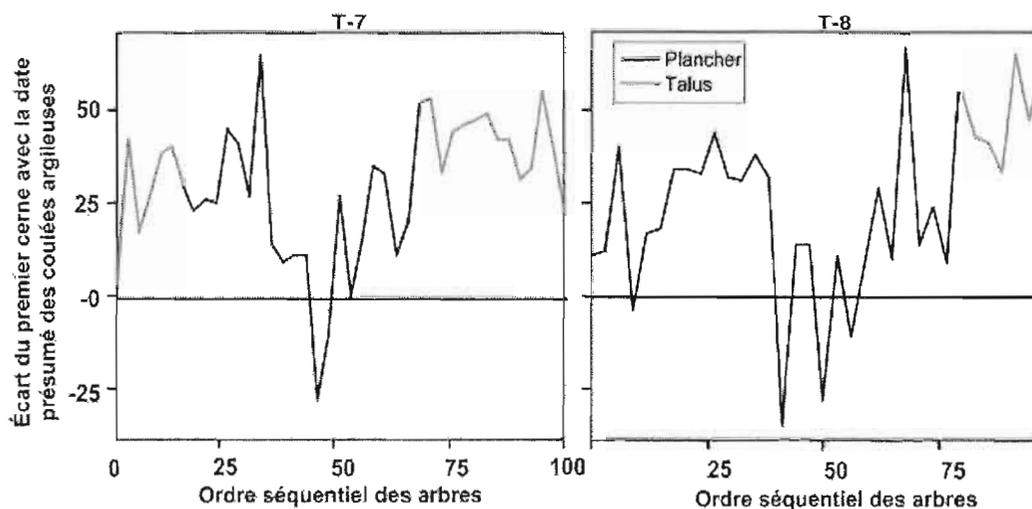


Figure 2.5. Position séquentielle des arbres sur les transects T-7 et T-8 (site III) en fonction de l'écart du premier cerne avec la date présumée de la coulée argileuse. Le zéro de l'ordonnée représente l'année présumée de la coulée, les valeurs positives indiquent des individus établis suite à la coulée tandis que les valeurs négatives représentent les survivants. Les individus voisins avec un établissement antérieur à la coulée correspondent à des îlots de survivants (voir la figure 2.3).

2.4. Discussion

2.4.1. Datation

L'utilisation de la dendrogéomorphologie a permis de dater trois mouvements de masse à partir de l'établissement des arbres et des réponses anatomiques des arbres. Pour les trois sites, les dates obtenues sont toujours plus récentes à l'aide de l'établissement des arbres. Les dates obtenues à l'aide des réponses anatomiques semblent être plus juste, malgré un certain décalage temporelle du bois de réaction, des détentes et des suppressions de croissance (Bollschweiler et al., 2008, Stoffel et Bollschweiler, 2008). Afin de considérer valide la datation d'un mouvement de masse à l'aide des réponses anatomiques, plusieurs auteurs estiment qu'il est nécessaire d'obtenir une réponse anatomique à la même date pour au moins 10 % des arbres survivants échantillonnés (Bégin et Filion, 1985, Corominas et Moya, 1999, Flageollet et al., 1999, Shroder, 1978, Stefanini, 2004). Dans la présente étude, près de 40% des survivants du site I présentaient une réponse anatomique, l'année présumée du glissement (1997), contre 14 % au site II (1970) et 86 % au site III (1928), suggérant que les datations des trois coulées sont valides. De plus, certains auteurs (Allard, 1980, Dubois et al., 2005, MTQ, 2003) ainsi que des archives locales (L'Avenir, 1970) ont permis de confirmer la date obtenue pour le site II, puisqu'ils mentionnent qu'une coulée argileuse est survenue dans ce secteur en mai 1970 sur la haute terrasse bordant la mer. Cet événement a possiblement été décrit dans les archives puisqu'il a entraîné le déplacement de la route nationale.

L'établissement des arbres à la suite des coulées argileuses ne permet d'obtenir qu'un âge minimal. Cette restriction provient de la combinaison de l'erreur liée au délai d'établissement des arbres suite à une perturbation majeure et l'erreur liée à l'échantillonnage des arbres au-dessus du collet racinaire (Pierson, 2007). Premièrement, le délai d'établissement de quelques années entre une perturbation sévère et le rétablissement des arbres est lié aux conditions de dispersion et de germination des graines (Gutsell et Johnson, 2002, McCarthy et Luckman, 1993, Parent et al., 2003) ainsi qu'à la stabilité des talus (De Boer et Archibold, 2001, Nagamatsu et al., 2002). Deuxièmement, il est rarement possible de mesurer l'âge des arbres au niveau du véritable collet racinaire qui est généralement enfoui sous le niveau du sol. Cette deuxième source d'erreur augmente avec l'âge des arbres puisque leur diamètre s'accroît de façon importante, rendant le collet encore plus inaccessible. Selon les milieux et les espèces, ce phénomène peut représenter une erreur allant de quelques années à quelques

décennies (DesRochers et Gagnon, 1997, Gutsell et Johnson, 2002, McCarthy et al., 1991, Pierson, 2007).

La part qu'occupe chacune des sources d'erreur dans le délai total peut être estimée en comparant les trois sites. Dans la coulée la plus récente, il est possible d'observer un rétablissement massif des arbres sur le plancher dès 1998, soit l'année suivant la coulée. Ce phénomène est possiblement redevable à la dispersion à chaque année des graines de sapins baumier (Parent et al., 2003) et à l'abondance de cette espèce dans la forêt environnante. En considérant que les trois sites sont sujets aux mêmes conditions environnementales et que le sapin domine largement la forêt régionale, le rétablissement des arbres a probablement été aussi rapide en 1970 et 1928 pour les sites II et III qu'en 1998 pour le site I. Ceci suggère que le délai plus long pour les sites II et III serait principalement relié à l'erreur d'échantillonnage plus importante parce que les arbres y sont plus vieux et plus gros qu'au site I.

L'instabilité du substrat a probablement retardé le rétablissement des arbres sur les talus. Pour les trois sites, l'établissement des arbres était plus tardif sur les talus que sur les planchers des amphithéâtres. Les pics d'établissement des arbres étaient décalés de 1 à 21 ans entre ces deux positions. Ce décalage est sans doute redevable à l'instabilité du substrat empêchant la régénération de s'établir puisque les talus peuvent demeurer actifs après la coulée sur une période variable reliée au temps de rétablissement de la pente d'équilibre. Ce temps de rétablissement de la pente d'équilibre est principalement influencé par la nature et les propriétés du substrat, ainsi que par les conditions climatiques (Abramson et al., 2002, Nagamatsu et al., 2002) qui influencent la cohésion du substrat, la contrainte de cisaillement et l'intensité des processus d'érosion. C'est par conséquent la datation du pic d'établissement des arbres sur le plancher qui a été retenu pour l'analyse finale. Il est toutefois nécessaire de considérer que dans le cas où les talus demeurent très actifs, les débris peuvent aussi affecter la partie du plancher qui est adjacente au talus. La régénération dans cette portion du plancher pourrait aussi être retardée comme pour les sites II et III.

L'instabilité du talus pourrait également expliquer la présence de plusieurs pics dans l'histogramme de fréquence des réponses anatomiques suivant le pic initial. Les pics observés au site II en 1972 et 1973 (Figure 2.3.) représentent bien cette instabilité

persistante Ce phénomène est confirmé dans la coulée la plus récente au site I où des réponses anatomiques ont continué d'être enregistrées durant les années ultérieures à 1997. Nous déconseillons l'utilisation d'arbres vivants situés uniquement dans les talus pour la datation de coulées argileuses.

2.4.2. Îlots de survivants

Pour favoriser la datation à l'aide des réponses anatomiques, l'identification des îlots de survivants est essentielle. En effet, une grande partie des arbres possédant des réponses anatomiques se retrouvent dans des îlots de survivants. Dans la coulée la plus récente, les îlots sont facilement identifiables sur le terrain, mais ils le sont moins dans les plus vieilles coulées. Dans ce cas, l'échantillonnage par transect et l'analyse à l'aide des structures d'âge sont nécessaires, car ils permettent de localiser les îlots de survivants, notamment au bas du talus et sur le plancher des amphithéâtres. Les îlots se forment à partir de radeau de matière organique surmontant un bloc de sédiments consolidés qui permet à plusieurs arbres de glisser ensemble sur le matériel en fluage sous-jacent et de survivre malgré le caractère destructeur des coulées argileuses. Dans la présente étude, des observations permettent d'affirmer que certains îlots sont supportés par des blocs de podzol à ortstein. Plusieurs de ces podzols ont déjà été cartographiés, notamment à Rivière-Saint-Jean et ils sont localisés à des altitudes entre 12 et 30 mètres (Dubois et al., 1990). En plus de contenir des réponses anatomiques, les îlots de survivants sont probablement des sources de propagules qui participent à la reforestation des amphithéâtres (Francescato et al., 2001).

2.4.3. Différence entre les sites

La comparaison des trois amphithéâtres de mouvements de masse a permis d'observer que la fréquence des réponses anatomiques et de l'établissement des arbres s'amenuise avec le temps. De la coulée la plus récente à la plus ancienne, les distributions de fréquence sont plus étendues et ont une moins grande amplitude. Cette perte d'informations est essentiellement liée au caractère éphémère des arbres. Plus le temps passe après une coulée, plus la fréquence des arbres survivants ou s'étant rétablis diminue au sein de la forêt sur le plancher et le talus des amphithéâtres. L'étalement plus important des données pour les coulées plus anciennes peut aussi être attribuable à

l'instabilité des talus des amphithéâtres, entraînant de nouvelles réponses des arbres. Ce phénomène pourrait expliquer que plus d'une réponse anatomique a été dénombrée sur certains arbres. Pour ce qui est de l'étalement des structures d'âge des arbres des coulées anciennes, il peut s'expliquer entre autres par l'établissement quasi continu d'arbres depuis le pic d'établissement initial. Cependant, la présence d'un deuxième pic d'établissement d'arbres pour les sites II et III permet de supposer que des ouvertures dans le peuplement se sont créées suite à la mortalité d'arbres anciens ou par le déclenchement de coulées isolées. Dans cette étude, les arbres de la coulée la plus ancienne (80 ans) montrent un signal relativement clair en terme de réponses écologiques et anatomiques des arbres, malgré un nombre d'échantillons plus faibles comparativement aux autres sites. Par ailleurs, plus la coulée est ancienne et plus la structure d'âge est diffuse dans le temps. Il est possible que pour les coulées anciennes, la datation d'un pic d'établissement d'arbres significatifs soit plus difficile à distinguer, à moins d'augmenter significativement le nombre d'arbres échantillonnés.

Le type de réponses anatomiques dominantes varie d'une coulée à une autre. Même si le contexte géomorphologique des trois coulées est semblable, les causes de déclenchement de chaque coulée et les conditions subséquentes ne sont pas connues. Il est difficile de lier les caractéristiques morphologiques ou géomorphologiques des amphithéâtres aux réponses anatomiques qui ont été détectées. Dans la coulée I, les variations de croissance radiale dominent. Le décalage temporel associé à ce type d'anomalie est pratiquement nul dans notre cas puisque cet événement est amplement répliqué spatialement. De plus, les variations de croissance radiales sont corroborées à la datation de trois cicatrices d'abrasion. Cependant, afin d'expliquer cette dominance particulière, il est possible de supposer que les arbres survivants échantillonnés ont glissé en masse stable sur le matériel en fluage sous-jacent. Cela a permis aux arbres survivants de se repositionner verticalement au bas du talus expliquant la quasi-absence de bois de réaction normalement associé à l'inclinaison de la tige. Le type d'anomalie de croissance pourrait donc être influencé par la localisation des survivants sur des îlots plus ou moins stables.

2.4.4. Applications et recommandations

L'application de la dendrogéomorphologie combinant l'établissement des arbres et les réponses anatomiques des arbres a permis de dater précisément les trois amphithéâtres de coulées argileuses à l'étude. L'utilisation conjointe de deux types de réponses des arbres est essentielle. L'établissement des arbres suite aux coulées argileuses permet de tracer une structure d'âge générale et d'estimer une date, mais surtout, elle permet d'identifier les arbres qui ont survécu à la coulée. Ces survivants permettent par la suite une datation précise grâce à des réponses anatomiques qu'ils produisent suite aux événements. La distinction entre l'âge obtenu sur le plancher et sur le talus était nécessaire et a permis de déterminer que les conditions sont plus propices à une datation précise sur le plancher des amphithéâtres. Toutefois, Bégin et Filion (1988), à l'est de la Baie d'Hudson ont montré que l'établissement des arbres débutait dans le talus à proximité des semenciers le long de l'escarpement. Dans leur cas, l'activité éolienne retardait considérablement l'établissement des arbres sur le plancher de l'amphithéâtre. Comme les conditions de rétablissement peuvent varier entre les sites, il est primordial de considérer les deux zones de l'amphithéâtre et non seulement se concentrer sur le talus ou le plancher. À la lumière de nos résultats et en considérant que la longévité des essences forestières de cette région oscille entre 120 et 200 ans (Farrar, 1995), il serait possible de dater des coulées argileuses de grandes ampleurs pendant 100 à 150 ans après leur occurrence.

Certaines améliorations peuvent être apportées à notre approche. Premièrement, il est recommandé d'ajouter un facteur de correction d'âge afin de minimiser l'erreur liée à l'échantillonnage au-dessus du collet racinaire. Ce facteur pourrait être obtenu à l'aide du rapport entre la hauteur de l'arbre, la hauteur de la prise de l'échantillon et le nombre de cernes annuels de croissance (Gutsell et Johnson, 2002, Lenhart, 1972, McCarthy et al., 1991). Ensuite, l'intensité d'échantillonnage devrait augmenter avec l'âge présumé des coulées afin de pallier à la perte d'informations causée par la mortalité des arbres. Finalement, il semble essentiel d'échantillonner sur le plancher puisque dans le contexte géomorphologique de notre région d'étude, l'établissement des arbres s'y fait plus tôt que sur le talus et que la plus grande proportion des survivants s'y retrouvent aussi regroupés en îlots.

2.5. Prospectives

L'approche que nous avons développée permettra de dater avec fiabilité des centaines de cicatrices de mouvements de masse de grande ampleur sur les rives de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. La datation exacte des mouvements de masse est indispensable pour retracer leur histoire. L'analyse du rythme et de la vitesse d'érosion des lobes permettra d'évaluer le temps durant lequel le lobe peut servir de protection naturelle à l'érosion côtière par les vagues. Cette analyse permettra également d'évaluer la période de retour des conditions favorables aux déclenchements des mouvements de masse. Ces informations aideront à définir des marges de sécurité pour les zones à risque de mouvements de masse.

CHAPITRE III

CONCLUSION

Cette étude a permis de développer une approche de datation dendrochronologique sur des coulées argileuses de grande ampleur en milieu côtier. La datation du rétablissement des populations forestières combinée à la datation des anomalies de croissance de certains arbres ont permis de dater trois coulées argileuses en 1928, 1970 et 1997. Malgré une perte d'informations avec l'ancienneté des coulées on estime que cette approche permettrait de dater des coulées argileuses en milieu côtier jusqu'à 150 ans après leur occurrence.

La combinaison de l'établissement des arbres et des réponses anatomiques des arbres permet également de déterminer le délai d'établissement des arbres pour cette région ainsi qu'une source d'erreur de datation liée à l'échantillonnage au-dessus du sol qui varie de 2 à 32 ans. Le délai d'établissement des arbres suite à une coulée semble court (1 à 2 ans) dans notre étude, notamment parce que le sapin baumier qui domine la forêt régionale libère des graines massivement à chaque année. Il faut cependant noter que l'établissement des arbres dans les talus de l'amphithéâtre est fortement retardé par l'instabilité prolongée du substrat de cette zone.

Les résultats de cette étude ont permis d'identifier des îlots forestiers d'arbres survivants. Puisque ces îlots se sont formés dans les trois sites étudiés, ils sont probablement fréquents dans les coulées argileuses de notre région d'étude. Leur formation serait notamment redevable à la présence d'une couche indurée dans les podzols. De tels îlots se sont avérés très utiles pour dater les mouvements de masse car ils comportent des arbres avec des réponses anatomiques formées rapidement après les événements.

Cette étude présente une approche de datation dendrogéomorphologique pour des mouvements de masse en milieu côtier. Certaines améliorations sont nécessaires, notamment pour ajuster la quantité d'échantillons qui devrait être augmentée en fonction de l'âge présumé des coulées. Afin de minimiser l'erreur liée à l'établissement de la structure d'âge des arbres, un facteur de correction basé sur la hauteur d'échantillonnage devrait être considéré. Enfin, il est essentiel d'échantillonner autant le talus que le plancher des amphithéâtres puisque le rétablissement des arbres dans les talus est retardé par l'instabilité du substrat.

Notre approche pourrait être utilisée, à la réalisation d'une chronologie régionale de la récurrence des mouvements de masse en milieu côtier de la côte nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Cette chronologie permettrait d'approfondir les connaissances sur les côtes évoluant par mouvements de masse et permettrait de définir un zonage du risque approprié à la dynamique côtière de cette région.

RÉFÉRENCES

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. et Boyce, G.M., 2002. Slope Stability and Stabilization. John Wiley and sons, inc, New-York, 703 p.
- Alestalo, J., 1971. Dendrochronological Interpretation of Geomorphic Processes. Fennia, 105, Helsinki, 1-140 p.
- Allard, J.-D., 1980. Étude ponctuelle de stabilité de la terrasse inférieure dans la municipalité de Rivière St-Jean, Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géotechnique, 18 p
- Bajgier-Kowalska, M., 2008. Lichenometric dating of landslide episodes in the Western part of the Polish Flysch Carpathians. CATENA, 72: 224-234.
- Barnhardt, W.A., Jaffe, B.E., Kayen, R.E. et Cochrane, G.R., 2004. Influence of Near-surface Stratigraphy on Coastal Landslides at Sleeping Bear Dunes National Lakeshore, Lake Michigan, USA. Journal of Coastal Research, 20: 510-522.
- Bégin, C. et Filion, L., 1985. Analyse dendrochronologique d'un glissement de terrain de la région du Lac à l'Eau Claire (Québec nordique). Canadian Journal of Earth Science, 22: 175-182.
- Bégin, C. et Filion, L., 1988. Age of landslides along the Grande Rivière de la Baleine estuary, eastern coast of Hudson Bay, Québec (Canada). Boreas, 17: 289-299
- Bégin, Y. et Payette, S., 1988. Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in subarctic Quebec. Quaternary Research, 30: 210-220.
- Bernatchez, P., 2003. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes: Synthèse, processus, causes et perspectives Thèse de doctorat, Université laval, Québec, 460 p.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.-M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire, 58: 45-71.
- Bird, E.C.F., 1985. Coastline Changes : a Global Review. John Wiley & Sons, Chichester, 219 p.
- Boggs, S.J., 2006. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Pearson Prentice Hall, Toronto, 662 p.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M. et Schneuwly, D.M., 2008. Dynamics in debris-flow activity on a forested cone - A case study using different dendroecological approaches. CATENA, 72: 67-78.

- Bollsweiler, M., Stoffel, M. et Schneuwly, D.M., 2008. Dynamics in debris-flow activity on a forested cone - A case study using different dendroecological approaches. *CATENA*, 72: 67-78.
- Braam, R.R., Weiss, E.E.J. et Burrough, P.A., 1987a. Dendrogeomorphological analysis of mass movement a technical note on the research method. *CATENA*, 14: 585-589.
- Braam, R.R., Weiss, E.E.J. et Burrough, P.A., 1987b. Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *CATENA*, 14: 573-584.
- Cataliotti-Valdina, D. et Long, F.B., 1984. Évolution estuarienne d'une rivière régularisée en climat sub-boréal : la rivière aux Outardes (côte nord du golfe du St-Laurent, Québec). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21: 25-34.
- Cornforth, D.H., 2005. *Landslides in Practice: Investigation, Analysis and Remedial/Preventive Options in Soil*. John Wiley and sons, inc, Hoboken, 596 p.
- Corominas, J. et Moya, J., 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30: 79-93.
- Crosta, G.B. et Clague, J.J., 2009. Dating, triggering, modelling, and hazard assessment of large landslides. *Geomorphology*, 103: 1-4.
- De Boer, D.H. et Archibold, O.W., 2001. Slumping activity and forest vegetation along the northeastern shore of Waskesiu Lake, Albert National Park, Saskatchewan. *Canadian Field-Naturalist*, 115: 106-114.
- DesRochers, A. et Gagnon, R., 1997. Is ring count at ground level a good estimation of black spruce age ? *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 1263-1267.
- Desrosiers, G., Brêthes, J.-C.F. et Long, B.F., 1984. L'effet d'un glissement de terrain sur une communauté benthique médiolittorale du nord du golfe du Saint-Laurent. *Oceanologica Acta*, 7: 251-258.
- Douglas, B.C., Kearney, M.S. et Leatherman, S.P., 2000. *Sea Level Change, History and Consequences*. Academic Press, London, 228 p.
- Dubois, J.-M., 1979. Environnement quaternaire et évolution postglaciaire d'une zone côtière en émergence en bordure sud du bouclier canadien: La moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent, Québec. Thèse de doctorat, Université d'Ottawa, Ottawa, 754 p.
- Dubois, J.-M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S., 2005. Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003, Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, annexes, 291 p

- Dubois, J.-M., Martel, Y.A., Côté, D. et Nadeau, L., 1990. Les Ortsteins du Québec: Répartition géographique, relations géomorphologiques et essai de datation. *The Canadian Geographer*, 34: 303-317.
- Dyer, M.E. et Bailey, R.L., 1987. A Test of Six Methods for Estimating True Heights from Stem Analysis Data. *Forest Science*, 33: 3-13.
- Fantucci, R., 2007. Dendrogeomorphological analysis of shore erosion along Bolsena lake (Central Italy). *Dendrochronologia*, 24: 69-78.
- Farrar, J.L., 1995. Les Arbres du Canada. Fides. Service canadien des forêts, Canada, 502 p.
- Filion, L., Quinty, F. et Bégin, C., 1991. A chronology of landslide activity in the valley of Rivière du Gouffre, Charlevoix, Québec. *Canadian Journal of Earth Science*, 28: 250-256.
- Fiorillo, F., 2003. Geological features and landslide mechanisms of an unstable coastal slope (Petacciato, Italy). *Engineering Geology*, 67: 255-267.
- Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Martin, B. et Weber, D., 1999. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30: 65.
- Francescato, V., Scotton, M., Zarin, D.J., Innes, J.C. et Bryant, D.M., 2001. Fifty years of natural revegetation on a landslide in Franconia Notch, New Hampshire, U.S.A. *Canadian Journal of Botany*, 79: 1477-1485.
- Friesinger, S., 2009. Géorisques côtiers, adaptation et perceptions des communautés côtières dans le golfe du Saint-Laurent. Maîtrise, Université de Rimouski, Rimouski, 198 p.
- Fritts, H., C., 2001. *Tree-Ring and Climate*. The Blackburn Press, London, 567 p.
- Geertsema, M., Cruden, D.M. et Schwab, J.W., 2006. A large rapid landslide in sensitive glaciomarine sediments at Mink Creek, northwestern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83: 36-63.
- Geertsema, M. et Torrance, J.K., 2005. Quick clay from the Mink Creek landslide near terrace, British Columbia: Geotechnical properties, mineralogy, and geochemistry. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 907-918.
- GIEC, 2001. Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Cambridge University Press, Cambridge, 881 p.
- GIEC, 2007. *Climate change 2007: The physical science basis* (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.

- Giovanni, C.B. et Paolo, F., 2008. Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, 22: 473-477.
- Griggs, G.B., Storlazzi, C.D., Seymour, R.J. et Benumof, B.T., 2000. The relationship between incident wave energy and seacliff erosion rates: San Diego County, California. *Journal of Coastal Research*, 16: 1162.
- Guthrie, R.H. et Evans, S.G., 2004a. Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1321-1339.
- Guthrie, R.H. et Evans, S.G., 2004b. Magnitude and frequency of landslides triggered by a storm event, Loughborough Inlet, British Columbia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4: 475-483.
- Gutsell, S.L. et Johnson, E.A., 2002. Accurately ageing trees and examining their height-growth rates: implications for interpreting forest dynamics. *Journal of Ecology*, 90: 153-166.
- Hampton, M.A. et Griggs, G.B., 2004. Formation, Evolution, and Stability of Coastal Cliffs- Status and Trends, USGS, Professional paper 1693, 123 p
- Hapke, C.J., 2005. Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 679-697.
- Hapke, C.J. et Green, K.R., 2006. Coastal landslide material loss rate associated with severe climatic events. *Geological Society of America*, 34: 1077-1080.
- Heikkinen, O., 1994. Using Dendrochronology for the Dating of Land Surfaces p. 213-235 in C. Beck (réd.), *Dating in Exposed and Surface Contexts*. University of New Mexico Press, Albuquerque.
- Hugenholtz, C.H. et Lacelle, D., 2004. Geomorphic controls on landslide activity in champlain sea clays along Green's Creek, eastern Ontario, Canada. *Géographie physique et Quaternaire*, 58: 9-23.
- Hutchinson, J.N., 1968. Field meeting on the costal landslide of Kent. *Proceeding of the Geologist' Association*, 79: 227-237.
- Innes, J.L., 1985. Lichenometry. *Progress in Physical Geography*, 9: 187-254.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Ressources Research*, 36: 1897-1910.
- Jaedicke, C. et Kleven, A., 2008. Long-term precipitation and slide activity in south-eastern Norway, autumn 2000. *Hydrological Processes*, 22: 495-505.

- Kelley, J.T., 2004. Coastal bluffs of New England in :Formation, Evolution, and Stability of Coastal Cliffs-Status and Trends, USGS, Professional paper 1693, 123 p
- Kelley, J.T., Kelley, A.R. et Pilkey, O.H., 1989. Living with the Coast of Maine. Duke University Press, 174 p.
- Komar, P.D., 1998a. Beach Processus and Sédimentation. Prentice Hall, 2nd, New Jersey, 543 p.
- Komar, P.D., 1998b. Wave erosion of a massive artificial coastal landslide. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 415-428.
- Komar, P.D. et Shih, S.-M., 1993. Cliff Erosion along the Oregon Coast: A Tectonic-Sea Level Imprint Plus Local Controls by Beach Processes. *Journal of Coastal Research*, 9: 747-765.
- Kunkel, K.E., Andsager, K. et Easterling, D.R., 1999. Long-Term Trends in Extreme Precipitation Events over the Conterminous United States and Canada. *Journal of Climate*, 12: 2515-2527.
- L'Avenir, 1970. 461,000 \$ en 1970-71 pour les routes de Duplessis, L'Avenir and Sept-îles journal, (Sept-Îles), Mardi 13 octobre 1970.
- La Rochelle, P., Chagnon, J.-Y. et Lefebvre, G., 1970. Regional geology and landslides in marine clay deposits of eastern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 7: 145-156.
- Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L. et Dikau, R., 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*, 30: 33-52.
- Laverdière, C., 1972. Terminologie et bibliographie: Les glissements d'argile sensible du Québec méridional. *Revue de géographie de Montréal*, 26: 193-198.
- Lebuis, J., 1977. Évaluation des risques de coulées argileuses et de glissements de terrain dans la région de la rivière Saint-Jean, Ministère des Richesses naturelles, Service de la géotechnique, Québec, p
- Lee, E., Meadowcroft, I., Hall, J. et Walkden, M., 2002. Coastal landslide activity: a probabilistic simulation model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61: 347-355.
- Lee, M.E. et Clark, A.R., 2002. Investigation and Management of Soft Rock Cliffs. Thomas Telford, 382 p.
- Lefebvre, G., 1986. Slope instability and valley formation in Canadian soft clay deposits. *Canadian geotechnical journal*, 23: 261-270.

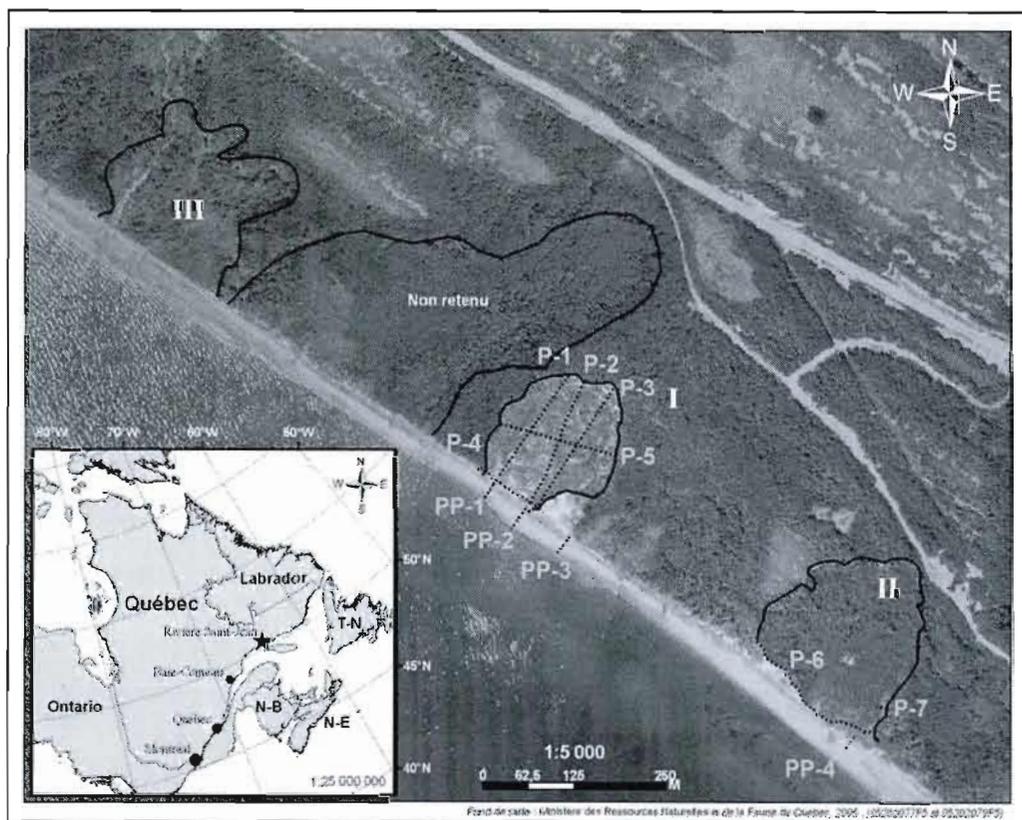
- Lenhart, J.D., 1972. An alternative procedure for improving height/age data from stem analysis. *Forest science*, 18: 332.
- Leroueil, S. et Tavenas, F., 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20: 681-705.
- Libby, W.F. et Willard, F., 1967. Radiocarbone Dating. Univ. Chicago Press, Chicago, 175 p.
- Lozano, I., Devoy, R.J.N., May, W. et Andersen, U., 2004. Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. *Marine Geology*, 210: 205-225.
- Luckman, B.H., 2000. The little ice age in the Canadian Rockies. *Geomorphology*, 32: 357-384.
- McCarthy, D.P. et Luckman, B.H., 1993. Estimating ecesis for tree-ring dating of moraines: A comparative study from the Canadian Cordillera. *Arctic and Alpine Research*, 25: 63-68.
- McCarthy, D.P., Luckman, B.H. et Kelly, P.E., 1991. Sampling height-age error correction for spruce seedlings in glacial forefields, Canadian Cordillera. *Arctic and Alpine Research*, 23: 451-455.
- Morneau, F., 1988, Érosion littorale et glissement de terrain sur la Côte Nord du Québec, Carte au 1: 250 000, Ministère des Transports Québec,
- Ministère des Transports, MTQ, 2003, Localisation du glissement de terrain de Rivière-Saint-Jean 1970, Carte au 1:15 000, Direction du laboratoire des chaussées, Service de la géotechnique et de la géologie
- Nagamatsu, D., Seiwa, K. et Sakai, A., 2002. Seedling establishment of deciduous trees in various topographic positions. *Journal of Vegetation Science*, 13: 35-44.
- Okamoto, T., Larsen, J.O., Matsuura, S., Asano, S., Takeuchi, Y. et Grande, L., 2004. Displacement properties of landslide masses at the initiation of failure in quick clay deposits and the effects of meteorological and hydrological factors. *Engineering Geology*, 72: 233-251.
- Parent, S., Morin, H. et Messier, C., 2000. Effects of adventitious roots on age determination in Balsam fir (*Abies balsamea*) regeneration. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 513-518.
- Parent, S., Simard, M.-J., Morin, H. et Messier, C., 2003. Establishment and dynamics of the balsam fir seedling bank in old forests of northeastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 597.
- Paskoff, R., 1998. Les littoraux, Impacts des Aménagements sur leur Évolution. A. Colin, Paris, 260 p.

- Paskoff, R., 2001. L'élévation du Niveau de la Mer et les Espaces Côtiers : le Mythe et la Réalité. Institut océanographique, Paris, 190 p.
- Payette, S., 1980. Les grandes crues glacielles de la rivière aux feuilles (Nouveau-Québec): Une analyse dendrochronologique. *Le Naturaliste Canadien*, 107: 215-225.
- Peters, V.S., Macdonald, E.S. et Dale, M.R.T., 2002. Aging discrepancies of white spruce affect the interpretation of static age structure in boreal mixedwoods. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 1496.
- Pierson, T.C., 2007. Dating young geomorphic surfaces using age of colonizing Douglas fir in southwestern Washington and northwestern Oregon, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 811-831.
- Ressources Naturelles Canada, RNC, 2009, Environnement, Catastrophes naturelles, dans L'atlas du Canada, Ottawa, <http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/index.html>
- Schweingruber, F.H., 1988. *Tree Rings. Basics and Applications of Dendrochronology*. Springer, 292 p.
- Schweingruber, F.H., 1996. *Tree Rings and Environment, Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, and Paul Haupt Verlag, 609 p.
- Scurfield, G., 1973. Reaction Wood: Its Structure and Function: Lignification may generate the force active in restoring the trunks of leaning trees to the vertical. *Science*, 179: 647-655.
- Shroder, J., F. Jr, 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9: 168-185.
- Shroder, J., F. Jr, 1980. Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography*, 4: 161-188.
- Shroder, J., F. Jr et Bishop, M.P., 1995. Geobotanical assessment in the Great Plains, Rocky Mountains and Himalaya. *Geomorphology*, 13: 101.
- Solomina, O.N., 2002. Dendrogeomorphology: research requirements. *Dendrochronologia*, 20: 233-245.
- Stefanini, M.C., 2004. Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology*, 63: 191-202.
- Stoffel, M. et Bollschweiler, M., 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research - an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 187-202.

- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lievre, I., Delaloye, R., Myint, M. et Monbaron, M., 2005. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest--a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68: 224-241.
- Stone, G.W. et Orford, J.D., 2004. Storms and their significance in coastal morpho-sedimentary dynamics. *Marine Geology*, 210: 1-5.
- Strunk, H., 1997. Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *CATENA*, 31: 137-151.
- Winter, L.E., Brubaker, L.B., Franklin, J.F., Miller, E.A. et DeWitt, D.Q., 2002. Initiation of an old-growth Douglas-fir stand in the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 1039.
- Zhang, X., Walsh, J.E., Zhang, J., Bhatt, U.S. et Ikeda, M., 2004. Climatology and Interannual Variability of Arctic Cyclone Activity: 1948 - 2002. *Journal of Climate*, 17: 2300-2317.

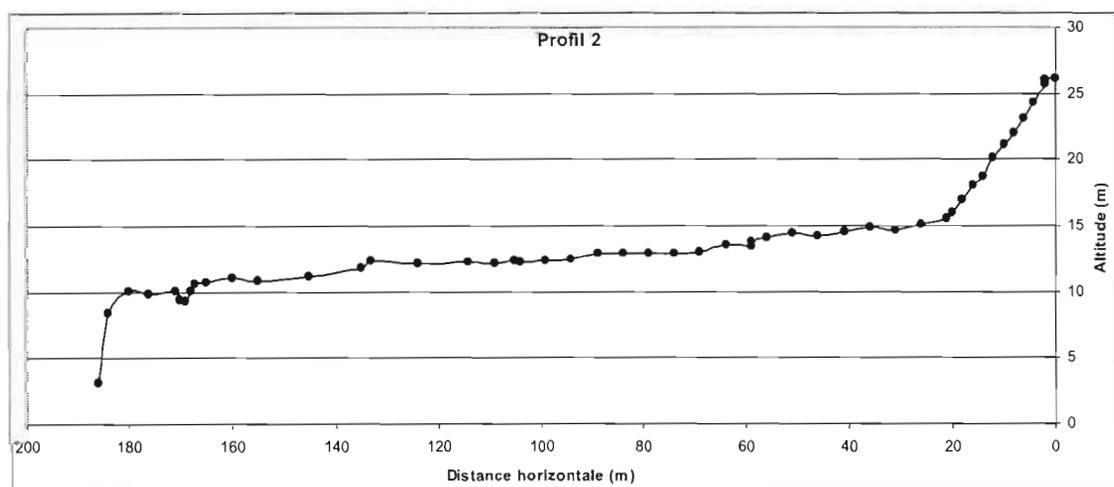
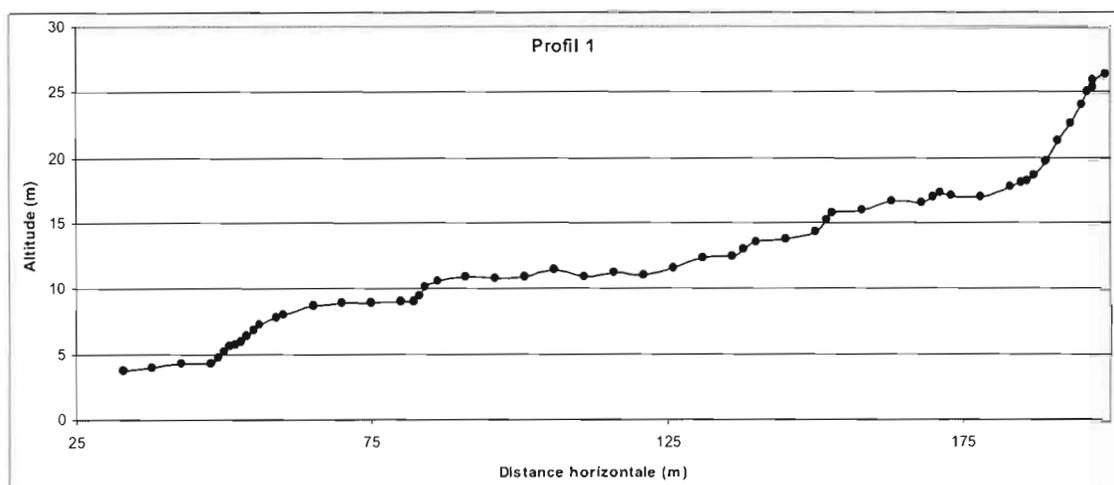
ANNEXE 1

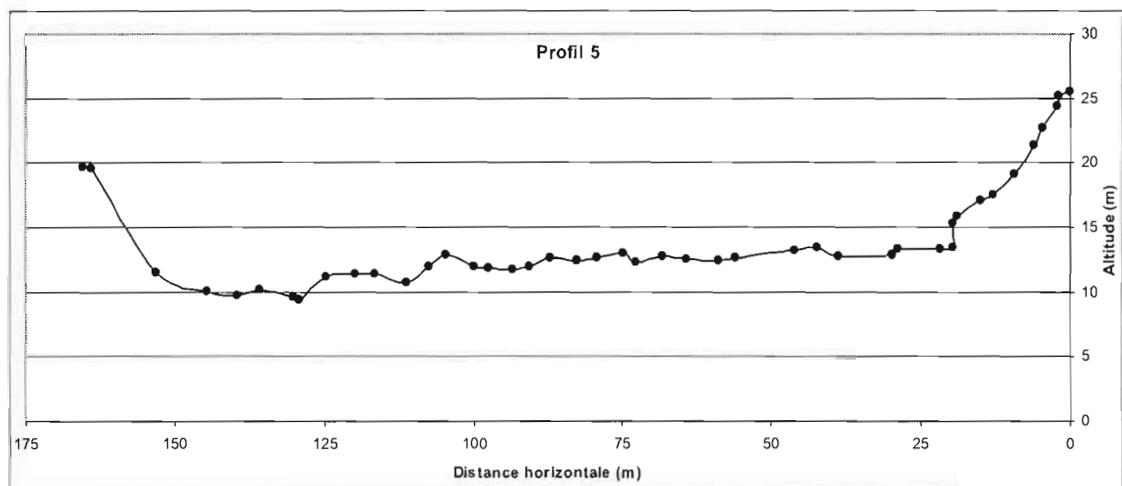
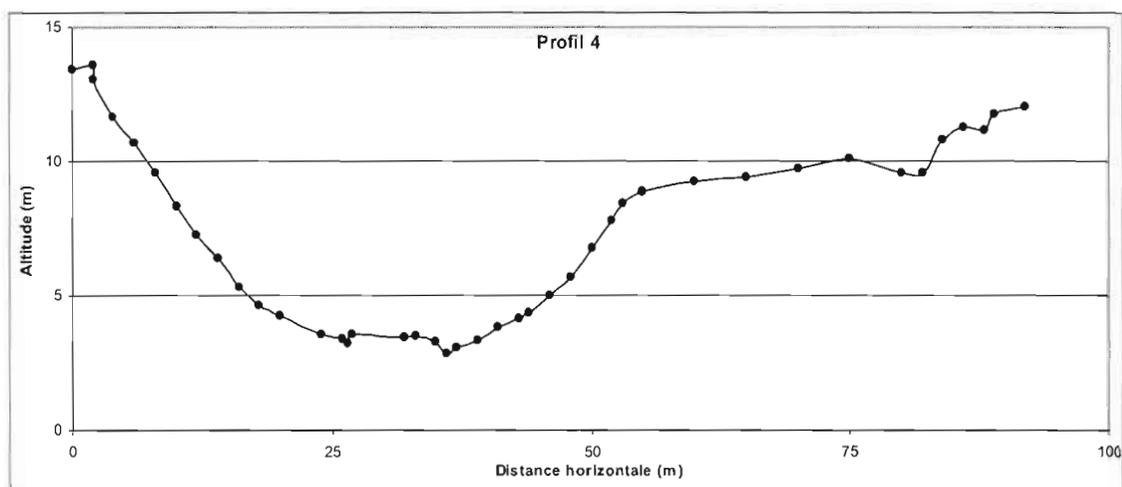
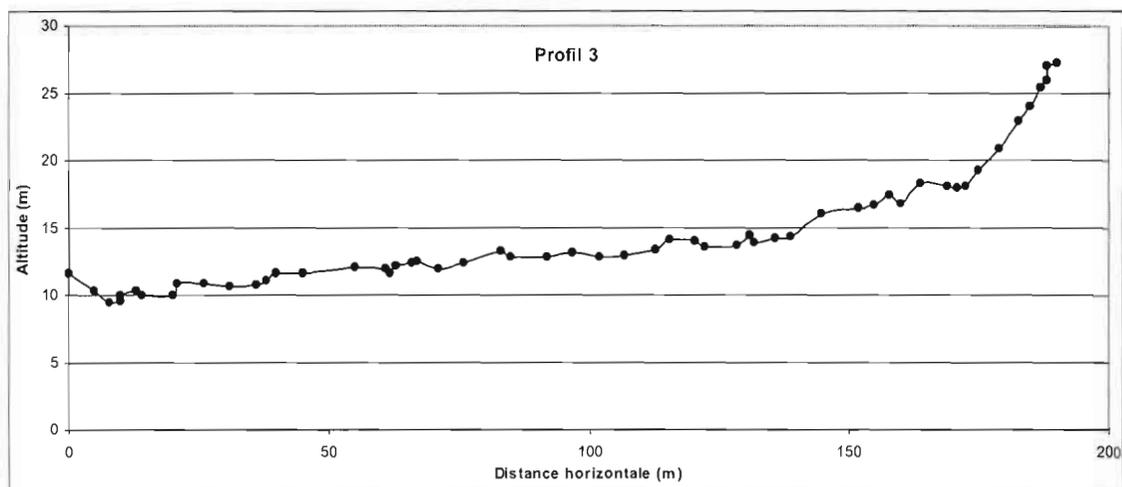
LOCALISATION DES PROFILS



ANNEXE 2

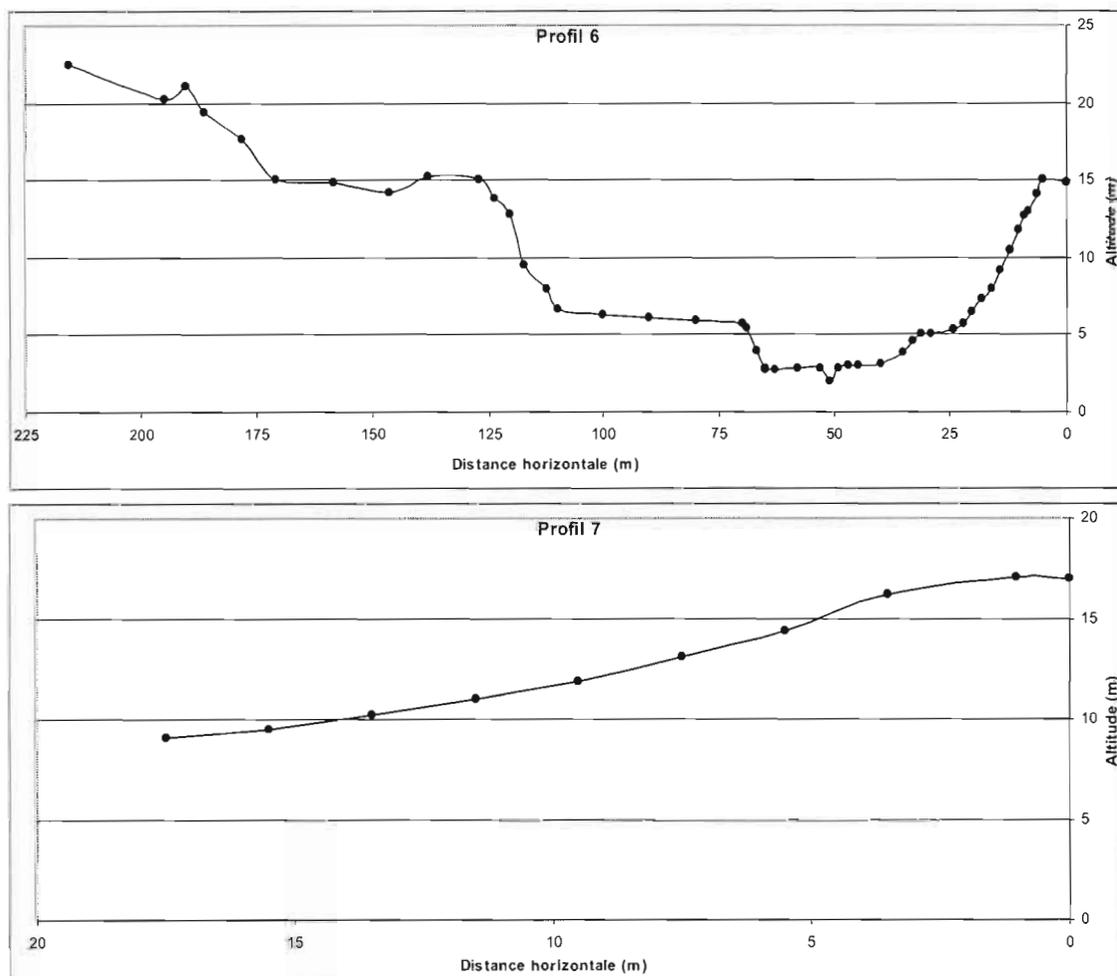
PROFILS RÉALISÉS À L'INTÉRIEUR DE L'AMPHITHÉÂTRE I





ANNEXE 3

PROFILS RÉALISÉS EN BORDURE DE L'AMPHITHÉÂTRE II ET SUR LE TALUS EST



ANNEXE 4

PROFILS DE PLAGE FACE AUX AMPHITHÉÂTRES I (A, B, C) ET II (D)

